MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5537-TDI/525

ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO DE ALTA SENSIBILIDADE E RESOLUÇÃO: ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES

FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Astronomia, orientada pelo Dr. Hanumant S. Sawant, aprovada em junho de 1992.

INPE
São José dos Campos
Junho 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

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet un Austausch
- Pidese canje
- Просим обмен
- 歓迎者可上換
- 出版物交換の不願い

Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5537-TDI/525

ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO DE ALTA SENSIBILIDADE E RESOLUÇÃO: ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES

FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Astronomia, orientada pelo Dr. Hanumant S. Sawant, aprovada em junho de 1992.

INPE
São José dos Campos
Junho de 1992

523.985

FERNANDES, F.C.R.
Espectrógrafo decimétrico de alta sensibilidade e resolução: análise preliminar das explosões solares / F.C.R. Fernandes.-- São José dos Campos : INPE, 1992.
154p.- (INPE-5537-TDI/525)

1. Explosão solar. 2. espectrógrafo solar. I. Título.

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

Dr. José Humberto Andrade Sobral _____
Presidente

Dr. Hanumant Shankar Sawant _____
Orientador

Dr. Eugenio Scalise Júnior _____
Membro da Banca

Dr. José Angelo da Costa Ferreira Neri _____
Membro da Banca

Dr. Sayd José Codina Landaberry _____
Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Francisco Carlos Rocha Fernandes

São José dos Campos, 10 de junho de 1992

"Mudaram as estações e nada mudou
mas eu sei que alguma coisa aconteceu
está tudo assim tão diferente..."

Renato Russo

"Cilitle" e "Chicão",
prá vocês
(e, com certeza, ainda
fico devendo muito).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho envolveu a ajuda e colaboração de diversas pessoas (algumas das quais tive a grata satisfação de conhecer justamente através dele), gostaria, então de ser capaz de estender os meus agradecimentos a todas estas pessoas, desde aquelas que realmente participaram direta e ativamente na elaboração do trabalho, até as que simplesmente partilharam comigo todo este processo.

Primeiramente, quero agradecer ao Dr. Sawant, que foi o principal responsável por eu chegar onde cheguei, quem acreditou nas minhas capacidades (e soube compreender minhas deficiências e limitacões) e me ofereceu, não um, mas dois possíveis temas de tese, quando eu estava literalmente desorientado, que me permitiu participar e contribuir para a realização de um sonho que era o desenvolvimento do espectrógrafo decimétrico. Foi ele quem me ensinou muito, do pouco que sei e mais do que um mero orientador, foi um bom amigo.

Agradeço também ao (sempre) Reinaldo, meu braço direito e ao Cecatto, com os quais partilhei o orgulho de integrar o "Grupo de Radioastronomia Solar" do INPE.

Os meus sinceros agradecimentos também:

- Ao pessoal da oficina mecânica do INPE, em particular ao Léo e ao Marquinho, e ao pessoal da Harald responsáveis pelo apoio e manutenção da antena.
- Ao Dr. Escada e ao pessoal do Laboratório Fotográfico do INPE, em Cachoeira Paulista, principalmente ao Sr. Vanderlim e à Cida pelas reproduções fotográficas.
- Ao Dr. Neri, responsável por toda eletrônica do espectrógrafo decimétrico, que, com muita paciência, me auxiliou e ensinou muito.
- Ao Daniel Martinazzo, pelo sistema de aquisição digital dos dados, desenvolvido juntamente com o Dr. Neri.
- Ao pessoal do "LASER", pela acolhida, enquanto o espectrógrafo não possuía sede própria.

- Ao Dr. Benjamim S.M.C. Galvão, do Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE, pelas medidads de interferência local realizadas, bem como pelos esclarecimentos e discussões.
- Ao Sr. Lúcio B.T. Cividanes, da Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA) do INPE, pelo apoio técnico e pelas medidas e testes da instrumentação.
- Ao Chico, pelos galhos técnicos quebrados.
- Ao Dr. Abdu, pela utilização dos ampliadores de filme.
- Ao Flávio Damico pela ajuda na editoração do texto em Latex.

E não posso deixar de agradecer também:

- À toda comunidade da Mansão Azul, em particular, aos fundadores: Marquinho, Ney, Ronald e Helder, pelos incontáveis momentos (bons ou não) de amizade e união, e isso, não tem agradecimento que pague.
- A todos alunos da pós-graduação do INPE, com que convivi e dividi as mesmas ansiedades, dificuldades, prazeres e decepções que uma tese nos traz; só quem passa por isso pode entender.

Meu agradecimento especial a uma garota incrível, que mesmo longe, na maior parte do tempo, me incentivou, me ouviu e esteve rondando meus pensamentos todos estes dias, pra que eu não me esquecesse nunca o que é sorrir. Má, obrigado por tudo.

E por fim, e talvez mais do que nunca, agradecer ao pessoal de casa: Cilitle, Chicão, Sú, Zé, Tuti, Lau, Cris e Gil, que podem não estar nem um pouco interessados em espectrógrafos decimétricos ou explosões solares seja de que tipo for, mas com certeza, estiveram (e estarão) sempre do meu lado.

A todos, meu "muito obrigado", de coração.

RESUMO

O rádio espectrógrafo solar de alta sensibilidade que utliza uma antena parabólica de 9 metros de diâmetro, com montagem polar, está operando regularmente desde dezembro de 1990. O espectrógrafo opera numa banda de freqüência de (1600 $\pm$ 100) MHz, com altas resoluções temporais (20–100 ms) e em freqüência (0,3–3 MHz). Os dados são registrados em filme 35 mm preto e branco e também digitalizados. As características do espectrógrafo e da antena para várias elevações são descritas em detalhes. As limitações do espectrógrafo e os planos futuros são também apresentados. Até janeiro de 1992, cerca de 162 grupos de explosões solares foram registrados pelo espectrógrafo decimétrico. As explosões foram classificadas em duas categorias principais: i) microondas e ii) explosões decimétricas, geradas, respectivamente, devido ao mecanismo girossincrotrônico e pela interação do feixe de elétrons com o plasma. Os parâmetros observacionais de 44 grupos de explosões decimétricas, tais como densidade de fluxo observada, duração total, tempos de excitação e descida, sugerem que sejam explosões tipo IIIRS decimétricas e sejam geradas no segundo harmônico pela interação do feixe com o plasma. A densidade de elétrons do feixe estimada é da ordem de 10^4 cm^{-3}.

HIGH SENSITIVITY AND RESOLUTION DECIMETRIC SPECTROSCOPE: PRELIMINARY ANALYSIS OF SOLAR BURSTS

ABSTRACT

High sensitivity radio spectroscope in conjunction with a 9 meter diameter polar mounted antenna has been put into regular operation since December 1990. Spectroscope operates over band of (1600 $\pm$ 100) MHz with high time (20–100) ms and frequency resolution of (0.3–3) MHz. The data is recorded on 35 mm black and white film and is digitized. Characteristics of the antenna at various elavations and that of spectroscope are described in detail. Limitations of the existing spectroscope and near future plans are also presented. Up to January 1992, about 162 groups of solar bursts have beeen recorded by this spectroscope. They have been classified in two major categories: i) microwave ii) decimetric bursts, generated due to gyrosynchrotron and beam plasma interactions, respectively. Preliminary characteristics of 44 groups of the decimetric bursts, such as of the observed flux, total duration, excitation and decay time, have suggested that they are likely to be decimetric type III bursts and are generated at the second harmonic by beam plasma interaction. Estimated beam density is of the order of 10^4 cm^{-3}.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS xix
LISTA DE TABELAS xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS xxv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS xxix

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 1

1.1 "FLARES" SOLARES 1
1.2 EXPLOSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS 4
1.3 EMISSÃO DE PLASMA 11
1.4 ABSORÇÃO DAS ONDAS DECIMÉTRICAS 12
1.5 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO 14
1.6 CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR 17
1.7 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 17

CAPÍTULO 2 INSTRUMENTAÇÃO 19

2.1 INTRODUÇÃO 19
2.2 ANTENA 21
2.2.1 FIGURA DE RADIAÇÃO 23
2.3 ALIMENTADOR 27
2.3.1 "CROSS-TALK" 27
2.3.2 VSWR 27
2.3.3 DIRETIVIDADE 30
2.3.4 GANHO 31
2.4 INTERFERÊNCIA LOCAL 32
2.5 PRÉ-AMPLIFICADOR 34
2.6 CABOS 36
2.7 RECEPTOR - ANALISADOR ESPECTRAL 38
2.8 AMPLIFICADOR DC/INVERSOR 42
2.9 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS . . 42
2.9.1 REGISTRADOR DE PAPEL 43
2.9.2 SISTEMA ÓTICO 43
2.9.3 SISTEMA DIGITAL 44
2.10 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA 46
2.10.1 CALIBRAÇÃO EM INTENSIDADE 46
2.10.2 CALIBRAÇÃO EM FREQÜÊNCIA 46
2.10.3 CALIBRAÇÃO EM TEMPO 46
2.10.4 CALIBRAÇÃO DOS CANAIS DIGITAIS 48
2.11 ÁREA FÍSICA DA ANTENA 50

2.12 ÁREA EFETIVA DA ANTENA 50
2.13 EFICIÊNCIA DA ANTENA 50
2.14 DENSIDADE DE FLUXO 50
2.15 TEMPERATURA DE ANTENA DO SOL 51
2.16 TEMPERATURA DE SISTEMA 54
2.17 TEMPERATURA DE "BACKGROUND" 54
2.18 CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DO RECEPTOR 56

CAPÍTULO 3 OBSERVAÇÕES 59

3.1 OBSERVAÇÕES INICIAIS 59
3.2 OBSERVAÇÕES SOLARES SISTEMÁTICAS 63
3.2.1 PERÍODOS DE OBSERVAÇÃO 64
3.2.2 INTERFERÊNCIA LOCAL 66
3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS EXPLOSÕES SOLARES OBSERVADAS . . . 67

CAPÍTULO 4 ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES 73

4.1 INTRODUÇÃO 73
4.2 PARÂMETROS OBSERVACIONAIS DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm 74
4.2.1 DENSIDADE DE FLUXO DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm . 74
4.2.2 DURAÇÃO DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm 75
4.2.3 TAXAS DE DERIVA EM FREQÜÊNCIA DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm 80
4.3 PARÂMETROS DE PLASMA 82
4.3.1 DENSIDADE DE ELÉTRONS 82
4.3.2 ALTITUDE HELIOCÊNTRICA 82
4.4 VELOCIDADE DO FEIXE DE ELÉTRONS 84
4.5 PERFIS TEMPORAIS DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm DIGITALIZADAS 84
4.5.1 TEMPOS DE EXCITAÇÃO E DESCIDA 84
4.6 AMORTECIMENTO DA RADIAÇÃO 89
4.6.1 AMORTECIMENTO COLISIONAL 89
4.6.2 AMORTECIMENTO DE LANDAU 90
4.7 DENSIDADE E NÚMERO TOTAL DE ELÉTRONS DO FEIXE . . . 91
4.8 EXPLOSÃO NÃO CLASSIFICADA 93

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E PLANOS FUTUROS 97

5.1 CONCLUSÕES 97
5.1.1 DESENVOLVIMENTO DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO . 97
5.1.2 OBSERVAÇÕES SOLARES 97
5.1.3 ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES 98

5.2 PLANOS FUTUROS 100
5.2.1 EXPLOSÕES SOLARES 100
5.2.2 INSTRUMENTAÇÃO 100
5.3 INTERCÂMBIO 104

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

APÊNDICE A: DESENHO DA CÂMERA FILMADORA 113

APÊNDICE B: CÁLCULO DA VELOCIDADE DO FILME EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VARREDURA DO SISTEMA 115

APÊNDICE C: DIAGRAMA DA PLACA/INTERFACE 117

APÊNDICE D: PROGRAMA DE DIGITALIZAÇÃO (PRODIG. PAS) DOS SINAIS DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO 119

APÊNDICE E: DIAGRAMA DO CIRCUITO TEMPORIZADOR 129

APÊNDICE F: LISTA DOS GRUPOS DE EXPLOSÕES SOLARES SELECIONADOS PARA ANÁLISE PRELIMINAR 131

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Esquema com os diferentes tipos de radiação eletromagnética emitidos durante os "flares" solares. Os comprimentos de onda nos quais os diferentes tipos de explosões rádio são observados estão indicados à direita. A escala vertical indica as alturas acima da cromosfera solar. São mostradas ainda as escalas em comprimentos de onda (log λ), em freqüência (para ondas de rádio) e em energia (para raios-γ e raios-X) 2

1.2 Representação dos diferentes tipos de explosões solares observadas na faixa de rádio freqüências (10 – 30000 MHz) 3

1.3 "Cenário" de um "flare" solar, onde são mostradas a região de aceleração e as fontes de microondas e emissão de plasma (tipo III métricas e decimétricas) 5

1.4 Espectro típico de emissão em microondas (girossincrotrônica), mostrando a freqüência de corte (f_{corte}), devido ao efeito Razin, a freqüência de pico (f_{pico}), que depende da intensidade do campo magnético, a freqüência máxima (f_{max}) e os índices espectrais para as partes oticamente espessa ($\beta > 0$) e oticamente fina ($\beta < 0$) do espectro 6

1.5 Espectro dinâmico de uma explosão tipo III decimétrica, observada em 27 de junho de 1981 9

1.6 Espectro dinâmico de uma explosão tipo "blip" 10

1.7 Exemplo de explosões tipo "spikes" 10

1.8 Diagrama de blocos representando as várias etapas do processo de emissão de plasma 13

2.1 Diagrama de blocos representando o espectrógrafo decimétrico com AS–RTF 20

2.2 Refletor parabólico do espectrógrafo decimétrico, com 9 metros de diâmetro e montagem polar, contruído em malha de alumínio 22

2.3 Figura de radiação de uma antena (a) em coordenadas esféricas e escala linear e (b) em coordenadas retangulares e decibéis 24

2.4 Figuras de radiação da antena para polarização horizontal: (a) em 1550 MHz, (b) em 1600 MHz e (c) em 1650 MHz. Os respectivos valores da largura do feixe a meia potência também são mostrados 25

2.5 Figuras de radiação da antena para polarização vertical: (a) em 1550 MHz, (b) em 1600 MHz e (c) em 1650 MHz. Os respectivos valores da largura do feixe a meia potência também são mostrados 26

2.6 "Cross–talk" da antena para: (a) 1550 MHz, (b) 1600 MHz e (c) 1650 MHz 28

2.7 Medidas de VSWR entre 1500 e 1700 MHz 29

2.8 Figura de radiação da antena mostrando θ_{MP} e ϕ_{MP} 31

2.9 Interferência local medida no INPE: (a) entre 30 e 200 MHz; (b) entre 200 e 1000 MHz e (c) entre 1000 e 2500 MHz. Para as três bandas a resolução espectral foi 100 kHz 33
2.10 Medidas de ganho versus freqüência para o pré–amplificador (LNA), na faixa de 1420 a 1780 MHz 35
2.11 A curva 2 representa a atenuação ($\sim$ 0,16 dB), devido ao cabo curto, entre 1500 e 1700 MHz 36
2.12 A curva 2 representa a atenuação ($\sim$ 0,16 dB), devido ao cabo longo, entre 1500 e 1700 MHz 37
2.13 Sistema de coordenadas mostrando os domínios (a) do tempo e (b) da freqüência 39
2.14 Diagrama de blocos representando um analisador espectral do tipo super–heterodino 40
2.15 Relação entre freqüência e tempo para um sinal detectado por um sistema de varredura 41
2.16 Calibração em intensidade (1, 2 e 3 dB acima do nível do sol calmo): na forma digital (acima) e no espectro dinâmico (filme) (abaixo) . . 47
2.17 Calibração em freqüência (separação de 5 MHz) do espectro dinâmico 48
2.18 Calibração dos 20 canais de freqüência da digitalização 49
2.19 Excesso de temperatura de antena do sol, obtido por Benz et al. (1991), com um espectrômetro de banda larga (100–4000 MHz), com polarização circular 53
2.20 Temperatura de antena do fundo de céu, em função da freqüência . . 55
3.1 Figura de radiação da antena, obtida em 19/01/91, através do Modo Trânsito Solar (MTS), mostrando a largura do feixe a meia potência (HPBW) de 1,5°, a calibração de 10 dB e os níveis de sinal do sol, do céu e do receptor 60
3.2 Figuras de radiação do espectrógrafo decimétrico obtidas entre dezembro de 1990 e janeiro de 1991, pelo MTS 61
3.3 Perfil da figura de radiação da antena na direção Norte–Sul, obtida através da normalização das amplitudes (An) medidas pelo MTS. A largura do feixe a meia potência (HPBW) obtida é $\sim$ 1,65° 62
3.4 Primeira explosão solar observada com o espectrógrafo decimétrico de AS–RTF, em 11/01/91 63
3.5 Espectro dinâmico mostrando interferência em freqüência fixa ($\sim$ 1570 MHz) 67
3.6 Explosões solares observadas em 29 de maio de 1991, cujo espectro dinâmico é mostrado na Figura 3.7 68
3.7 Espectro dinâmico das explosões solares observadas em 29 de maio de 1991. Os pontos D, G e H assinalam explosões tipo III–dm (emissão de plasma), de curta duração ($<$ 3 s). Os pontos A, B, C, E, F e I representam explosões contínuas em microondas, originadas do processo de emissão girossincrotrônico. Entre os pontos E e F o sinal foi atenuado em 1 dB 69

3.8 Espectro dinâmico mostrando um grupo de explosões solares tipo III -dm 69
3.9 Espectro dinâmico de emissão solar girossincrotrônica 70
4.1 Histograma de freqüência dos valores de densidade de fluxo de 91 explosões solares tipo III-dm individuais analisadas 75
4.2 Histograma de freqüência das durações totais de 100 explosões tipo III-dm analisadas. A duração média obtida é $\sim$ 740 ms 76
4.3 Gráfico tri-dimensional de uma explosão solar tipo III-dm, observada em 10 de janeiro de 1992 na faixa de freqüência de 1500 a 1700 MHz 77
4.4 Gráfico do logarítimo da densidade de fluxo versus tempo, de uma explosão solar tipo III-dm observada em 10 de janeiro de 1992 78
4.5 Histograma de freqüência das durações totais das 8 explosões solares tipo III-dm digitalizadas. A duração média é $\sim$ 328 ms 79
4.6 Histograma de freqüência das taxas de deriva das explosões solares tipo IIIRS-dm 80
4.7 Gráfico da taxa de deriva em freqüência versus freqüência das explosões solares tipo IIIRS-dm, juntamente com os valores obtidos por Stähli e Benz (1987) para explosões solares tipo III métricas (TIII-m) e em microondas (TIII-mo) 81
4.8 Ajuste da reta (Equação 4.2) de logarítimo da densidade de elétrons (N_e) e freqüência de plasma (f_p) versus altitude heliocêntrica (h), obtida dos valores da Tabela 4.2 83
4.9 Histograma de freqüência dos tempos de excitação obtidos para as 8 explosões tipo IIIRS-dm digitalizadas 85
4.10 Histograma de freqüência dos tempos de descida obtidos para as 8 explosões tipo IIIRS-dm digitalizadas 86
4.11 Gráfico do tempo de descida (t_d) versus freqüência (f) das explosões solares tipo III acima de 300 MHz. A seta indica o tempo de descida médio ($\sim$ 206 $\pm$ 75 ms), obtido das 8 explosões tipo IIIRS-dm digitalizadas, observadas com o espectrógrafo decimétrico (1600 MHz) . . . 87
4.12 Gráfico mostrando os tempos de descida em função da freqüência para as explosões solares tipo III métricas e em microondas. A seta indica o tempo de descida médio estimado para as explosões solares tipo IIIRS-dm (1600 MHz) 88
4.13 (a) Distribuição maxwelliana de elétrons do meio, mostrando que existem mais elétrons mais lentos, do que mais rápidos que a velocidade de fase (v_ϕ) da onda. (b) Distribuição não maxwelliana dos elétrons ("bump on tail"), resultante do amortecimento da onda 90
4.14 Espectro dinâmico da explosão solar não classificada observada em 15 de junho de 1991 94
5.1 Diagrama de blocos do espectrógrafo decimétrico (200 - 2500) MHz, que operará nas polarizações (R) e (L), com um alimentador de banda larga, constituído de duas antenas log-periódicas cruzadas 102

5.2 Diagrama de blocos representando o sistema com baixa resolução e alta sensibilidade (BRAS), para freqüências $\geq$ 500 MHz 103
A.1 Corte longitudinal do desenho da câmera filmadora desenvolvida no INPE mostrando o acionador (motor) da câmera (1) 113
A.2 Corte transversal do desenho da câmera filmadora desenvolvida no INPE mostrando: o sistema guia do filme (2); a caixa dos filmes (3); o compressor do filme (4); a caixa da câmera (5) e a lente objetiva de 50 mm (6) 114
C.1 Diagrama da placa do circuito de amplificação e interface entre o sistema receptor e a placa digitalizadora 134
E.1 Diagrama do circuito temporizador desenvolvido no INPE 135

LISTA DE TABELAS

Pág.

1.1 Escalas de altura para absorção da radiação decimétrica ($\leq$ 500 MHz) 14
1.2 Radiotelescópios decimétricos em operação 16
2.1 Valores de HPBW para as polarizações horizontal e vertical, nas freqüências de 1550, 1600 e 1650 MHz 23
2.2 Medidas de diretividade (D) e ganho (G) do alimentador, nas freqüências 1550, 1600 e 1650 MHz 32
2.3 Comprimento e atenuação dos cabos usados 37
2.4 Relação entre velocidade do filme e tempo de varredura 44
2.5 Valores de sensibilidade (S_{min}) obtidos para alguns valores de resolução em freqüência (Δf), tempo de varredura (ΔT) e banda de freqüência de observação (f) 57
3.1 Resumo das observações solares realizadas entre março de 1991 e janeiro de 1992 64
4.1 Contexto atual dos estudos de explosões solares decimétricas 73
4.2 Valores de densidade de elétrons (N_e), freqüência de plasma (f_p) e altitude heliocêntrica (h) obtidos pelo modelo de Cilliè e Menzel 83
5.1 Parâmetros observacionais obtidos das explosões tipo III–dm analisadas 98
5.2 Parâmetros estimados 99
F.1 Explosões solares selecionadas para a análise preliminar 131

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Amplitude, dB
A_{ef}	- Área efetiva da antena parabólica, m^2
A_f	- Área fisica da antena, m^2
An	- Amplitude normalizada da figura de radiação da antena
B	- Largura de banda do filtro, Hz
c	- Velocidade da luz no vácuo, ($\simeq 3 \times 10^8$ m/s)
C	- Capacitância, C
d	- Resolução espacial do filme, mm
d	- Diâmetro da antena, m
d/dt	- Diferencial
df/dt	- Taxa de deriva em freqüência ("drift rate"), Hz/s
ds	- Elemento de área
D	- Diretividade da antena, adimensional
E	- Energia, erg ou eV
ε	- Eficiência da antena, %
f	- Freqüência ou Banda de freqüência, Hz
f_c	- Freqüência central, Hz
f_p	- Freqüência de plasma, Hz
f	- Distância focal da lente utilizada na câmera filmadora, mm
FR	- Figura de Ruído do amplificador, dB
G	- Ganho, dB
h	- Altitude heliocêntrica, $R_\odot$ ($1\ R_\odot \simeq 7 \times 10^8$ m)
H	- Escala de altura, m
k	- Constante de Boltzmann, ($1{,}38 \times 10^{-23}$ Ws/K)
$\mathcal{K}$	- Fator de correção da antena, adimensional
m	- Massa, g
N	- Densidade numérica de partículas, cm^{-3}
$\mathcal{N}$	- Número de elétrons do feixe
P	- Potência, W
r	- Raio da antena, m ou elemento do sistema de coordenadas esféricas (r,θ,ϕ), graus ou minutos de arco
R	- Resistência elétrica, Ω
$\mathcal{R}$	- Distância Sol–Terra, UA (1 UA $\simeq 1{,}496 \times 10^{11}$ m)
$R_\odot$	- Raio do sol, m
S	- Densidade de fluxo, W/m Hz ou u.f.s
S_{min}	- Sensibilidade (minima intensidade de fluxo detectavel), W/mHz ou u.f.s (1 u.f.s. = 10^{-22} W/m^2 Hz = 10^4 Junsky)
t	- Tempo, s
t_d	- Tempo de descida, s
t_e	- Tempo de subida ou excitação, s
T	- Temperatura, K
τ	- Profundidade ótica, adimensional

v	- Velocidade, m/s
v	- Velocidade do filme, cm/min
V	- Voltagem, V
v_T	- Velocidade térmica dos eletrons, m/s
V_{dm}	- Volume da fonte de explosões tipo III decimétricas, cm^3
v_ϕ	- Velocidade de fase das ondas longitudinais, m/s
X	- Eixo do sistema de coordenadas cartesianas
Y	- Eixo do sistema de coordenadas cartesianas
Z	- Eixo do sistema de coordenadas cartesianas
Z_o	- Impedância, Ω
β	- Índice espectral da emissão girossincrotrônica, adimensional
γ	- Váriavel auxiliar, definida na Equação (2.7) ou raios gama
δ	- Porcentagem de absorção da radiação decimétrica
Δf	- Resolução em freqüência, Hz
Δt	- Resolução temporal, s
ΔT	- Tempo de varredura, s
Δv	- Espalhamento em velocidade do feixe de elétrons, m/s
Δw	- Largura de banda instantânea em freqüência, Hz
θ	- Largura do feixe da antena no plano (definido na Figura 2.9) ou elemento do sistema de coordenadas esféricas (r,θ,ϕ), graus ou minutos de arco
θ_d	- Diâmetro da fonte rádio, minutos de arco
λ	- Comprimento de onda, m
π	- Número Pi ($\simeq$ 3,141592)
ρ	- Coeficiente de reflexão, adimansional
τ	- Constante de tempo ou resolução do sistema, s
ϕ	- Largura do feixe da antena no plano (definido na Figura 2.9) ou elemento do sistema de coordenadas esféricas (r, θ,ϕ), graus ou minutos de arco
Ω_A	- Ângulo sólido do feixe da antena, rad

Índices Inferiores

a	- Índice auxiliar usado nas Equações (2.7) e (2.8)
A	- Relativo à antena
b	- Indice auxiliar usado nas Equações (2.7) e (2.8)
BG	- Relativo ao "background"
corte	- Relativo à freqüência de corte (no espectro de emissão girossincrotrônica)
CEU	- Relativo ao céu
dB	- Quantidade expressa em decibéis
e	- Relativo ao elétron

ef	- Efetivo (a)
f	- Relativo ao feixe de elétrons
F	- Relativo à fonte rádio
in	- Relativo ao sinal de entrada ("input")
l	- Relativo ao elétrons mais lentos do feixe
ll	- Relativo à absorção livre–livre
max	- Relativo à freqüência máxima ou densidade de fluxo máxima (no espectro de emissão girossincrotrônica)
MP	- Relativa à meia potência
o	- Relativo ao ambiente
out	- Relativo ao sinal de saída ("output")
p	- Relativo ao plasma
+	- Relativo ao próton
pico	- Relativo à freqüência de pico (no espectro de emissão girossincrotrônica)
r	- Relativo aos elétrons mais rápidos do feixe
S	- Relativo ao sol
SI	- Relativo ao sistema

LTDA	- Limitada
MHD	- Magnetohidrodinâmico
MI/CE	- Medidas de Interferência / Compatibilidade Eletromagnética
MNRAS	- "Monthly Notices of Royal Astronomy Society"
mo	- Microondas
MTS	- Modo Trânsito Solar
N	- Norte
NASA	- "National Aeronautics and Space Administration"
NOAA	- "National Oceanic and Atmospheric Administration"
NS	- Norte–Sul
O	- Oeste
OL	- Oscilador Local
PC	- "Personal Computer"
P&B	- Preto e Branco
PR	- Paraná
Proc.	- "Proceedings"
R	- "Right" (polarização à direita)
RJ	- Rio de Janeiro
ROI	- Rádio Observatório de Itapetinga
S	- Sul
S/A	- Sociedade Anônima
SAB	- Sociedade Astronômica Brasileira
SBPC	- Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência
sem.	- Semestre
SGD	- "Solar Goephysical Data"
SMM	- "Solar Maximum Mission"
SP	- São Paulo
STEP	- "Solar–Terrestrial Energy Program" (Programa de Energia Solar-Terrestre)
TIII	- Explosão solar tipo III
TIII–dm	- Explosão solar tipo III decimétrica
TIIIG	- Grupo (≤ 10) de explosões solares tipo III
TIIIGG	- Grupo (> 10) de explosões solares tipo III
TIII–m	- Explosão solar tipo III metrica
TIII–mo	- Explosão solar tipo III em microondas
TIIIRS	- Explosão solar tipo III "Reverse Slope" (com taxa de deriva de baixas para altas freqüências)
TRC	- Tubo de Raios Catódicos
UA	- Unidade Astronômica (1 UA $\simeq 1{,}496 \times 10^{11}$ m)
u.f.s.	- Unidade de Fluxo Solar ("Solar Flux Unit, s.f.u.")
U.S.A.	- "United States of America" (Estados Unidos da América)
UT	- "Universal Time" (Tempo Universal)
UV	- Ultravioleta
V	- Visível

Vert.	- Vertical
VLA	- "Very Large Array"
VLF	- "Very Low Frequency"
VSWR	- "Voltage Standing Wave Ratio"

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 "FLARES" SOLARES

No dia 1º de setembro de 1859, dois pesquisadores, Carrington e Hudgson, observaram, simultânea, mas independentemente, um grupo de aspectos brilhantes na superfície do sol, tratava-se do primeiro "flare" solar observado em luz branca. Ambos publicaram a descoberta no "Monthly Notices Royal Astronomy Society" (MNRAS), (Hudgson, 1860 e Carrington, 1860; citados por Hudson, 1987 e Zirin, 1988, p.343).

Um "flare" solar pode ser definido, segundo Hudson (1987), como **"uma perturbação transitória que ocorre na atmosfera solar"**, no entanto, tal definição é, em certo ponto, vaga e ambígua se consideradas as escalas tempo e espaço envolvidas. De acordo com a definição de Zirin (1988, p.347), **"um 'flare' solar é um crescimento transitório na brilhância em H α, com intensidade, no mínimo, duas vezes maior que a intensidade cromosférica, geralmente impulsivo e acompanhado de algum crescimento em raios-X e fluxo rádio"**.

Os "flares" solares são fenômenos explosivos que liberam energia total da ordem de (10^{26} - 10^{32} ergs), na forma de radiação eletromagnética (EM), num grande intervalo de comprimentos de onda, desde raios-γ (da ordem de Å), até ondas de rádio (chegando a km), liberando ainda partículas carregadas (elétrons e prótons). Produzem violentos fenômenos magnetohidrodinâmicos (MHD), tais como ondas de choque e ejeção de matéria ($\simeq 10^{13}$ kg) e englobam desde efeitos fotosféricos até aqueles causados na atmosfera terrestre e em escalas de tempo que vão desde sub-segundos à horas (Brown et al., 1981).

Um esquema reunindo os vários tipos de radiação emitida durante um "flare" solar é dado na Figura 1.1, enquanto que a Figura 1.2 mostra as explosões solares observadas em ondas de rádio (10 - 30000 MHz), na qual foram incluídas "estruturas finas" tipo "spikes" e "blips". O termo estrutura fina em tempo e/ou em freqüência é usado para explosões solares que apresentam, respectivamente, uma banda estreita em freqüência ($\Delta f/f < 0{,}1$) e curta duração ($t \leq 1$ s); alguns autores levam também em consideração o intervalo de temperatura de brilhância (10^8 - 10^{15} K) da explosão.

Durante um "flare" solar ocorre aceleração de elétrons no topo (Holman, 1985), ou dentro dos "loops" magnéticos (Anastasiadis e Vlahos, 1991), nas chamadas **regiões de aceleração**.

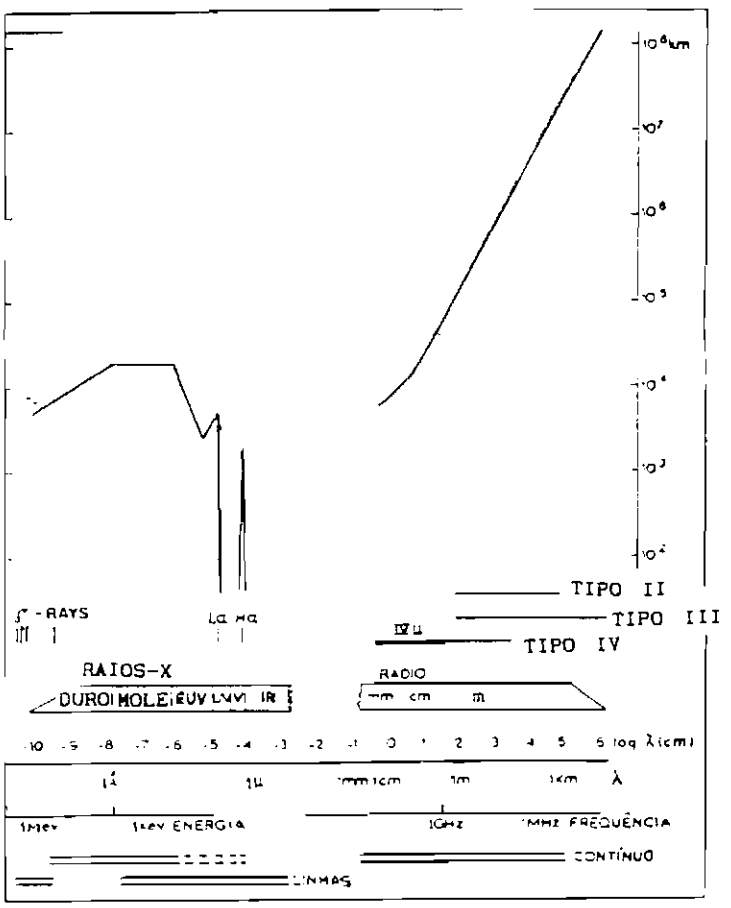

Fig. 1.1 - Esquema com os diferentes tipos de radiação eletromagnética emitidos durante os "flares" solares. Os comprimentos de onda nos quais os diferentes tipos de explosões rádio são observados estão indicados à direita. A escala vertical indica as alturas acima da cromosfera solar. São mostradas ainda as escalas em comprimentos de onda (log λ), em freqüência (para ondas de rádio) e em energia (para raios–γ e raios–X).
FONTE: Adaptada de Svestka (1976), p.2.

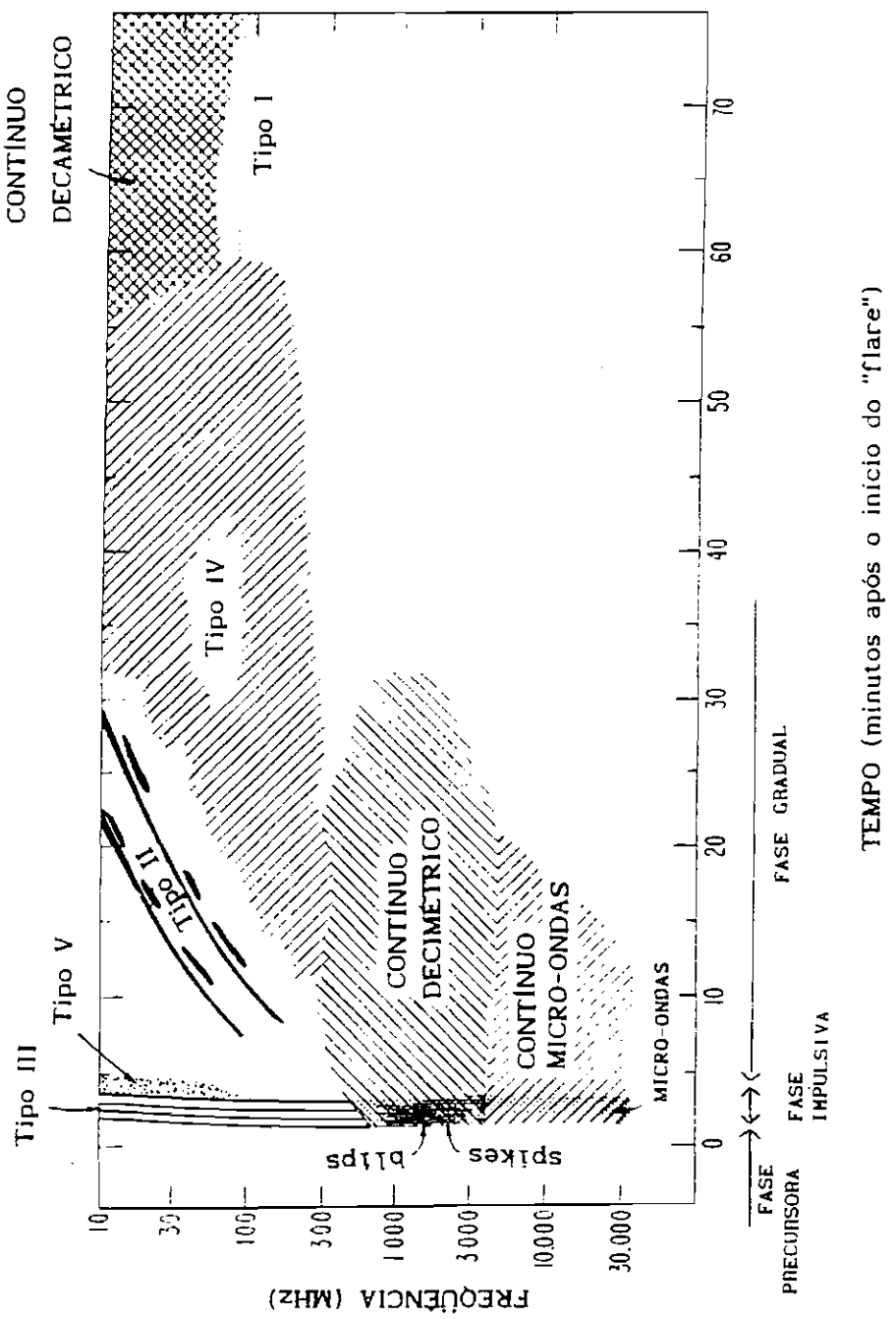

Fig. 1.2 - Representação dos diferentes tipos de explosões solares observadas na faixa de rádio freqüências (10 – 30000 MHz).
FONTE: Adaptada do "Solar Geophysical Data" (SGD) (1986), p.28, onde foram incluídas as fases (precurora, impulsiva e gradual) do "flare" e estruturas finas tipo "blips" e "spikes".

Uma parcela dos elétrons acelerados, de energias da ordem de 200 keV, entra nos "loops" e fica aprisionada, sendo forçada pelo campo magnético a seguir trajetórias (órbitas) helicoidais ao redor das linhas de campo. Devido à aceleração centrífuga sofrida na rotação, os elétrons emitem radiação eletromagnética não coerente, nas freqüências harmônicas da freqüência de giro, através do mecanismo girossincrotrônico, dando origem às explosões em microondas (Kundu, 1965, p.42).

Por outro lado, um certo número destes elétrons, com energias $\simeq$ 30 keV, escapam e viajam ao longo das linhas abertas do campo magnético, ou em direção à alta coroa, ou rumo à cromosfera. A interação destes elétrons com o plasma da atmosfera solar gera, respectivamente, as explosões métricas e decimétricas (Dulk, 1985), (Figura 1.3).

Os raios-X duros são emitidos pelo mecanismo Bremsstrahlung (Rybicki e Ligthman, 1979 p.382 e Melrose, 1985b), quando os feixes de elétrons precipitam para os pés do "loop" na baixa cromosfera solar e encontram densidades mais altas ($\geq 10^{11}$ cm^{-3}), (Brown et al., 1981 p.214; Zirin, 1988 p.370), onde o alvo é colisionalmente espesso e absorve totalmente a energia dos elétrons do feixe em, aproximadamente, um livre caminho médio, segundo o modelo "thick-target" (Hudson, 1972).

1.2 EXPLOSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS

Na faixa de freqüências decimétricas (1000-3000 MHz) são possivelmente observados basicamente dois tipos de emissões: emissão de plasma e emissão em microondas.

As principais características das emissões contínuas em microondas, causadas pelo processo girossincrotrônico estão resumidas a seguir (Stähli e Benz, 1987):

1) faixa de freqüência: 1-90 GHz;

2) duração: varia de $\sim$ 10 ms a $\sim$ 10 min;

3) temperatura de brilhância: 10^7 - 10^{10} K (fase impulsiva) e 10^{10} - 10^{12} K (fase gradual);

4) densidade de fluxo: 0,1 a 10^4 u.f.s. (1 u.f.s. = 10^{-22} W/m^2 Hz);

5) polarização: 0 a 100 % de polarização circular;

6) não apresentam taxa de deriva em freqüência e

7) energia dos elétrons: 200 keV a 1 MeV.

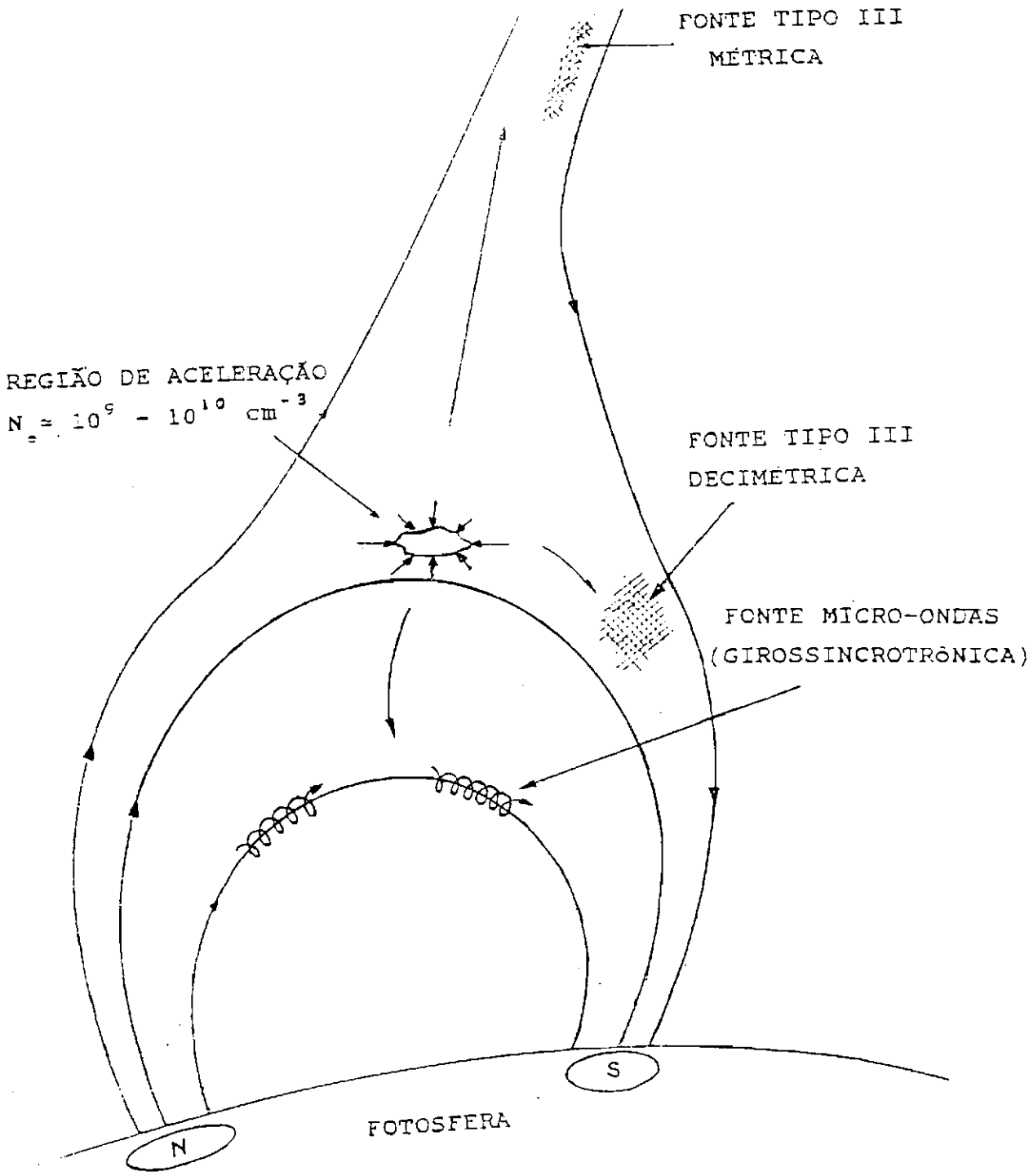

Fig. 1.3 - "Cenário" de um "flare" solar, onde são mostradas a região de aceleração e as fontes de microondas e emissão de plasma (tipo III métricas e decimétricas).
FONTE: Adaptada de Trevisan (1991), p.45.

Um exemplo de espectro de emissão girossincrotrônica é dado na Figura 1.4, que mostra a freqüência de corte (f_{corte}), devido ao efeito Razin (Rybicki e Ligthman, 1979, p.234), a freqüência de pico (f_{pico}), que depende do campo magnético, a freqüência máxima (f_{max}) e os índices espectrais, para a parte oticamente espessa ($\beta > 0$) e oticamente fina ($\beta < 0$).

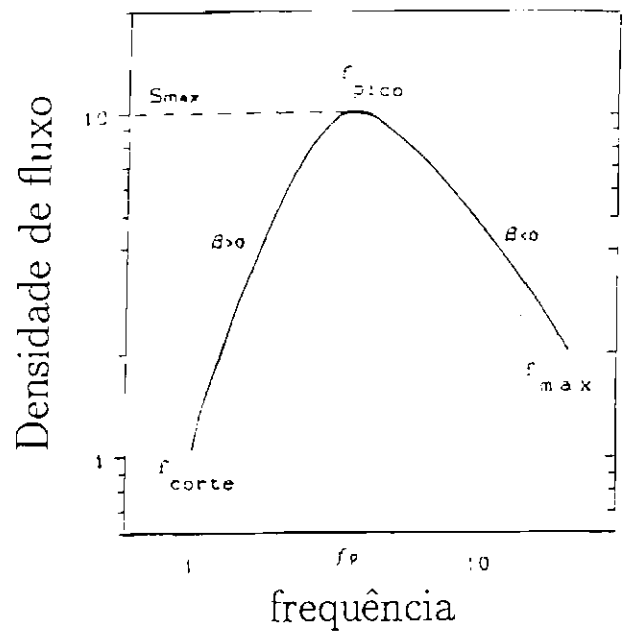

Fig. 1.4 - Espectro típico de emissão em microondas (girossincrotrônica), mostrando a freqüência de corte (f_{corte}), devido ao efeito Razin, a freqüência de pico (f_{pico}), que depende da intensidade do campo magnético, a freqüência máxima (f_{max}) e os índices espectrais para as partes oticamente espessa ($\beta > 0$) e oticamente fina ($\beta < 0$) do espectro.
FONTE: Adaptada de Rosa (1992), p.3.

As primeiras explosões solares observadas na faixa decimétrica datam da década de 60 (Young et al., 1961), no intervalo de freqüência de 500–950 MHz, com resolução temporal de 200 ms e resolução em freqüência de 500 kHz.

Kundu et al. (1961) obtiveram espectros dinâmicos de explosões solares na faixa métrica e decimétrica (entre 500 e 1000 MHz), que apresentavam alta taxa de deriva ("drift rate") em freqüência. Estudos das características espectrais, baseados nestas observações, foram feitos por Kundu e Spencer (1963) e Kundu (1965). No entanto, o primeiro receptor decimétrico (565–1000 MHz) de varredura em freqüência foi construído apenas em 1972 (Gotwols e Phipps, 1972).

Dröge (1977) publicou um levantamento de estruturas finas com duração de 1 a 10 ms, observadas entre 200 e 1400 MHz, com um espectrômetro multicanal e afirmou, no entanto, que as observações ainda eram insuficientes ou então, não preenchiam os requisitos necessários para a detecção de tais estruturas finas:

1) observações cobrindo uma banda larga de freqüência;

2) resolução temporal de sub–segundo;

3) resolução espectral da ordem de MHz e

4) alta sensibilidade.

Güdel e Benz (1988) apresentaram um catálogo contendo explosões solares observadas entre 1979 e 1987, com o espectrômetro digital ETH, de Zurich, na banda de 300–1000 MHz, com resolução temporal de 0,5 a 250 ms e resolução em freqüência $\geq$ 1 MHz, sendo a configuração usada mais frequentemente aquela com 100 ms e 3 MHz.

As explosões decimétricas podem apresentar vários tipos de estruturas finas em tempo e/ou em freqüência, tais como "hands", "dots", "fringe fenomena", "tartan structures", etc. (Allaart et al., 1990), mas as mais importantes são as explosões tipo III decimétricas e suas variantes e os "blips", observados pela primeira vez por Benz et al. (1981) e Benz et al. (1983), na faixa de (600–1000) MHz, com curta duração ($\leq$ 300 ms) e largura de banda estreita e, na faixa de freqüência de 1600 MHz, por Sawant et al. (1987) e Sawant et al. (1990) e por Allaart et al. (1990), até 4000 MHz. Os "spikes" foram observados pelos mesmos grupos citados acima, nas mesmas faixas de freqüência e ainda por Tarnstrom e Philip (1972a,b), Benz (1986a), Benz e Güdel (1987), Güdel e Benz (1990) e Benz et al. (1991).

As principais características das explosões tipo III decimétricas (tipo III–dm) e das estruturas finas tipo "blips" e "spikes" são dadas a seguir.

1) Explosões do tipo III–dm (Wiehl et al., 1985):
   a) faixa de freqüência: 100–1000 MHz;
   b) largura de banda instantânea: $\sim$ 480 MHz;
   c) duração: $<$ 1 s;
   d) temperatura de brilhância: 10^9 - 10^{10} K;
   e) polarização: $\sim$ 50 a 100 % (polarização circular);
   f) taxa de deriva em freqüência: $\geq$ 2000 MHz/s e
   g) velocidade do feixe de elétrons responsável pela emissão: $\simeq$ 0,3 c.

2) Explosões tipo "blips" (Benz et al., 1981; Benz et al., 1983; Sawant et al., 1980; Sawant et al., 1986; Allaart et al., 1990):

   a) faixa de freqüência: acima de 500 MHz (até 8000 MHz);

   b) largura de banda instantânea: $\sim$ 0,2 % da freqüência de observação;

   c) duração: varia com a freqüência de observação: tempo de subida $\sim$ 25 % menor que o tempo de decaimento e tempo de descida $\sim$ 100 ms (60 - 1000 MHz);

   d) polarização: fraca (10 a 30 %);

   e) taxa de deriva em freqüência: $\sim$ 400 MHz/s (geralmente positiva, de baixa para alta freqüência, cerca de 10 % dos "blips" apresentam taxa de deriva negativa) e

   f) associação com raios–X duros em $\sim$ 40 % dos casos.

3) Explosões tipo "spikes" (Tarnstrom e Philip, 1972a,b; Benz, 1986a; Benz e Güdel, 1987; Güdel e Benz, 1988; Güdel e Benz, 1990; Bruggmann et al., 1990; Mckean et al., 1990; Benz et al., 1991):

   a) faixa de freqüência: 300–7000 MHz;

   b) largura de banda instantânea: $< 0{,}01$

   c) duração: 3 a 100 ms; tempo de subida: $\leq$ 3 ms (limite da resolução temporal instrumental);

   d) temperatura de brilhância: $> 10^{15}$ K;

   e) densidade de fluxo: 1 a 10^4 u.f.s.;

   f) polarização: 0 a 100 %;

   g) taxa de deriva em freqüência: geralmente negativa e muito altas (até $\sim$ GHz/s) e

   h) associação com explosões tipo III métricas.

Um exemplo de explosão tipo III decimétrica (350–1000 MHz) é dado na Figura 1.5. Até a elaboração desta dissertação, o único espectro dinâmico obtido para uma explosão tipo III, acima de 1000 MHz, foi apresentado por Benz et al. (1991). A Figura 1.6 mostra exemplos de "blips" e um exemplo de "spikes" é dado na Figura 1.7.

Levando em consideração as semelhanças entre "blips" e explosões tipo III decimétricas e entre ambas e as explosões tipo III métricas, no que diz respeito à taxa de deriva em freqüência, escalas de tempo, largura de banda e polarização, Stähli e Benz (1987) sugeriram que a emissão para estes fenômenos é causada por um único mecanismo: **emissão de plasma**.

Fig. 1.5 - Espectro dinâmico de uma explosão tipo III decimétrica, observada em 27 de junho de 1981.
FONTE: Wiehl et al. (1985), p.173.

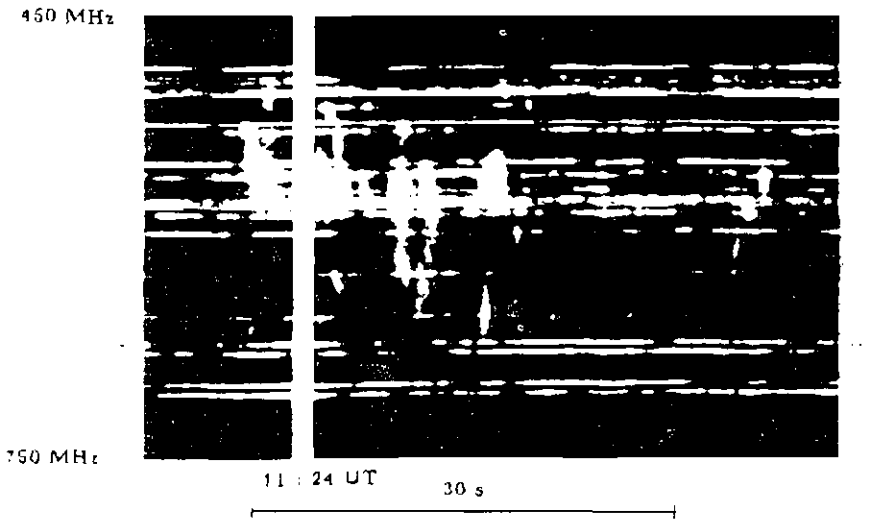

Fig. 1.6 - Espectro dinâmico de uma explosão tipo "blip".
FONTE: Wiehl et al. (1985), p.170.

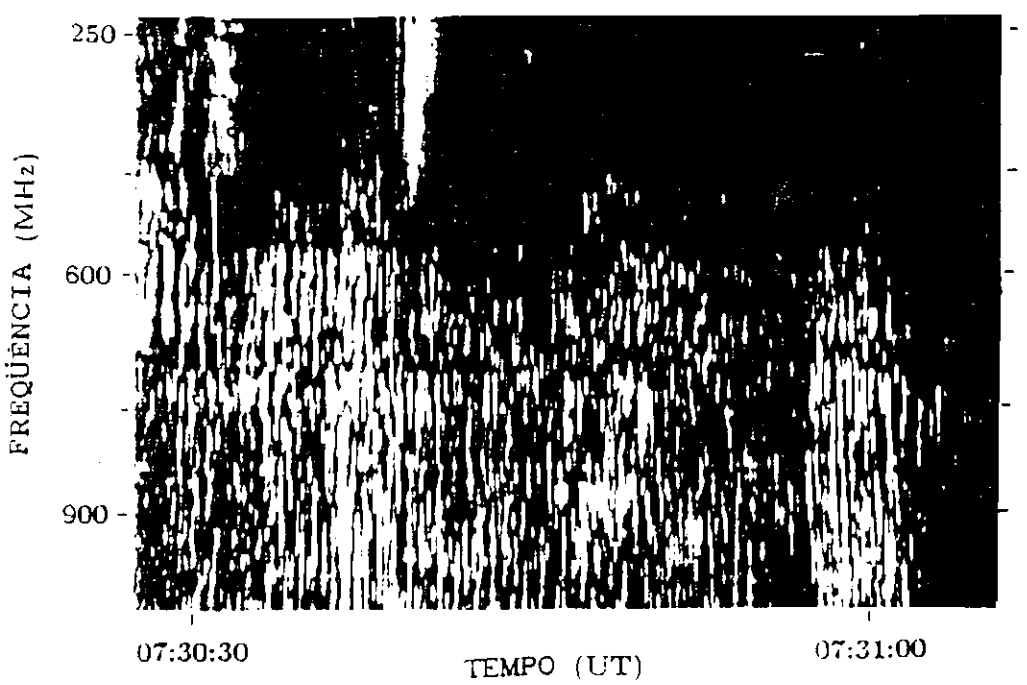

Fig. 1.7 - Exemplo de explosões tipo "spikes".
FONTE: Benz (1986a), p.103.

A hipótese apresentada por Stähli e Benz (1987), foi reforçada por Sawant et al. (1987) que observaram "blips" na freqüência fixa de 1663 MHz, com resolução temporal de 3 ms e sensibilidade de 0,08 u.f.s.. A duração típica observada foi de $\sim$ 350 ms, sugerindo que os "blips" são provavelmente gerados pelo segundo harmônico da interação do feixe de elétrons com o plasma.

1.3 EMISSÃO DE PLASMA

As emissões de plasma responsáveis pelas explosões solares tipo III e variantes, são causadas por elétrons de baixa energia ($\leq$ 50 keV), que são acelerados (regiões de aceleração: $N_e \simeq 10^9 - 10^{10}$ cm^{-3}) e viajam na cromosfera solar, ao longo das linhas abertas do campo magnético, com velocidade $\sim$ 0,3 c (onde c é a velocidade da luz no vácuo), (Dulk, 1985). Estes feixes de elétrons interagem com o plasma ambiente gerando oscilações, que recebem o nome de ondas de Langmuir.[1]

Devido a efeitos não lineares, estas ondas são amplificadas e, por sua vez, cedem energia aos elétrons menos energéticos, ou seja, mais lentos, que chegam depois dos elétrons de alta energia, dentro do mesmo feixe (espalhamento em velocidade do feixe). Este círculo vicioso (transferência de energia dos elétrons para as ondas e vice-versa) é responsável para que o feixe percorra grandes distâncias na atmosfera solar, solucionando o "dilema de Sturrock", no qual um feixe de elétrons que tranferisse sua energia para o plasma, não percorreria mais do que $\sim$ 1 km dentro da atmosfera solar (Sturrock, 1964).

As ondas de Langmuir podem sofrer então dois tipos de efeitos: ou são espalhadas por íons térmicos e/ou por ondas de baixa freqüência (e.g. ondas de Álfven e ondas acusto-iônicas) em ondas transversais, dando origem à radiação numa freqüência igual a do plasma ambiente ou, então, sofrem coalescência com ondas de Langmuir de sentido contrário, gerando ondas tranversais no segundo harmônico.

Este mecanismo, mostrado no diagrama da Figura 1.8, é o mesmo para explicar as explosões métricas e decimétricas (Dulk, 1985), no entanto, é a localização em determinada altura da atmosfera solar (determinada densidade) que determina a freqüência da emissão.

[1]Quando são consideradas perturbações atuando num plasma, como é o caso do feixe de elétrons energéticos interagindo com o meio ambiente coronal, tem-se que os elétrons do plasma são deslocados do seu equilíbrio em relação aos íons, que permanecem praticamente estacionários devido à inércia. Este deslocamento gera uma diferença de potencial, que, por sua vez, gera campos elétricos restauradores, que tendem a recolocar os elétrons novamente na posição de equilíbrio original, no entanto, os elétrons, por causa do impulso inicial dos campos restauradores, passam do ponto de equilíbrio. O resultado é um movimento oscilatório, em torno da posição de equilíbrio, que recebe o nome de oscilação de plasma ou ondas de Langmuir, cuja freqüência de oscilação é chamada de "freqüência de plasma" e depende apenas da densidade do plasma ambiente, (Chen, 1983, p.82).

A principal evidência a favor deste mecanisnmo de emissão de plasma, como sendo responsável pelas explosões tipo III, é a presença de taxa de deriva em freqüência, mostrando que existe um deslocamento da fonte emissora (feixe de elétrons), através da atmosfera solar.

1.4 ABSORÇÃO DAS ONDAS DECIMÉTRICAS

A absorção das ondas transversais, tanto no estado fundamental, quanto no segundo harmônico, incluindo as ondas decimétricas, ocorre, para baixas temperaturas, devido ao mecanismo de absorção livre–livre (ll) (Dulk, 1985), no qual um elétron é espalhado ao passar pelo potencial de um próton e a energia eletromagnética do campo é transformada em energia cinética para o elétron.

A profundidade ótica (τ), para a interação livre–livre de uma radiação eletromagnética na freqüência fundamental é dada por (Dulk, 1985, citado por Lattari, 1989):

$$\tau = 1,5 \times 10^{-17} T^{-3/2} f^2 H , \tag{1.1}$$

onde T é a temperatura da coroa, em K; f é a freqüência no estado fundamental, em Hz e H é a escala de altura, em cm.

Para a emissão no segundo harmônico, o valor da profundidade ótica é cerca de 16 vezes menor (Dulk, 1985, citado por Lattari, 1989).

Tal mecanismo absorveria toda a emissão decimétrica ($\geq$ 500 MHz), se a atmosfera fosse homogênia, no entanto, como a radiação está sendo detectada, deve–se concluir que a atmosfera não é homogênia.

Considerando inomogeneidades em densidade da ordem de 100 km, Stähli e Benz (1987) obtiveram que a emissão fundamental é fortemente absorvida para freqüências maiores que 1000 MHz, contudo, no segundo harmônico, ela pode ser observada até aproximadamente 6000 MHz, como mostra a Tabela 1.1, que fornece as escalas de altura (H) correspondentes à profundidade ótica unitária, no estado fundamental e no segundo harmônico, para diferentes freqüências e uma temperatura da coroa da ordem de 5 x 10^5 K.

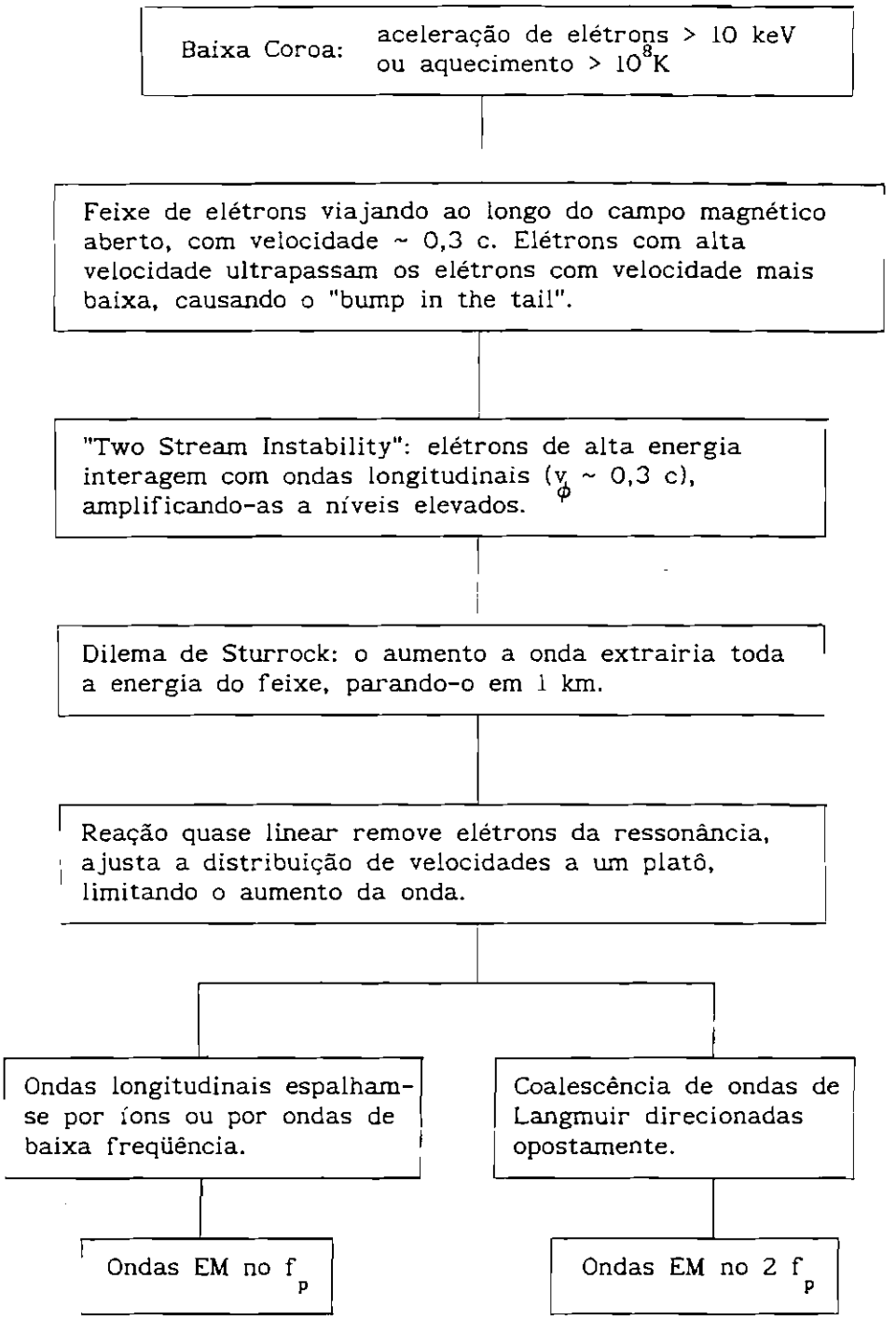

Fig. 1.8 - Diagrama de blocos representando as várias etapas do processo de emissão de plasma.
FONTE: Adaptada de Melrose (1985a), p.182.

TABELA 1.1 - ESCALAS DE ALTURA PARA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO DECIMÉTRICA ($\leq$ 500 MHz)

Freqüência (MHz)	Escala de altura (km) Estado Fundamental	Segundo Harmônico
500	950	15200
1000	240	3700
1600	**130**	**725**
3500	18	310
5200	9	140

FONTE: Adaptada de Stähli e Benz (1987), p.275.

1.5 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO

O interesse nas observações solares em ondas decimétricas só ganhou realmente importância com as observações do SKYLAB (Sturrock, 1980), que mostraram uma associação entre as explosões solares observadas em raios–X moles com determinadas regiões da atmosfera solar ($\geq$ 2 x 10^4 km acima da fotosfera), correspondentes à densidades da ordem de 10^9 - 10^{10} cm^{-3}, evidenciando que a liberação de energia das partículas durante o "flare" ocorre próxima às regiões onde são geradas as explosões decimétricas (Moore et. al., 1980).

Tais evidências observacionais do SKYLAB motivaram, desde então, a realização de quatro "workshops", promovidos pelo CESRA ("Committee of European Solar Radio Astronomers"), cuja principal finalidade foi discutir a importância das observações solares em ondas decimétricas:

1) "Radio continua during solar flares", Duino, Italy, May 1985 (Benz, 1986b);

2) "Particle acceleration and trapping in solar flares", Aubigny–sur–Mère (Bourges), France, June 23–26, 1986 (Trottet and Pick, 1987);

3) "Particle beams in the solar atmosphere", Braunwald, Switzerland, August 21–25, 1989 (Benz and Magun, 1990).

4) "Fragmentation of energy release and radio emission from solar, stellar and magnetospheric plasmas", Ouranoupolis – Kalkidiki, Greece, June 3–7, 1990.

Tais encontros tiveram como principal resolução a importância fundamental das observações de estruturas finas das explosões solares, na faixa decimétrica, para o estudo dos processos de aceleração das partículas, processos de liberação de energia dos "flares" solares e para o desenvolvimento de teorias de plasma baseadas em processos não lineares de interação dos feixes de partículas com o plasma ambiente.

É principalmente por isso que na última década, cada vez mais, tem-se tentado aumentar (melhorar) as resoluções temporal e espectral e a sensibilidade dos instrumentos de observação solar na faixa decimétrica, com o intuito de melhorar a resolução da instrumentação para observação das estruturas finas de curta duração (< 1 s) e de banda estreita, da ordem de MHz, que ocorrem nas explosões solares acima de 500 MHz.

A Tabela 1.2 mostra os telescópios decimétricos, para observação solar, atualmente em operação, incluindo o espectrógrafo decimétrico de AS–RTF, onde pode ser notada a escassez de observações na faixa de freqüência entre 1000 e 3000 MHz, com alta sensibilidade (< 1 u.f.s.) e alta resolução temporal (sub–segundo).

É justamente este redirecionamento das observações solares provocado pelas evidências do SKYLAB e a deficiência de observações solares entre 1000 e 3000 MHz, que motivaram o desenvolvimento do espectrógrafo decimétrico (1600 $\pm$ 100) MHz solar de AS–RTF, (Sawant e Rosa, 1990; Sawant et al., 1991, Sawant et al., 1992), em operação em São José dos Campos. A principal finalidade deste espectrógrafo é evidenciar explosões solares decimétricas, em particular, explosões tipo III–dm, "blips" e "spikes", de forma a contribuir para um melhor entendimento dos processos de aceleração dos elétrons responsáveis pela emissão e da localização das regiões de aceleração destes elétrons emissores, na atmosfera solar.

TABELA 1.2 - RADIOTELESCÓPIOS DECIMÉTRICOS EM OPERAÇÃO

Tipo de Observação	Freqüência (MHz)	Resolução Espectral (MHz)	Resolução Temporal (ms)	Sensibilidade (u.f.s.)	Local
Espectroscópio	10–100 100–500	0,015–0,2 0,2	100 100	220 50	Meudon
Radioheliógrafo	169	–	100		(França)
Espectroscópio	30–1000	0,3	1000	500	Tubinger (Alemanha)
Freqüência Fixa	237 327 408	0,1	25	1	Triestre (Itália)
Espectroscópio	100–4000	0,15–1,5	100	0,5	Zurich
Freqüência Fixa	3700 5800 8300	0,15	100	–	Bern (Suiça)
Espectrógrafo	3000–4000	0,1–5–20	10–350	~ 2 % S_S	
Espectrógrafo Multi–Canal	4000–8000	–	–	–	Dwigeloo (Holanda)
Espectrógrafo	**1600±100**	**0,1–3**	**20–100**	**0,5–2,2**	**S.J.Campos (Brasil)**

1.6 CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR

O autor esteve diretamente envolvido nos seguintes aspectos do desenvolvimento e operação do espectrógrafo decimétrico solar de AS–RTF:

1) Desenvolvimento e observação:
   a) alinhamento, ajuste e focalização do sistema ótico para aquisição do espectro dinâmico através do filme fotográfico;
   b) fixação e alinhamento do sistema de marcação de tempo (circuito temporizador);
   c) procedimentos de calibração em freqüência, intensidade e em tempo do espectro dinâmico;
   d) observações iniciais;
   e) teste das características da antena e cálculo dos parâmetros da antena;
   f) observações solares sistemáticas e participação de campanhas mundiais de observação solar;
   g) procedimentos de revelação/reprodução do filme fotográfico;
   h) teste do programa de aquisição digital e tratamento de dados de explosões solares.
2) Análise preliminar dos dados:
   a) classificação das explosões solares observadas;
   b) determinação das características morfológicas das explosões, a partir dos espectros dinâmicos e da digitalização;
   c) definição da metodologia para análise preliminar das explosões e
   d) interpretação dos resultados.

1.7 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Os vários elementos que constituem a instrumentação completa do espectrógrafo decimétrico de AS–RTF são apresentados no Capítulo 2, bem como as características e os cálculos dos parâmetros da antena e os procedimentos de calibração do sistema.

O Capítulo 3 trata das observações solares realizadas com o espectrógrafo decimétrico entre dezembro de 1990 e janeiro de 1992. As observações iniciais (dez./90 – jan./91) foram feitas no Modo Trânsito Solar (MTS), com a finalidade de testar as características da figura de radiação da antena. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 3.

Nos meses de observações sistemáticas do sol (mar./91 – jan./92), foram registradas no total, 162 grupos de explosões solares, das quais, 129 foram classificadas como emissão de plasma (128 tipo III–dm e variantes e 1 caso não classificado) e 33 como emissão girossincrotrônica. Foram selecionadas para a análise preliminar, apenas as explosões tipo III–dm mais intensas, (44 grupos), com densidades de fluxo maiores do que ~ 10 u.f.s. acima do nível do sol calmo.

A análise preliminar das explosões selecionadas, apresentada no Capítulo 4, foi feita obtendo–se as características morfológicas (duração total, taxa de deriva em freqüência, banda de freqüência de ocorrência) e fluxo, através de seus espectros dinâmicos. A partir destes parâmetros observacionais foi estimada a densidade de elétrons dos feixes emissores, seguindo a metodologia apresentada por Fürst et al. (1982). E para as explosões digitalizadas foram obtidos os perfis temporais (duração total e os tempos de excitação e de descida), a partir dos quais foram determinados a temperatura da coroa, a densidade e o número total de elétrons emissores. Os valores obtidos, são comparados entre si e também com determinações de outros autores.

No Capítulo 5, além da discussão dos resultados, são feitas as considerações finais a cerca do trabalho e apresentados os planos futuros.

CAPÍTULO 2

INSTRUMENTAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O espectrógrafo decimétrico de alta sensibilidade e alta resolução temporal e em freqüência (AS–RTF) é constituído basicamente dos seguintes elementos, representados no diagrama de blocos da Figura 2.1:

1) Antena parabólica de 9 metros de diâmetro.

2) Alimentador tipo dipolo em polarização horizontal, com freqüência central de 1600 MHz.

3) Pré–amplificador (desenvolvido no INPE).

4) Cabos de conexão (RG 213).

5) Receptor - Analisador Espectral (HP8559A).

6) Amplificador DC / Inversor (desenvolvido no INPE).

7) Sistemas de monitoramento e aquisição dos dados:
   a) Registrador de Papel (RB 102 da ECB);
   b) Sistema Ótico:
      Osciloscópio (HP108A);
      Guia de luz (desenvolvido no INPE);
      Câmera Filmadora (desenvolvida no INPE);
      Circuito Temporizador (desenvolvido no INPE).
   c) Sistema Digital:
      Placa/interface entre o receptor e o micro–computador (desenvolvida no INPE);
      Placa Digitalizadora (ADDA–12);
      Micro–computador;
      Programa de digitalização e tratamento de dados (desenvolvido no INPE).

O funcionamento, em linhas gerais, do espectrógrafo decimétrico com AS–RTF será descrito a seguir.

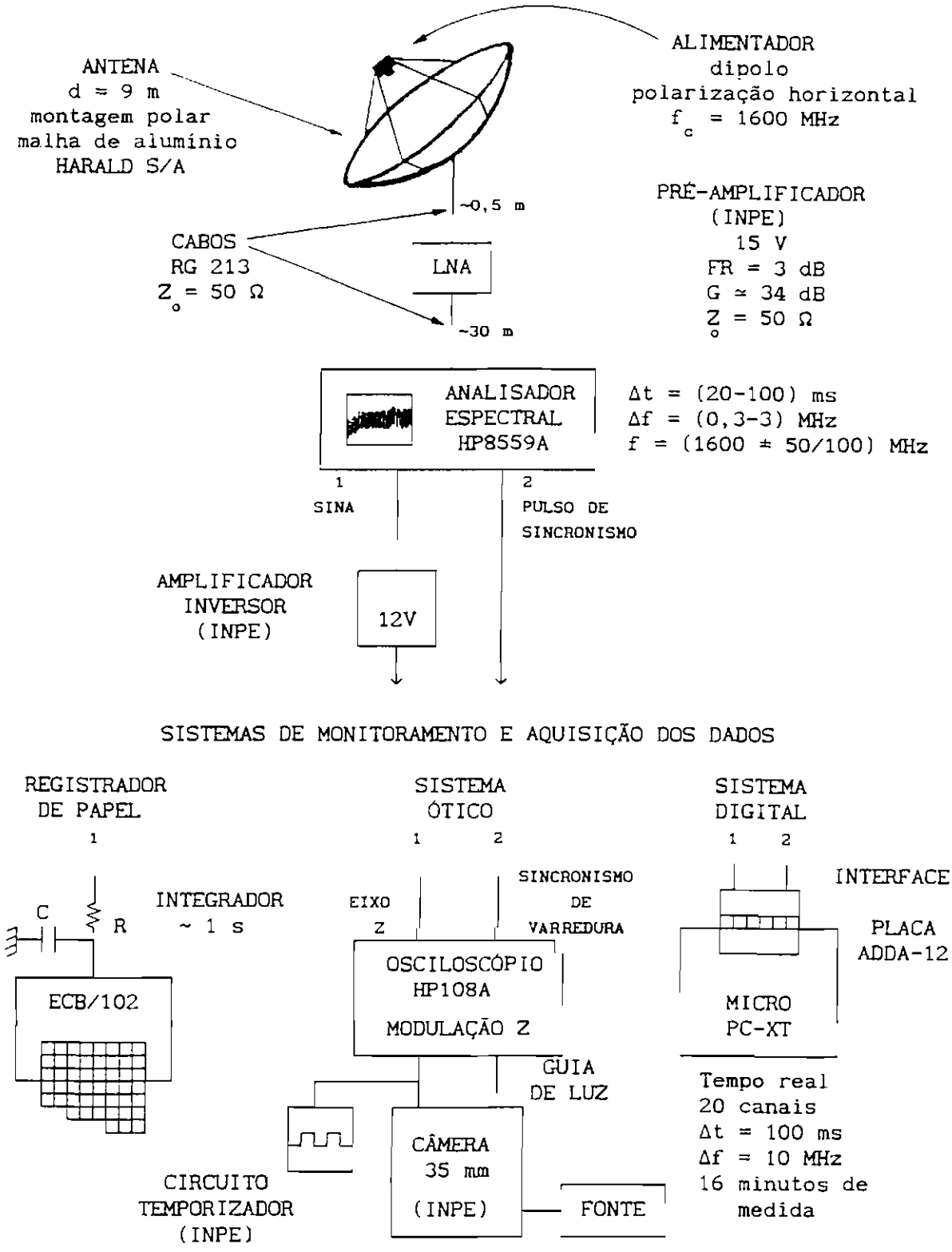

Fig. 2.1 - Diagrama de blocos representando o espectrógrafo decimétrico com AS-RTF.

A emissão rádio (na faixa decimétrica) emitida pela cromosfera solar é coletada através da antena parabólica de 9 metros de diâmetro, em cujo foco se encontra um alimentador do tipo dipolo em polarização horizontal, com freqüência central de 1600 MHz. Na saída do alimentador o sinal passa por um pré-amplificador de baixo ruído e, em seguida, é introduzido em um analisador espectral que faz a varredura do sinal na faixa de freqüência de (1600 $\pm$ Δf) MHz, sendo Δf escolhido entre 50 e 100 MHz, com uma resolução temporal entre 20 e 100 milisegundos e resolução em freqüência de 1 a 3 MHz.

Na saída do analisador espectral, o sinal correspondente ao espectro de potência é adequadamente amplificado para controlar a intensidade (com modulação no eixo Z) de um osciloscópio devidamente sincronizado com o analisador espectral. Acoplada ao osciloscópio, através de um guia de luz, uma câmera filmadora, registra as variações de intensidade de brilho da tela do osciloscópio, num filme preto e branco (P&B) 35 mm, cuja velocidade pode ser alterada, de acordo com a resolução temporal escolhida. Através de um circuito temporizador, a cada um minuto, é feita uma marcação de tempo no espectro dinâmico.

Paralelamente, o sinal é integrado em freqüência (100 ou 200 MHz) e em tempo ($\sim$ 1 seg) e registrado em papel para monitoramento.

O sistema de digitalização permite que os dados referentes a cerca de 16 minutos de medidas sejam também armazenados, em um micro-computador, na forma digital, com 20 canais de freqüência. Apenas com o acionamento de um tecla, estes dados são transferidos para a memória permanente do micro-computador.

Cada elemento do espectrógrafo decimétrico será descrito detalhadamente, nas seções subseqüentes.

2.2 ANTENA

Uma antena pode ser definida como "a região de transição entre uma onda no espaço livre e uma onda guiada, considerando a antena como dispositivo receptor" (Kraus e Carver, 1973, p.568; Kraus, 1966 p.152; Kraus, 1983, p.1 e Roberty, 1987, p.1), como é o caso do espectrógrafo decimétrico.

A antena, instalada na sede do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, SP, é costituída por um refletor parabólico, contruído em malha de alumínio, com montagem polar, fabricado no Brasil pela Harald S/A, Curitiba, PR (Figura 2.2). No foco da antena está localizado um alimentador do tipo dipolo em polarização horizontal, com freqüência central de 1600 MHz.

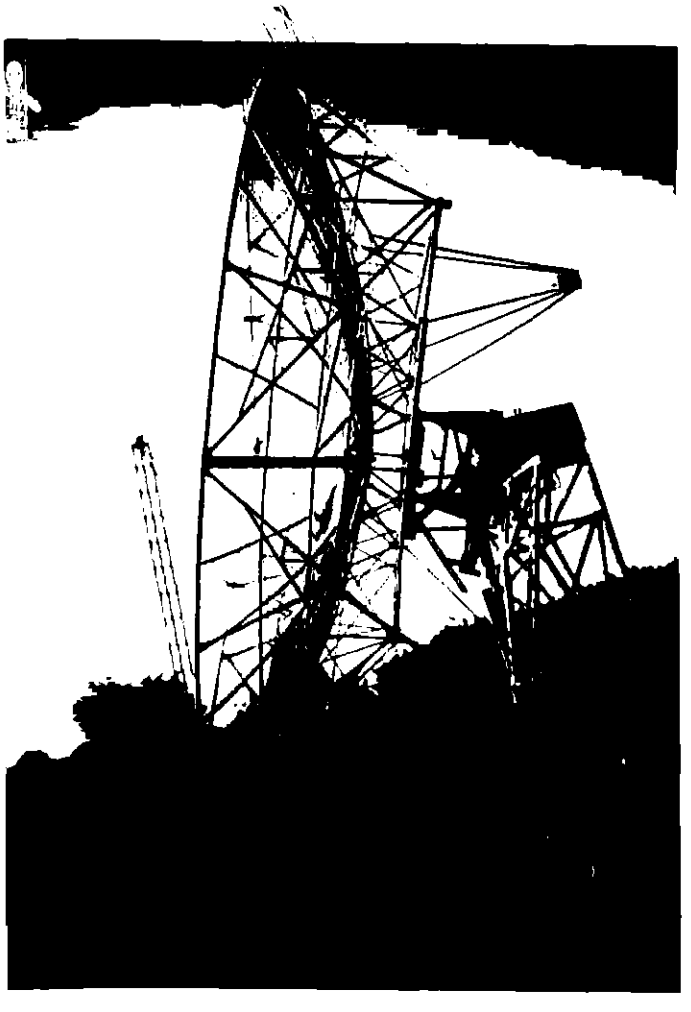

Fig. 2.2 - Refletor parabólico do espectrógrafo decimétrico, com 9 metros de diâmetro e montagem polar, contruído em malha de alumínio.

2.2.1 FIGURA DE RADIAÇÃO

"Uma representação gráfica das propriedades de radiação da antena, em função da distribuição (direção) espacial" á a definição sugerida por Balanis (1982) para a figura de radiação de uma antena, que, geralmente, é tomada em relação a algum sistema de coordenadas.

A figura de radiação muitas vezes é referida como padrão de radiação, figura de potência, ou ainda, diagrama de radiação ou de potência.

Geralmente, a figura de radiação de uma antena é constituída de vários **lobos**. O lobo maior, também chamado de **lobo principal**, é definido como sendo o lobo que contém a direção da máxima radiação; os demais são denominados lobos menores e são divididos em **lobos secundários** ou **laterais** e **lobos traseiros** (Figura 2.3).

Uma característica importante na figura de radiação e que serve de parâmetro de comparação entre antenas, é a largura do feixe (da antena) a meia potência, "Half Power Beam Width" (HPBW), que, por definição, é "o ângulo, no plano contendo a direção da máxima radiação do feixe, entre as duas direções nas quais a intensidade da radiação é metade do valor máximo do feixe" (Balanis, 1982, p.46), ou seja, o ângulo tomado a 3 dB da intensidade máxima. Tal parâmetro está ilustrado na Figura 2.3, que mostra também a largura do feixe entre os primeiros nulos, "First Null Beam Width" (FNBW).

As figuras de radiação (do feixe) da antena, foram fornecidas pela própria Harald, em coordenadas retangulares e em decibéis. Os valores de largura do feixe a meia potência (HPBW), para as freqüências de 1550, 1600 e 1650 MHz, para as polarizações horizontal e vertical, estão na Tabela 2.1 e as respectivas figuras de radiação são mostrados nas Figuras 2.4 e 2.5.

TABELA 2.1 - VALORES DE HPBW PARA AS POLARIZAÇÕES HORIZONTAL E VERTICAL, NAS FREQÜÊNCIAS 1550, 1600 E 1650 MHz

	HPBW (°)	
FREQÜÊNCIA (MHz)	POLARIZAÇÃO Hor.	Vert.
1550	1,40	1,30
1600	1,25	1,50
1650	1,20	1,20

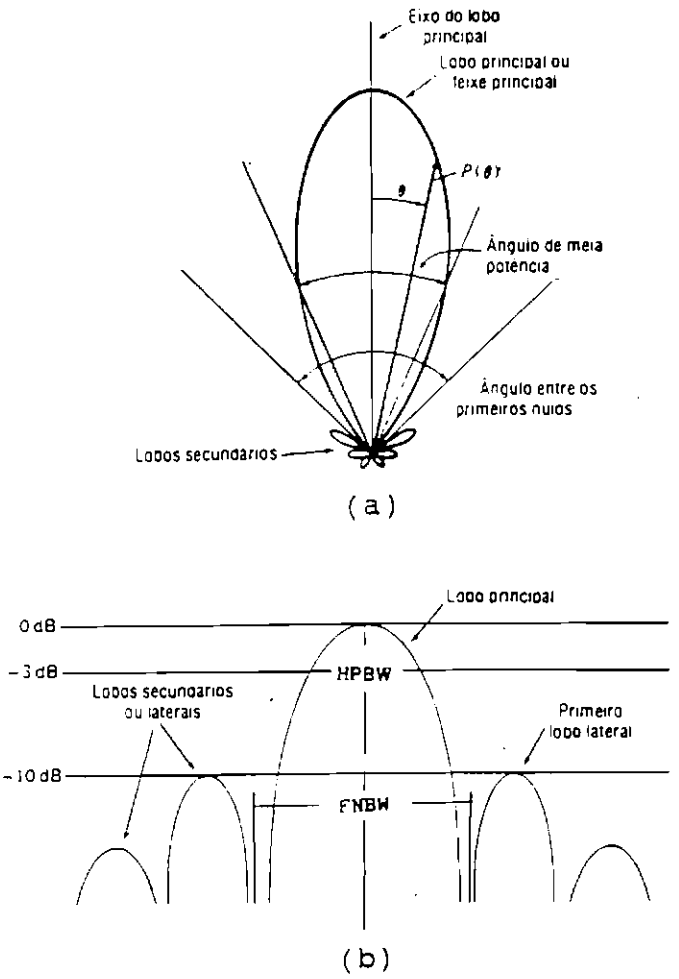

Fig. 2.3 - Figura de radiação de uma antena (a) em coordenadas esféricas e escala linear e (b) em coordenadas retangulares e decibéis.
FONTE: Adaptada de Kraus e Carver (1973), p.570.

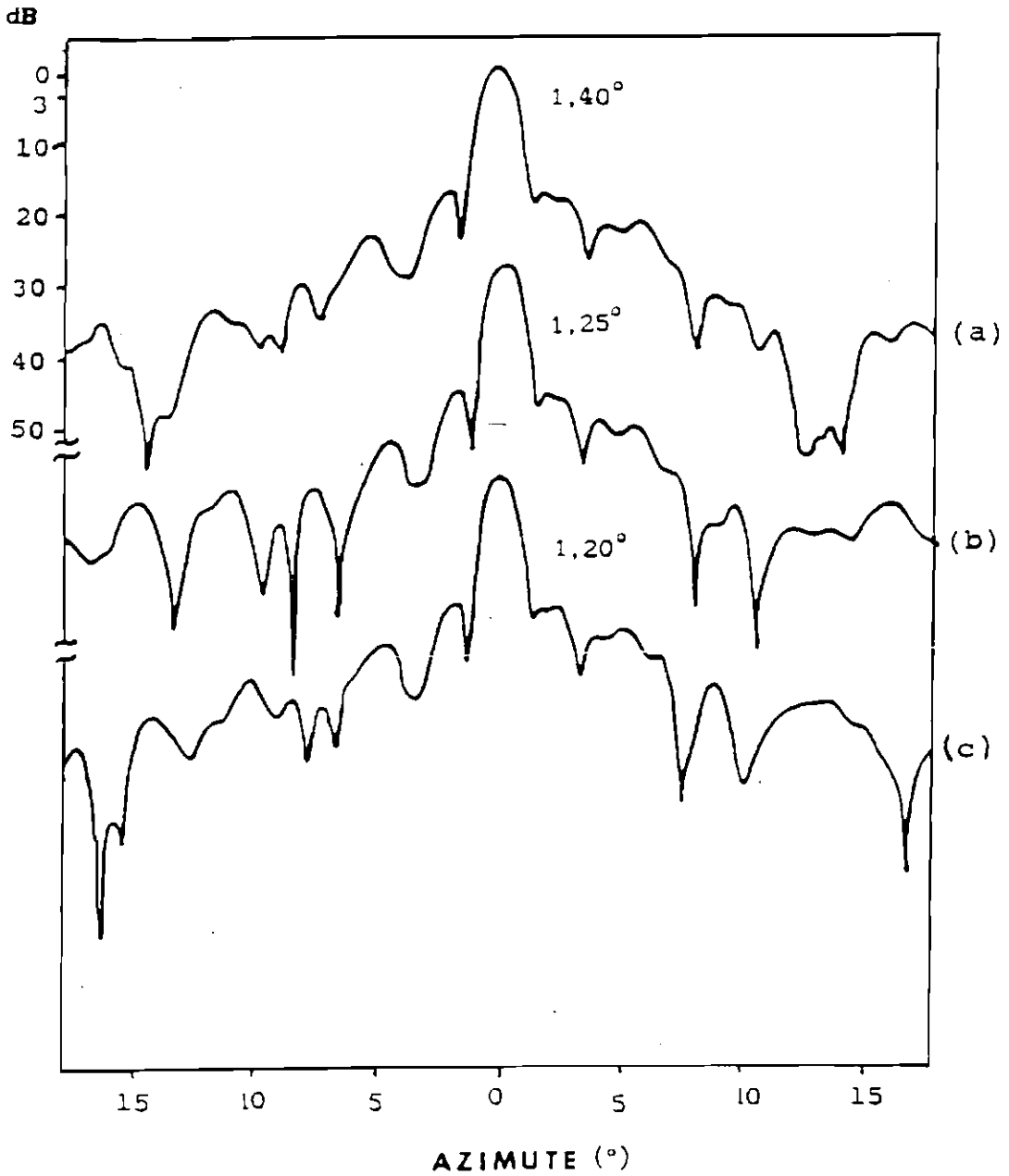

Fig. 2.4 - Figuras de radiação da antena para polarização horizontal: (a) em 1550 MHz, (b) em 1600 MHz e (c) em 1650 MHz. Os respectivos valores da largura do feixe a meia potência também são mostrados.

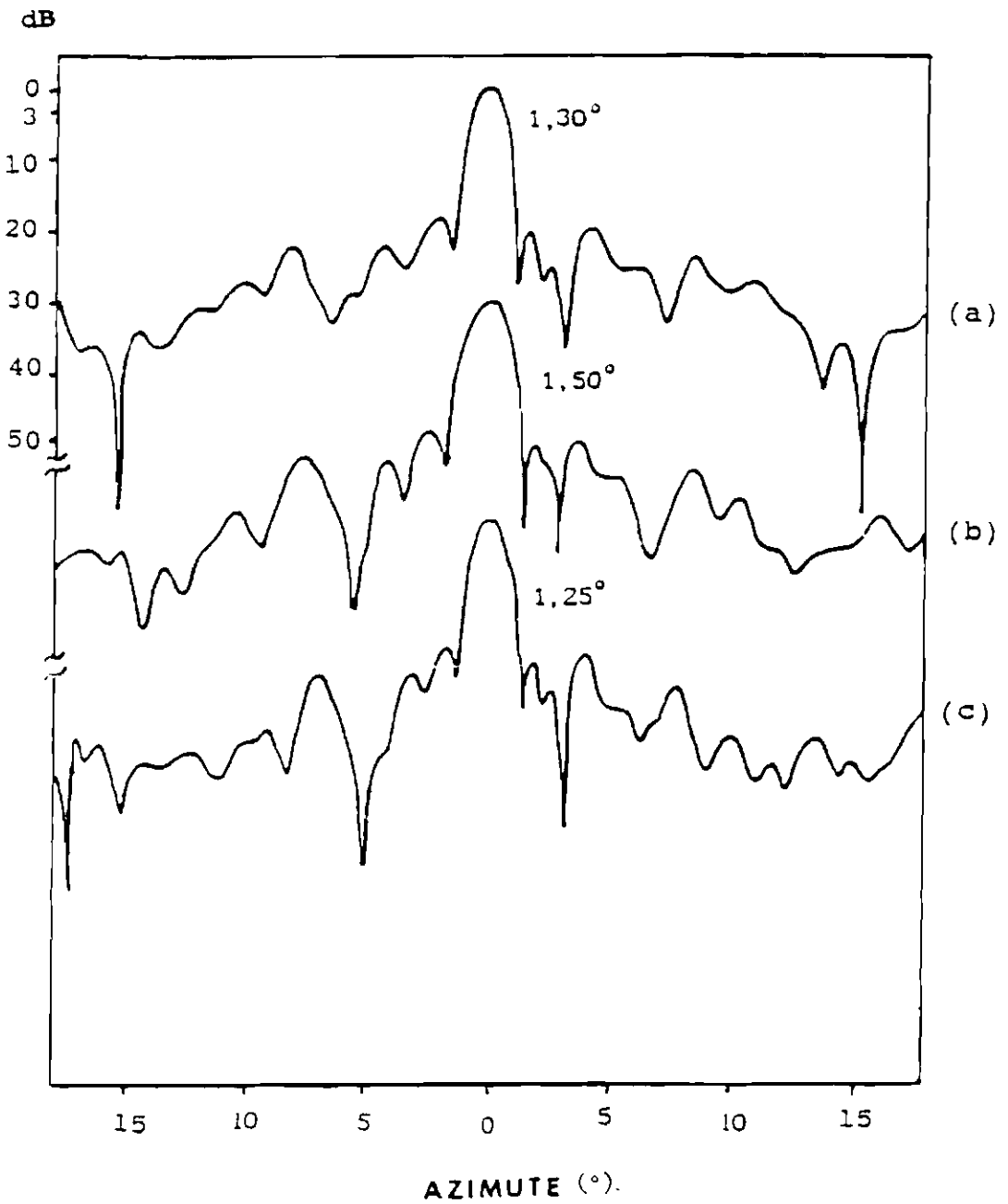

Fig. 2.5 - Figuras de radiação da antena para polarização vertical: (a) em 1550 MHz, (b) em 1600 MHz e (c) em 1650 MHz. Os respectivos valores da largura do feixe a meia potência também são mostrados.

2.3 ALIMENTADOR

O alimentador de banda estreita, com freqüência central de 1600 MHz, colocado no foco da antena parabólica, foi testado no próprio INPE. As medidas e as principais características obtidas são dadas a seguir.

2.3.1 "CROSS-TALK"

O alimentador é polarizado horizontalmente, no entanto, é possível que alguma parcela da componente vertical do sinal também seja detectada pelo sistema. Este fenômeno de "interferência" ou contaminação de uma componente de polarização em outra recebe o nome de "cross-talk".

As medidas de "cross-talk" do alimentador para as freqüências de 1550, 1600 e 1650 MHz estão na Figura 2.6, que aponta valores inferiores a aproximadamente -30 dB, isto significa que as intensidades do sinal detectadas para outras componentes de polarização são, no mínimo, 1000 vezes menores que para a polarização horizontal.

2.3.2 VSWR

Foram feitas medidas de "Voltage Standing Wave Ratio" (VSWR) do alimentador, também referida como medida de onda estacionária, que é uma medida da razão entre a máxima e a mínima voltagem numa linha de transmissão (Olver, 1982, p.30), ou, em outras palavras, é uma medida da reflexão do sinal que chega ao alimentador, em função da freqüência. O coeficiente de reflexão (ρ) é dado por: $\rho =$ (VSWR - 1) / (VSWR + 1) (Milligan, 1985, p.22) e varia de 0 a 1, representando, respectivamente, quando a reflexão do sinal é nula e quando é máxima (reflexão total).

As medidas foram obtidas pela Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA), do INPE, sob a responsabilidade do Sr. Lúcio Baptista T. Cividanes e mostram VSWR variando aproximadamente entre 1,00 e 1,50, na faixa de freqüência de (1600 $\pm$ 100) MHz (Figura 2.7), o que corresponde a um coeficiente de reflexão entre 0 e $\sim$ 0,2; isto significa que a reflexão do sinal de entrada é sempre inferior a 20 %, na banda de freqüência de observação.

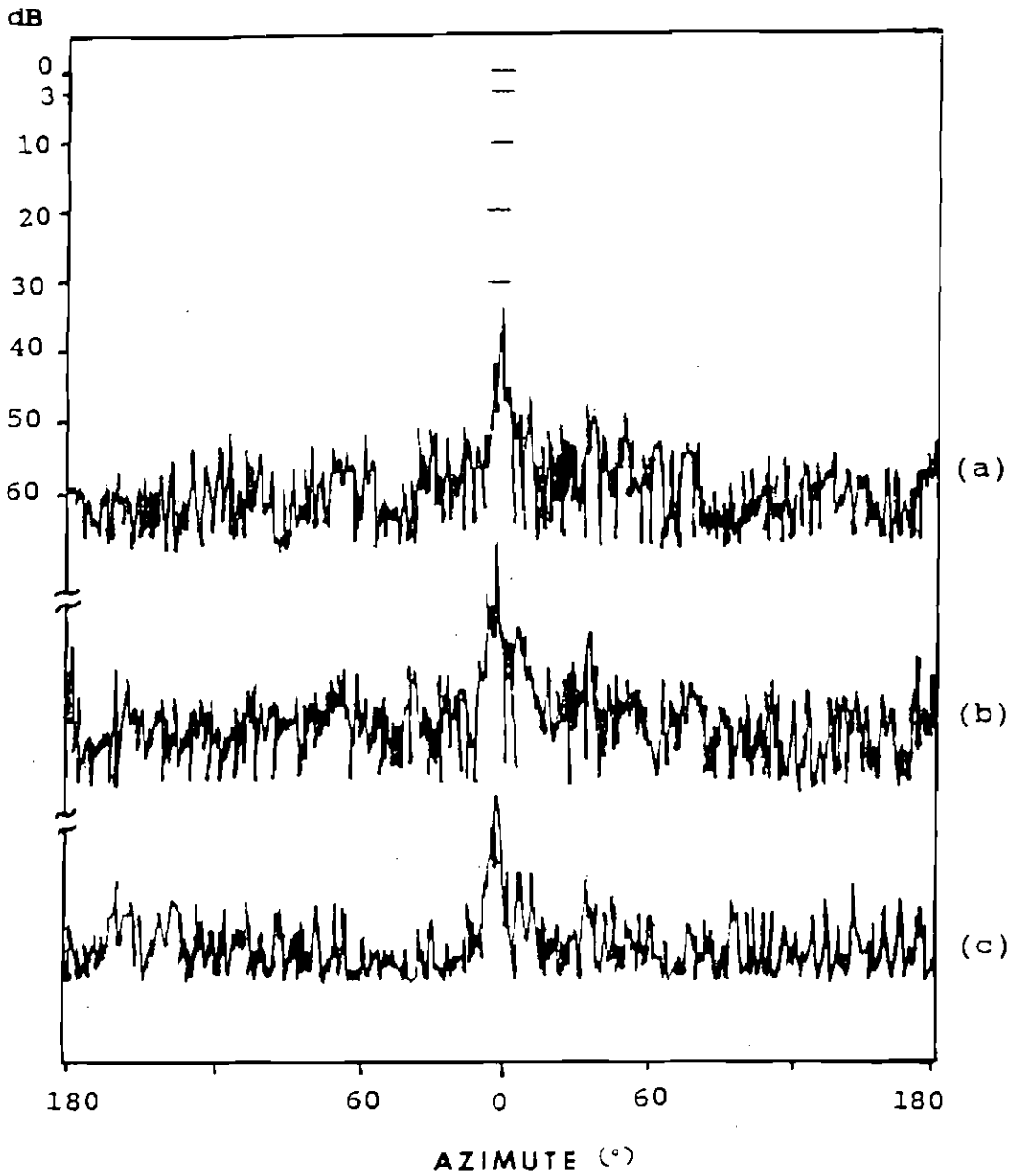

Fig. 2.6 - "Cross-talk" da antena para: (a) 1550 MHz, (b) 1600 MHz e (c) 1650 MHz.

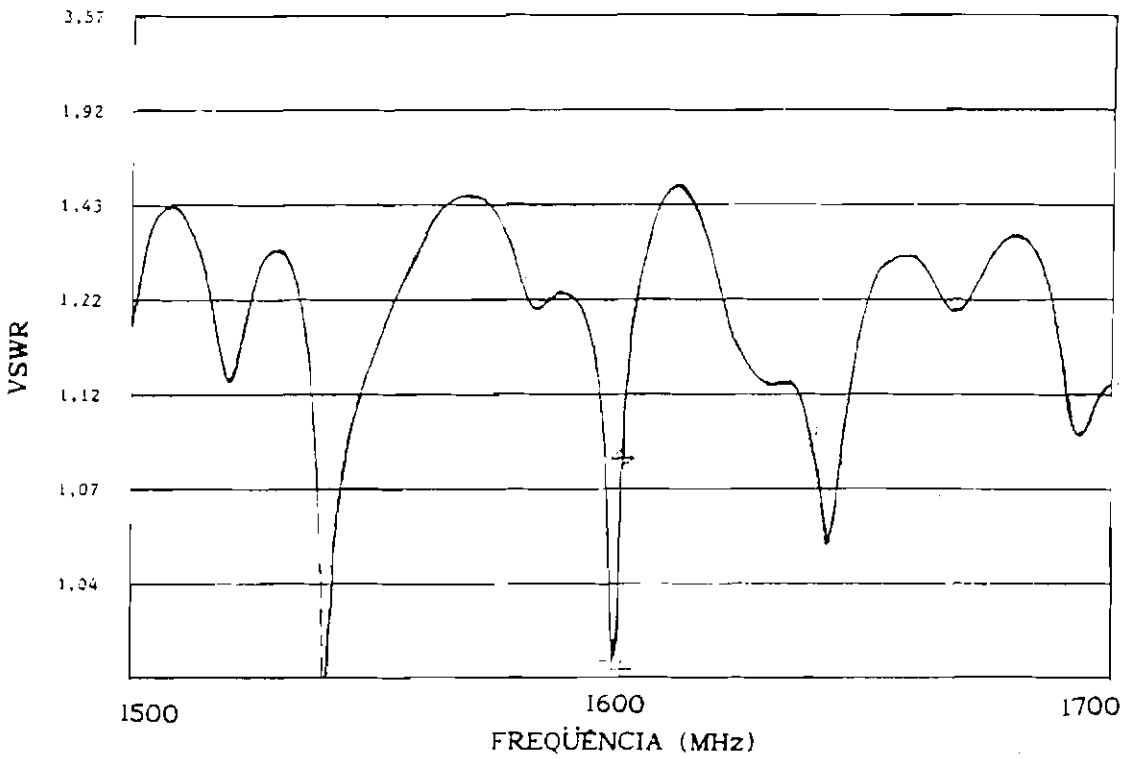

Fig. 2.7 - Medidas de VSWR entre 1500 e 1700 MHz.

2.3.3 DIRETIVIDADE

A diretividade (D), em termos de potência, é "a razão entre a intensidade máxima e a intensidade média de uma antena", mas quando considerada em termos espaciais (figura de radiação), pode ser definida como sendo "o ângulo sólido de uma esfera (figura de radiação isotrópica = 4π srad), dividido pelo ângulo sólido do feixe da antena, Ω_A" (Kraus e Carver, 1973, p.589). O ângulo sólido do feixe da antena, por sua vez, é definido como "o ângulo sólido através do qual toda potência seria captada pela antena receptora se a potência fosse constante sobre este ângulo e igual ao valor máximo" (Kraus e Carver, 1973, p.587).

Assim,

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \text{ (adimensional)} \quad , \tag{2.1}$$

ou, em termos da figura de radiação,

$$D = \frac{41.253\ \varepsilon}{\mathcal{K}\ \theta_{MP}\ \phi_{MP}} , \tag{2.2}$$

onde Ω_A é o ângulo sólido do feixe da antena (em rad); $\mathcal{K}$ é o fator de correção da antena; ε é a eficiência do feixe da antena (tipicamente $\varepsilon \simeq 0{,}65$) e θ_{MP} e ϕ_{MP} são as larguras do feixe da antena a meia potência, dadas em graus, respectivamente nos planos θ e ϕ (Figura 2.8); $\theta_{MP} \simeq 1{,}50^{\circ}$ e $\phi_{MP} \simeq 1{,}25^{\circ}$, em 1600 MHz.

De acordo com Guidice e Castelli (1971), o fator de correção ($\mathcal{K}$) está relacionado à figura de antena da seguinte maneira:

$$\mathcal{K} = [1 + 0,18\,(\frac{\theta_d}{\theta_{MP}})^2]^2 , \tag{2.3}$$

onde θ_d é o diâmetro angular da fonte (em minutos de arco) e θ_{MP} é a largura do feixe à meia potência (em minutos de arco).

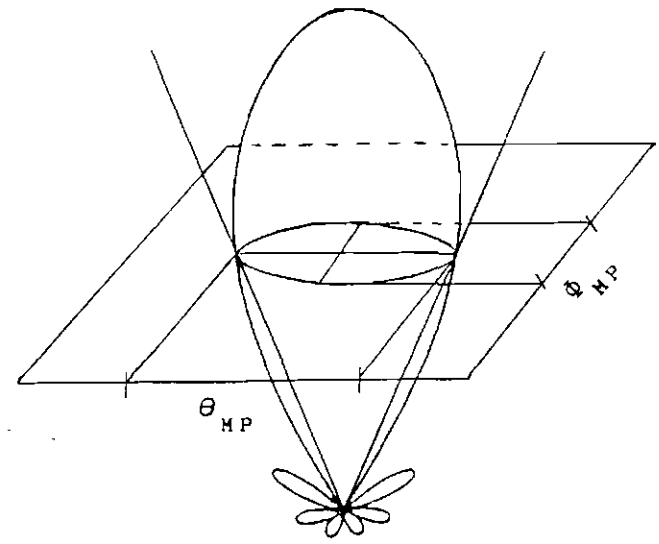

Fig. 2.8 - Figura de radiação da antena mostrando θ_{MP} e ϕ_{MP}.

Para o sol, $\theta_d \simeq 32'$ e das figuras de radiação da antena tem-se que $\theta_{MP} \simeq 90'$, de tal forma que $\mathcal{K} \simeq 1{,}05$. Substituindo então, as larguras do feixe a meia potência, θ_{MP} e ϕ_{MP} , e o fator de correção na Equação (2.2), obtem-se D $\simeq$ 14667,7.

2.3.4 GANHO

O ganho de potência, ou simplesmente ganho (G), de uma antena é uma grandeza que envolve rendimento, definido como "a razão entre a intensidade de radiação máxima e a intensidade de radiação máxima de uma antena de referência com a mesma potência de entrada" (Kraus e Carver, 1973, p.590) e obedece a seguinte relação:

$$G = \varepsilon D . \tag{2.4}$$

Substituindo os valores da diretividade (D) e eficiência da antena (ε) da seção anterior, tem-se que $G_{dB} \simeq 41{,}11$ dB.

Os valores de diretividade e ganho, calculados nas duas últimas seções, concordam, respectivamente, em cerca de 20 % e 1,5 %, com as medidas obtidas pela Harald S/A em abril de 1988, para as freqüências de 1550, 1600 e 1650 MHz (Tabela 2.2), que apontam uma diretividade média de ~ 11771,2 e um ganho nominal de ~ 40,71 dB.

TABELA 2.2 - MEDIDAS DE DIRETIVIDADE (D) E GANHO (G) DO ALIMENTADOR, NAS FREQÜÊNCIAS 1550, 1600 E 1650 MHz

		Freqüência (MHz)		
		1550	1600	1650
D	Horizontal	11722,0	12912,2	13031,7
	Vertical	9749,9	11350,1	12022,6
	Média	10690,5	12106,0	12517,0
G (dB)	Horizontal	40,69	41,11	41,15
	Vertical	39,89	40,55	40,80
	Média	40,29	40,83	40,98

2.4 INTERFERÊNCIA LOCAL

As medidas de interferência local (IL), na direção da trajetória do sol, para a banda de freqüência de 30 - 2500 MHz (Figura 2.9), foram efetuadas, em setembro de 1990, no local da instalação da antena, pelo Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE, sob a responsabilidade do Dr. Benjamim da S. M. C. Galvão, utilizando sofisticados equipamentos do mercado internacional:

1) Receptores (fabricante EATON), modelos:
   (a) NM-37: 30-1000 MHz e
   (b) NM-67: 1000-2500 MHz.
2) Antenas (EATON):
   (a) bicônica: 30-200 MHz;
   (b) cônica log-espiral (CLS): 200-1000 MHz e
   (c) "Double Ridged Guide" (DRG): 1000-2500 MHz.

Estes equipamentos fazem parte do sistema de Medidas de Interferência/Compatibilidade Eletromagnética (MI/CE) do INPE.

As medidas efetuadas levaram em consideração o "fator de correção da antena" e as perdas devido aos cabos, cujos valores são inseridos no programa que efetua os testes.

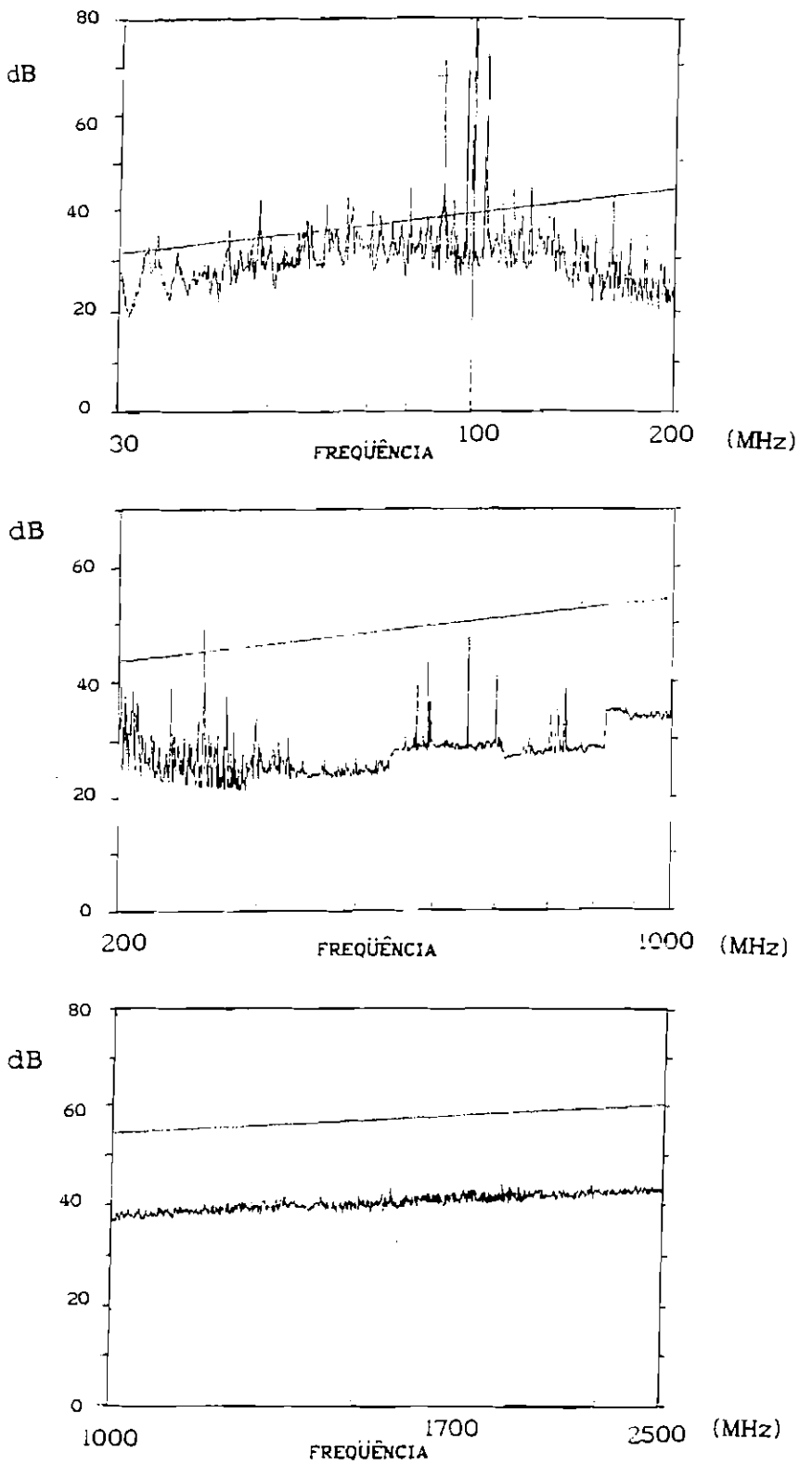

Fig. 2.9 - Interferência local medida no INPE: (a) entre 30 e 200 MHz; (b) entre 200 e 1000 MHz e (c) entre 1000 e 2500 MHz. Para as três bandas a resolução espectral foi 100 kHz.

Os resultados apresentados na Figura 2.9, mostram que entre 30 e 200 MHz, aparecem algumas raias interferentes devido às estações de FM. Na faixa entre 200 e 1000 MHz aparecem sinais de interferência não muito intensos em determinadas freqüências, provavelmente devido a estações de TV. Enquanto que, na faixa de 1000 a 2500 MHz, que engloba a faixa de operação do espectrógrafo decimétrico, não há quaisquer sinais de interferência local, o que evidencia uma boa relação sinal–ruído para o espectrógrafo decimétrico.

2.5 PRÉ–AMPLIFICADOR

O amplificador de baixo ruído, "Low Noise Amplifier" (LNA) utilizado, foi desenvolvido no INPE. Originalmente o pré–amplificador projetado permitia a operação numa banda larga de freqüência, mas através de um sistema de filtragem (tipo passa–alta), passou a operar em freqüências acima de 1 GHz.

A figura de ruído (FR) do amplificador é de 3 dB e as impedâncias de entrada e de saída são iguais a 50 Ω .

Duas medidas foram tomadas, visando um bom funcionamento do pré–amplificador:

1) Instalação do pré–amplificador mais próximo possível do alimentador, para evitar perdas do sinal antes da amplificação. Este fator é importante quando os sinais envolvidos são de baixa intensidade, como é o caso de algumas explosões solares e foi justamente por isso, que, a partir de janeiro de 1992, as observações passaram a ser feitas sem a utilização do cabo curto (seção 2.6), que fazia a conexão entre o alimentador e o pré–amplificador, de forma que o pré–amplificador foi conectado diretamente ao alimentador.

2) Isolamento térmico. O pré–amplificador foi acondicionado num "abrigo" revestido de isopor, justamente para evitar grandes variações de temperatura e mesmo quando passou a ser conectado direto na base da antena, foi revestido com um envoltório também de isopor.

As medidas de ganho do amplificador fornecem um valor de aproximadamente 34 dB de ganho para a faixa de (1600 $\pm$ 100) MHz, como mostra a Figura 2.10. Pode–se notar que, a diferença de ganho para os extremos da banda de observação, (1500 e 1700 MHz), não ultrapassa 2 dB.

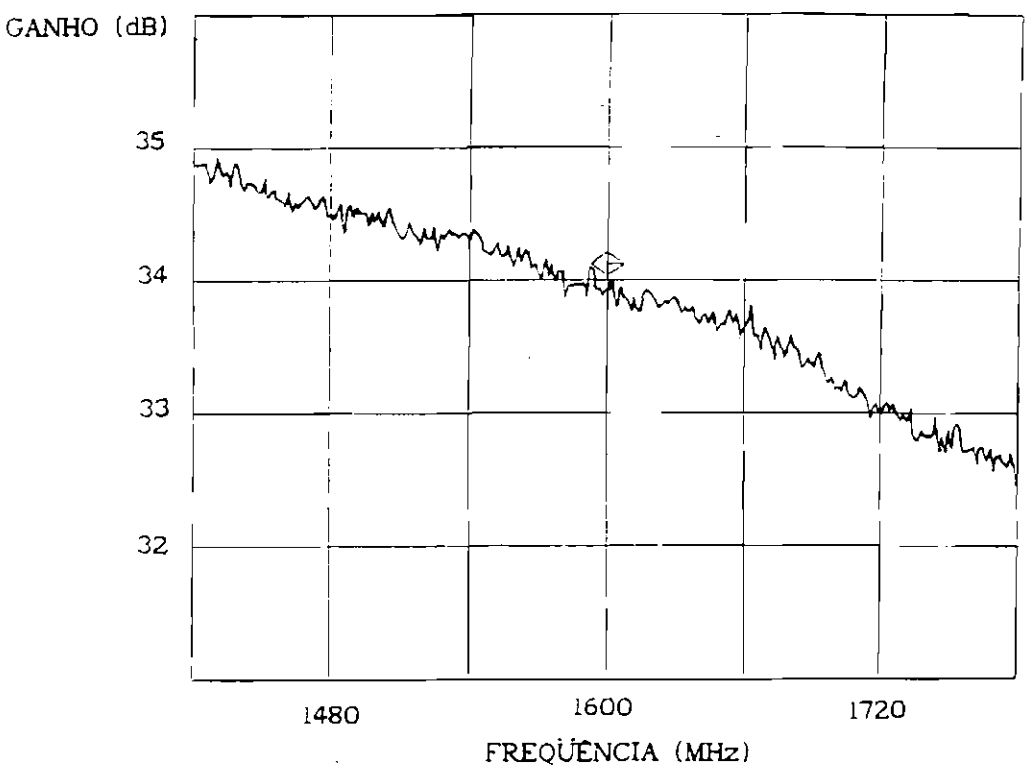

Fig. 2.10 - Medidas de ganho versus freqüência para o pré-amplificador (LNA), na faixa de 1420 a 1780 MHz.

2.6 CABOS

Foram utilizados dois cabos coaxiais RG 213, de 50 Ω de impedância:

1) Cabo curto (~ 0,5 m): para conduzir o sinal do alimentador desde a base do prato parabólico até o pré-amplificador, instalado inicialmente dentro do abrigo.

2) Cabo longo (~ 30,0 m): desde o pré-amplificador até o sistema receptor do sinal (analisador espectral).

As atenuações (perdas) do sinal provocadas pelos dois cabos foram medidas pela DEA (sob responsabilidade do Dr. Lúcio Baptista T. Cividanes), sendo encontrados os valores de aproximadamente 0,16 dB (Figura 2.11) e 13,9 dB (Figura 2.12) de atenuação, respectivamente, para o cabo curto e para o cabo longo, na banda de freqüência de 1500 a 1700 MHz, como mostrado na Tabela 2.3.

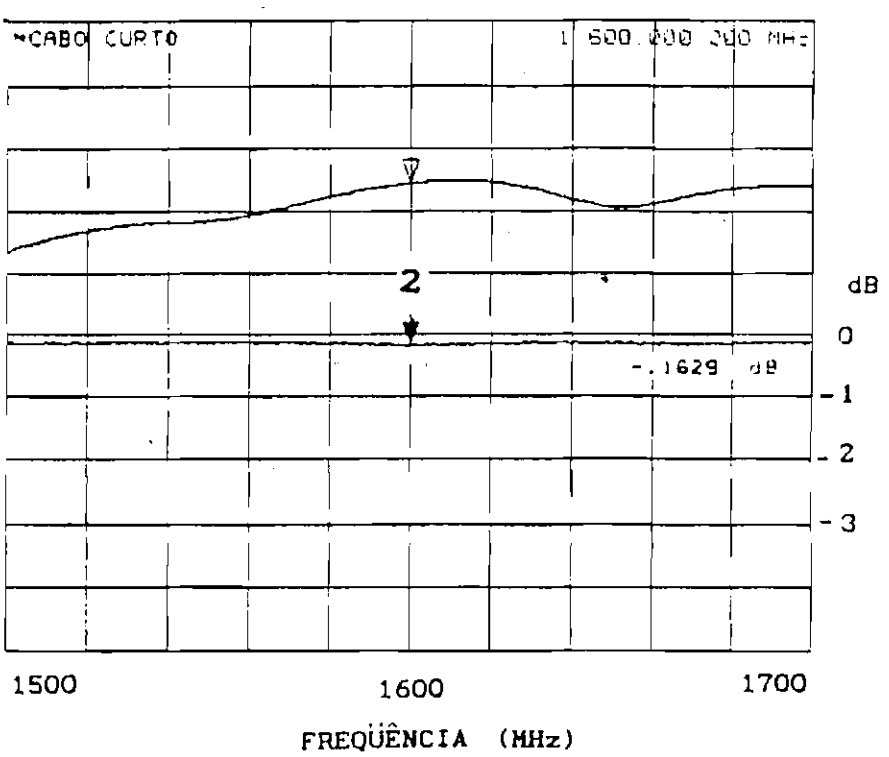

Fig. 2.11 - A curva 2 representa a atenuação (~ 0,16 dB), devido ao cabo curto, entre 1500 e 1700 MHz.

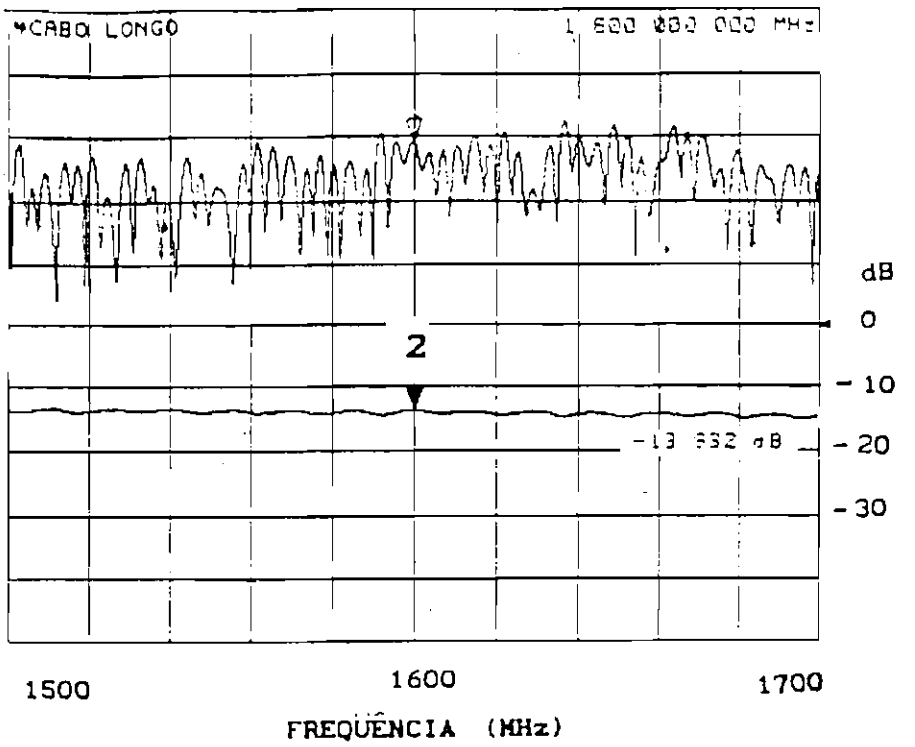

Fig. 2.12 - A curva 2 representa a atenuação (~ 0,16 dB), devido ao cabo longo, entre 1500 e 1700 MHz.

TABELA 2.3 - COMPRIMENTO E ATENUAÇÃO DOS CABOS USADOS

Cabo	Extensão (m)	Atenuação (dB)
Curto	~ 0,5	0,16
Longo	~ 30,0	13,9

2.7 RECEPTOR – ANALISADOR ESPECTRAL

O sinal proveniente do pré–amplificador é introduzido em um analisador espectral, que pode ser definido como um receptor que exibe , num tubo de raios catódicos (TRC), a voltagem ou potência de um sinal no domínio das freqüências. Na tela do analisador espectral, tem–se a amplitude do sinal (A) no eixo vertical e a freqüência (f) no eixo horizontal.

O analisador de espectros mostra os sinais no domínio da freqüência, através do um sistema de filtro passa–banda, de tal forma que, para um ponto no eixo das freqüências, é mostrada apenas a componente do sinal selecionada pelo filtro, que rejeita as demais componentes. Assim, as componentes do sinal em freqüências individuais serão vistas separadamente. Isso não ocorre no caso do osciloscópio, que mostra o sinal no domínio do tempo, fazendo com que a amplitude mostrada seja uma representação da soma das componentes do sinal em todas freqüências (Figura 2.13).

Existem dois tipos de analisador espectral: analisadores em tempo real e analisadores de varredura ajustável.

O analisador espectral de varredura ajustável mais comumente utilizado é do tipo super–heterodino (Figura 2.14), como o que foi empregado no sistema receptor do espectrógrafo decimétrico solar: HP8559A ("Spectrum Analyser Plug–In"). Neste tipo de analisador espectral, o sinal de entrada (na freqüência f) passa por um filtro passa baixa – "Low Pass Filter" (LPF), é, então, misturado (mixer) com a freqüência variável do oscilador local (OL), produzindo a freqüência intermediária (FI), recebida pelo detector de lei quadrada, cujo sinal de saída é exibido através do Tubo de Raios Catódicos (TRC).

Um analisador espectral do tipo super–heterodino consiste num receptor de banda estreita, no qual o controlador de freqüência do oscilador local (OL) é ajustado de acordo com a aplicação de uma voltagem tipo "dente–de–serra", que também é aplicada, simultaneamente, às placas de deflexão horizontal do TRC. De tal forma que a saída do receptor seja aplicada ás placas de deflexão vertical do TRC, em sincronismo com a varredura, gerando na tela um gráfico de amplitude versus freqüência.

O ajuste da faixa de freqüência do analisador é feito através da variação da voltagem no OL, cuja freqüência é misturada (mixer) com o sinal de entrada, produzindo a freqüência intermediária (FI) (HP, 1974 e Cecatto, 1991).

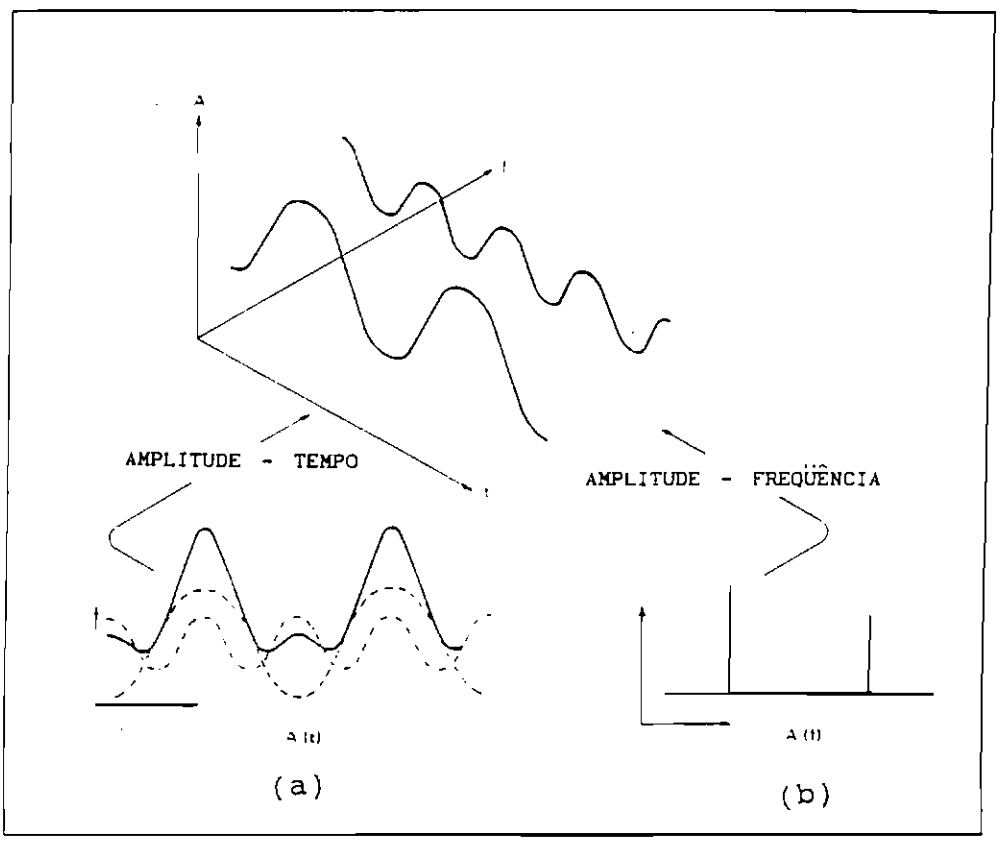

Fig. 2.13 - Sistema de coordenadas mostrando os domínios (a) do tempo e (b) da freqüência.
FONTE: Adaptada de HP (1974), p.1.

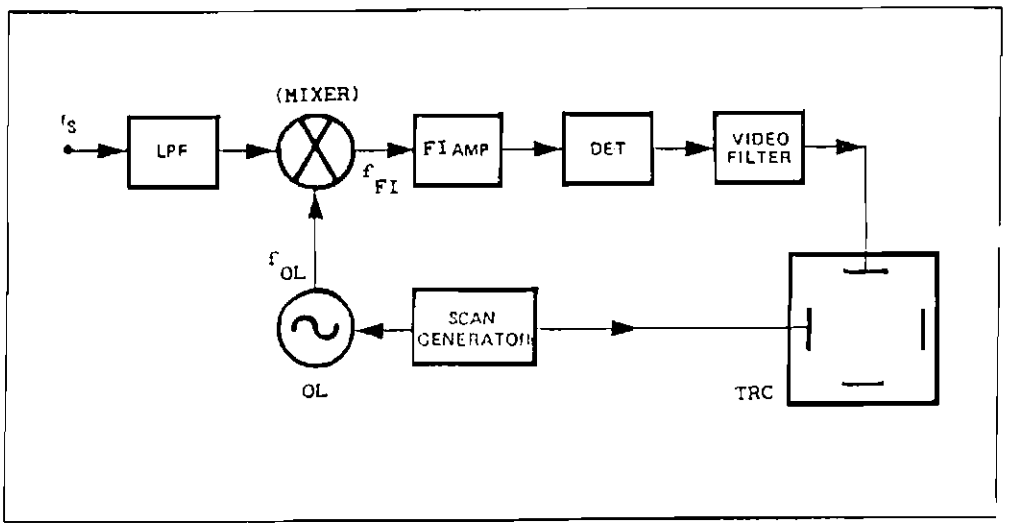

Fig. 2.14 - Diagrama de blocos representando um analisador espectral do tipo super–heterodino.
FONTE: Adaptada de HP (1974), p.8.

O funcionamento deste sistema para a exibição de um determinado sinal, pode ser melhor entendido considerando–se a Figura 2.15, que representa a varredura do sinal sobre a banda de freqüência f, compreendida entre f_1 e f_3 , feita através de um filtro de largura de banda B, durante um intervalo de tempo t.

O efeito do filtro de varredura interceptando um sinal para uma freqüência f_2, intermediária a f_1 e f_3, será um pulso na escala horizontal, cuja largura (τ) será dada por: $\tau = Bt/f$, que nada mais é do que o tempo no qual o sinal de freqüência f_2 se encontra dentro da banda B do filtro, podendo ser considerado como uma medida da resolução do sistema (Engelson, 1971, p.11).

As principais características do analisador espectral HP8559A utilizado são (HP, 1985):

1) intervalo de freqüência: 10 MHz a 21 GHz (dividido em 6 sub–intervalos);

2) resolução em freqüência (Δf): 1 a 3000 kHz;

3) banda de freqüência (f): 100 kHz a 9 GHz;

4) tempo de varredura (ΔT): 20 s a 100 s e

5) intervalo de amplitude: -111 dBm a +30 dBm.

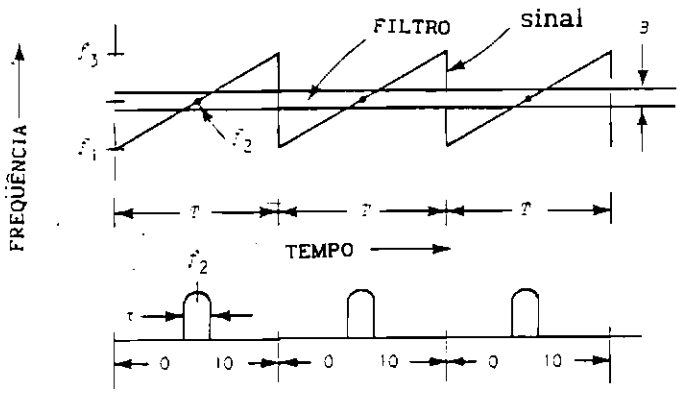

Fig. 2.15 - Relação entre freqüência e tempo para um sinal detectado por um sistema de varredura.
FONTE: Adaptada de Engelson (1971), p.11.

No analisador espectral, existem dois modos de operação com relação a escolha da resolução em freqüência:

1) Modo automático ("optimum"), no qual o próprio analisador seleciona uma resolução espectral de acordo com a banda de freqüência e o tempo de varredura escolhidos.

2) Modo manual, no qual o operador escolhe a resolução em freqüência, entre os possíveis valores oferecidos pelo analisador espectral, na faixa de 1 a 3000 kHz.

A operação do analisador espectral foi feita sempre no modo manual, no entanto, foi respeitado o compromisso existente na combinação entre a resolução temporal e em freqüência para uma dada banda de freqüência de observação, de tal forma que, para uma determinada resolução em freqüência (Δf) do receptor, a resolução temporal (Δt) ideal é dada por $\Delta t = 1 / \Delta f$, ou seja, Δt é o tempo mínimo (limite) para a detecção de um sinal com largura de banda Δf.

Sendo assim, por exemplo, para uma Δf de 1 MHz, o tempo mínimo para a amostragem do sinal é de 1 μs, isto é, o sinal não será detectado se a resolução temporal (Δt) for inferior a este valor.

Quando é feita a varredura do sinal, numa banda de freqüência f, num intervalo de tempo ΔT, a resolução temporal efetiva será igual ao número de canais (f/Δf), multiplicado pelo tempo de amostragem de cada canal (1/Δf), ou

seja, $\Delta t_{ef} = (f/\Delta f)\ (1/\Delta f)$, de tal forma que o tempo de varredura não poderá ser inferior à resolução temporal efetiva.

Levando em conta as relações expressas acima, foram empregados os seguintes parâmetros no funcionamento do espectrógrafo:

1) freqüência central (f_c): 1,6 GHz;

2) tempo de varredura (ΔT): 20, 50 e 100 ms;

3) banda de freqüência (f): 100 e 200 MHz e

4) resolução em freqüência (Δf): 0,3, 1 e 3 MHz.

2.8 AMPLIFICADOR DC/INVERSOR

O sistema de amplificação/inversão foi desenvolvido no INPE e, como o próprio nome já diz, ele é responsável primeiramente pela amplificação (2 a 3 dB) do sinal (espectro de potência) obtido depois da varredura e posterior inversão deste sinal que é fornecido aos sistemas de monitoramento e aquisição dos dados.

A inversão da polaridade do sinal provocada por tal circuito, tem por finalidade compatibilizar as variações da tensão do sinal varrido, com as variações de intensidade exibidas pelo osciloscópio, com isso, um aumento de fluxo captado através do sistema receptor irá corresponder a um aumento proporcional da intensidade do sinal exibido na tela do osciloscópio. Sem esta inversão, ocorre justamente o oposto: uma variação positiva do sinal acarreta um decréscimo da intensidade no osciloscópio.

2.9 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição e o monitoramento dos dados obtidos do receptor (analisador espectral), são feitos simultaneamente por três sistemas, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 2.1:

1) Registrador de papel – para monitoramento (além do monitoramento feito através da própria tela do analisador espectral).

2) Sistema ótico – para aquisição dos dados através do espectro dinâmico (filme).

3) Sistema digital – para aquisição digital, feita em tempo real.

As próximas seções descrevem estes três sistemas de aquisição e monitoramento de dados, em detalhes.

2.9.1 REGISTRADOR DE PAPEL

A saída do amplificador/inversor está conectada com o registrador de papel, modelo RB 102 - Equipamentos Científicos do Brasil (ECB) Indústria e Comércio LTDA. O sinal que é introduzido no registrador de papel é antes integrado em freqüência (100 ou 200 MHz) e em tempo, através de um circuito RC integrador, com constante de integração igual a 1 s.

A regulagem da velocidade do papel permite a obtenção dos perfis temporais integrados das explosções solares observadas.

2.9.2 SISTEMA ÓTICO

2.9.2.1 OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio (HP180A) recebe dois sinais do analisador de espectros, como mostrado na Figura 2.1. O primeiro, é o sinal de intensidade, que, depois de amplificado e invertido (Amplificador DC/Inversor), controla a intensidade modulada no eixo Z, de tal forma que as variações de tensão na saída do analisador de espectros correspondam a variações de intensidade nas diversas freqüências da banda de observação e o segundo é o responsável pelo sincronismo horizontal entre o início e o fim da varredura.

2.9.2.2 CÂMERA FILMADORA

A intensidade do sinal da tela do osciloscópio é registrado em filme preto e branco 35 mm, através de uma câmera filmadora, desenvolvida na oficina mecânica do INPE (vide desenhos no Apêndice A), utilizando uma lente Minolta com distância focal (f) de 50 mm e abertura máxima de 1.4. A conexão entre o osciloscópio e a câmera é feita através de um guia de luz, revestido por uma pintura preto fosco, para evitar reflexões espúrias. Além das imagens da tela do osciloscópio, o filme registra as marcações de tempo (de 1 minuto), produzidas por um circuito temporizador (seção 2.10.3).

A relação entre a velocidade do filme e o tempo de varredura do sistema está na Tabela 2.4, cujos cálculos fazem parte do Apêndice B.

A velocidade do motor da câmera é controlada por uma fonte de tensão (HP "HARRISON 6224B DC POWER SUPPLY"), na maior parte das observações foi usada uma tensão de 5 V, que corresponde a uma velocidade da ordem de 2,0 cm/min. De acordo com os valores da Tabela 2.4, esta velocidade acarreta uma superposição de pontos no filme, sendo mais compatível com uma resolução igual a 500 ms.

TABELA 2.4 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DO FILME E TEMPO DE VARREDURA

	Resolução temporal (ms)		
	100	200	500
Velocidade (cm/min)	10,5	5,1	2,0

2.9.2.3 MATERIAL FOTOGRÁFICO

Foi utilizado filme P&B, Plus–X Pan fabricado pela KODAK, (filme pancromático, com velocidade média, grão extremamente fino e alto poder de resolução), com sensibilidade de ASA 125 (22°).

O processo de revelação/fixação, para obtenção dos negativos, foi feito pelo autor, inicialmente em casa e após novembro de 1991, no Observatório Solar (INPE). Foram utilizados revelador KODAK D76 e fixador/endurecedor para filmes e papéis também da KODAK. As reproduções fotográficas (cópias contato e ampliações), foram feitas no Laboratório Fotográfico do INPE em Cachoeira Paulista, SP.

A reprodução fotográfica assim obtida fornece o chamado **espectro dinâmico**, que nada mais é do que o espectro convencional (fluxo versus freqüência), tomado ao longo do tempo. No filme, a largura (35 mm) abriga a banda de freqüência da observação (100 ou 200 MHz), o comprimento expressa o tempo e a densidade da imagem sensibilizada corresponde à intensidade de fluxo da radiação emitida.

2.9.3 SISTEMA DIGITAL

O sistema de aquisação digital, em tempo real, dos dados observados foi desenvolvido a partir de sistema semelhante utilizado no espectrômetro milimétrico do Rádio Observatório de Itapetinga (ROI), em Atibaia (Martinazzo et al., 1991) e é constituído dos elementos citados a seguir.

2.9.3.1 PLACA/INTERFACE ENTRE RECEPTOR E MICRO–COMPUTADOR

A placa/interface, desenvolvida no INPE, por D. Martinazzo, consiste num circuito de amplificação e interface, que faz a adaptação dos níveis de voltagem para os sinais de intensidade e sincronismo do analisador espectral para a placa digitalizadora, instalada dentro do micro–computador. O Apêndice C mostra um

esquema da placa/interface.

2.9.3.2 PLACA DIGITALIZADORA

A conversão analógica/digital dos sinais obtidos é feita através de uma placa conversora de 12 bits: "PC CARD ADDA - 12", conectada dentro do micro-computador.

2.9.3.3 MICRO-COMPUTADOR

Foi utilizado um micro-computador PC XT, com velocidade (clock) de 12 MHz, memória RAM de 640 kbytes, disco rígido de 30 Mbytes e com um co-processador 8087.

2.9.3.4 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS

O programa para aquisição digital e armazenamento dos dados coletados pelo espectrógrafo decimétrico, batizado de PRODIG (Apêndice D), foi elaborado por D. Martinazzo e pelo Dr. J. A. C. F. Neri, na linguagem pascal, a partir dos programas de digitalização ajuste e conversão digital/analógica utilizados para aquisição e o tratamento dos dados obtidos pelo espectrômetro milimétrico do Rádio Observatório de Itapetinga (ROI). O autor participou dos testes deste programa, realizados entre outubro e dezembro de 1991.

Os dados são armazenados, na memória do micro-computador, em um ciclo contínuo e fechado, ou seja, o armazenamento ocorre na forma de "anel", à medida que os dados chegam, vão sendo armazenados e quando a memória fica cheia, o armazenamento volta a ser feito no início, sobre os dados armazenados anteriormente. Isto permite o armazenamento contínuo dos últimos 16 minutos de dados digitalizados, os quais podem ser transferidos para a memória permanente do micro-computador, com o acionamento de uma tecla. Após a transferência, o programa reinicia o armazenamento contínuo.

As características de operação do programa, após as adaptações feitas para o caso decimétrico, são as seguintes:

1) aquisição do sinal em 20 canais de freqüência, sendo que cada canal corresponde à média de 48 pontos digitalizados espaçados de aproximadamente 100 μs em tempo e $\sim$ 200 kHz em freqüência;

2) separação em freqüência de 10 MHz entre os canais;

3) resolução temporal (tempo de varredura) de 100 ms, em sincronismo com o analisador espectral e

4) capacidade de armazenamento de $\sim$ 16 minutos de dados a cada digitalização em tempo real, que equivale a 9000 varreduras.

2.10 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

2.10.1 CALIBRAÇÃO EM INTENSIDADE

A calibração do sistema com relação a intensidade do sinal recebido e analisado pode ser feita de duas maneiras:

1) Calibração interna usando um gerador de ruído (HP346B), ou utilizando o próprio analisador espectral.

2) Calibração externa usando o próprio sol (calmo) como calibrador, de acordo com o método proposto por Guidice e Castelli (1971), apresentado na seção 2.14 desta dissertação.

A calibração em intensidade, utilizando o próprio analisador espectral, é feita alterando o nível de atenuação (nível de referência) do "display" do analisador espectral, de 1, 2 e 3 dB acima do nível do sol calmo. A Figura 2.16 mostra um exemplo de calibração em intensidade no espectro dinâmico (filme) e na forma digital, obtida conforme descrito acima.

2.10.2 CALIBRAÇÃO EM FREQÜÊNCIA

A calibração em freqüência do espectro dinâmico é feita usando o analisador espectral, através da interrupção da varredura e seleção das freqüências discretas desejadas, igualmente espaçadas, dentro da banda de freqüência de observação, como mostra a Figura 2.17.

2.10.3 CALIBRAÇÃO EM TEMPO

A identificação dos intervalos de tempo no espectro dinâmico é feita usando o registro de um sinal luminoso produzido por um circuito temporizador, o qual sensibiliza o filme simultaneamente com o sinal produzido na tela do osciloscópio. A hora local é ajustada manualmente, tomando como referência o relógio padrão do INPE: "CESIUM BEAM FREQUENCY STANDARD HP5061B".

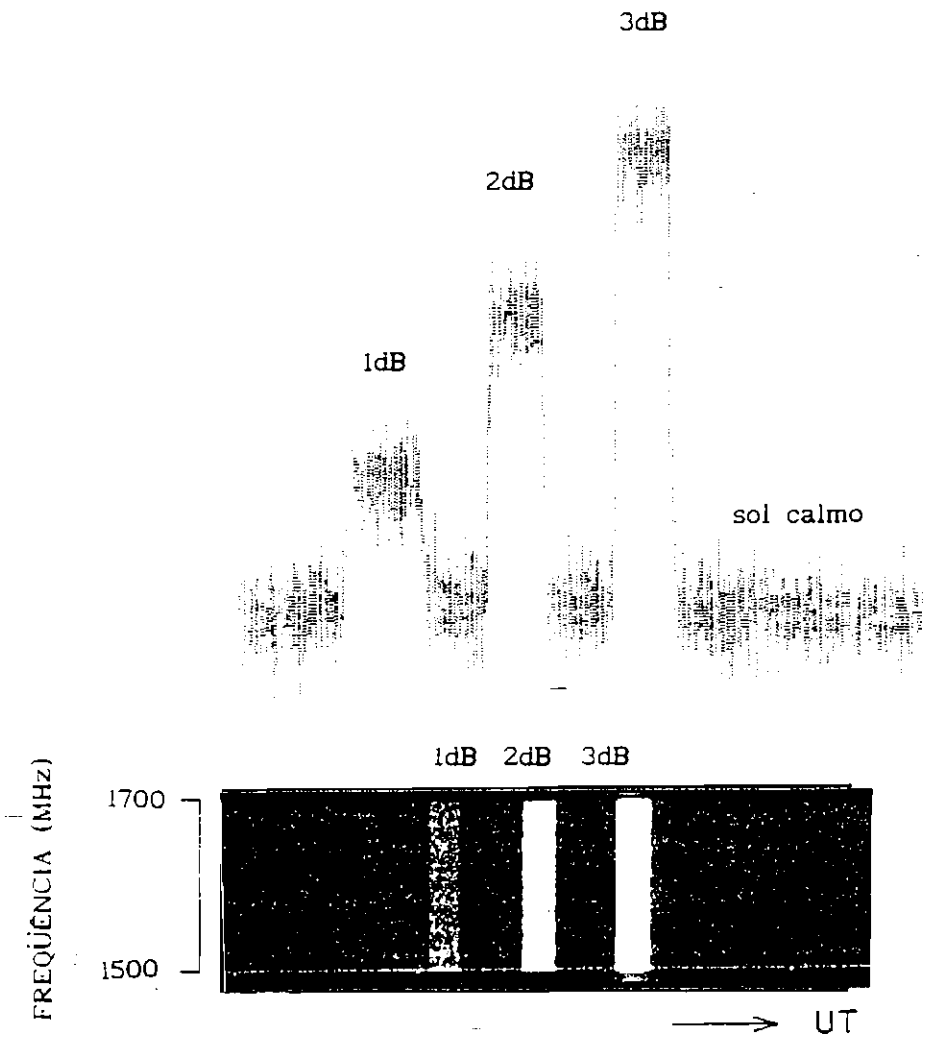

Fig. 2.16 - Calibração em intensidade (1, 2 e 3 dB acima do nível do sol calmo): na forma digital (acima) e (b) no espectro dinâmico (filme) (abaixo).

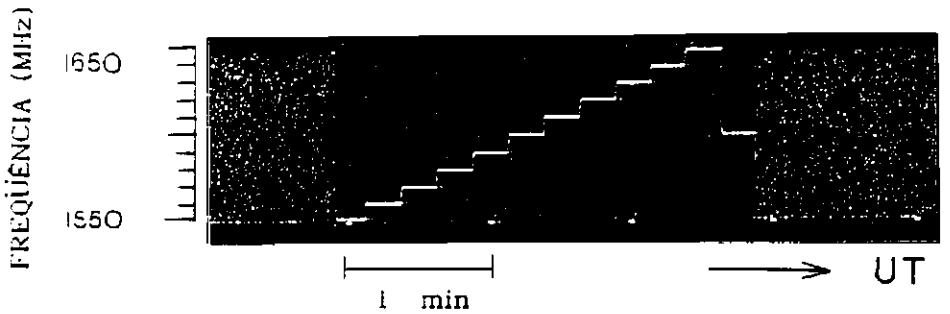

Fig. 2.17 - Calibração em freqüência (separação de 5 MHz) do espectro dinâmico.

O circuito temporizador foi desenvolvido usando um oscilador a cristal de freqüência 32,767 Hz, seguido de divisores de freqüência até atigir pulsos com duração de 200 milisegundos a cada 5 segundos ou pulsos de 1 segundo a cada 1 minuto. Este circuito temporizador está esquematizado no Apêndice E. O sinal de saída é ligado a um "Light Emited Diode" (LED), com a finalidade de fornecer marcas de referências no filme.

2.10.4 CALIBRAÇÃO DOS CANAIS DIGITAIS

A calibração dos canais de freqüência da digitalização foi feita introduzindo o próprio sinal de sincronismo, fornecido pelo analisador espectral, como "input" de sinal para o sistema digital (placa/interface). A calibração assim obtida é mostrada na Figura 2.18.

A finalidade foi investigar as possíveis flutuações na reprodução digital de um sinal para cada um dos 20 canais de freqüência. O que pode-se constatar é que estas flutuações, no pior dos casos (canal 18), foram inferiores a cerca de 4 MHz, ou seja, é da ordem da resolução espectral do espectrógrafo. Na realidade as flutuações são devidas às imperfeições da própria rampa de sincromismo.

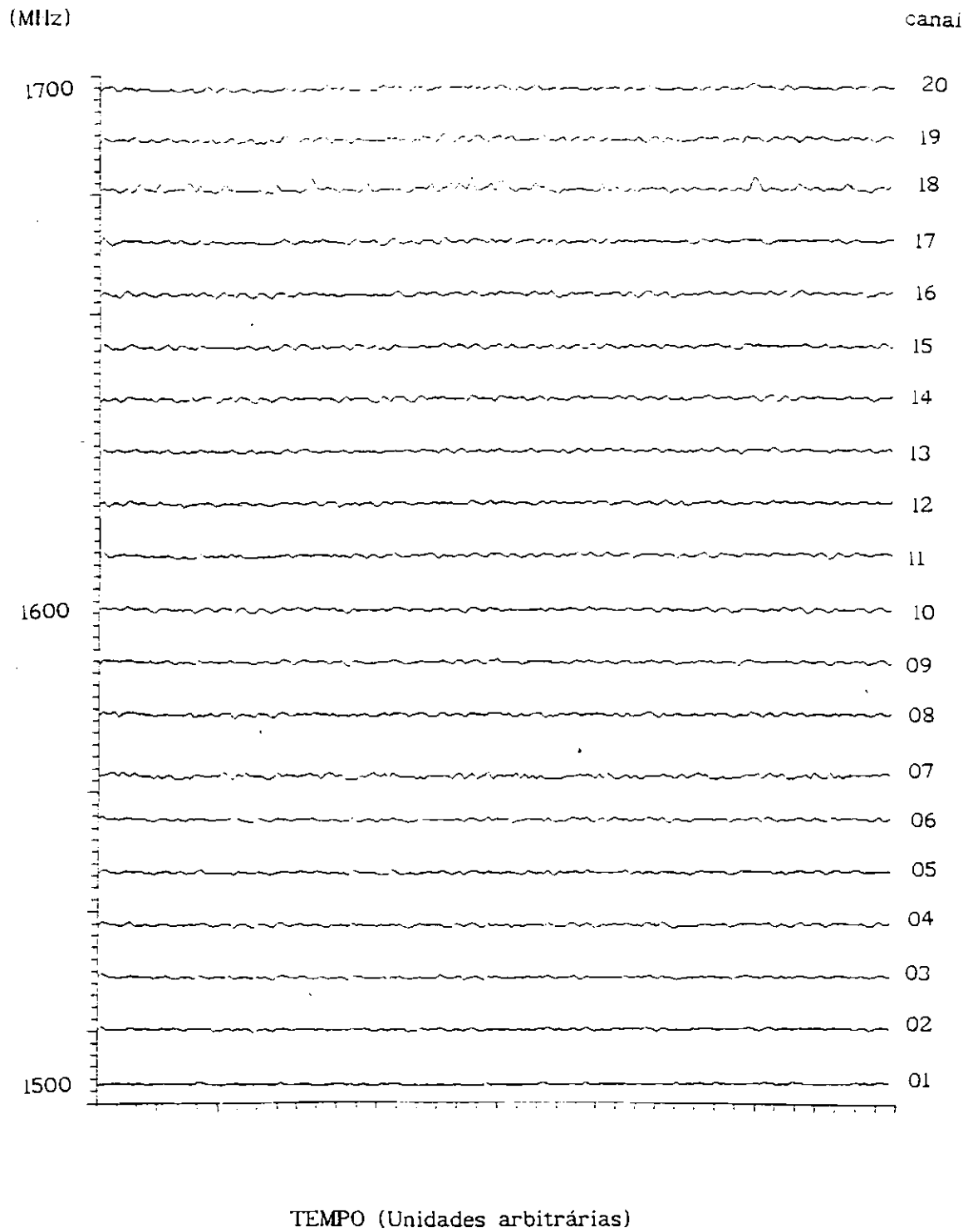

Fig. 2.18 - Calibração dos 20 canais de freqüência da digitalização.

2.11 ÁREA FÍSICA DA ANTENA

Na realidade, a antena é uma parábola, mas para o cálculo da área física (A_f) da superfície coletora, será considerada como sendo um disco, cuja área é dada por:

$$A_f = \pi r^2, \tag{2.5}$$

onde r é o raio da antena (r = 4,5 m). O que fornece, $A_f \simeq 63{,}62$ m^2.

2.12 ÁREA EFETIVA DA ANTENA

Sendo D a diretividade da antena e λ o comprimento de onda de observação, dado em metros, a área efetiva ou abertura efetiva (A_{ef}) da antena pode ser calculada por (Kraus, 1966, p.157 e Kraus, 1983, p.48)

$$A_{ef} = \frac{D\,\lambda^2}{4\pi}. \tag{2.6}$$

Usando o valor para a diretividade (D $\simeq$ 14667,7) obtido na seção 2.3.3, juntamente com o valor do comprimento de onda de 1600 MHz, dado em metros ($\lambda \simeq$ 0,19 m), obtem-se, pela Equação (2.6), que $A_{ef} \simeq 41{,}56$ m^2.

2.13 EFICIÊNCIA DA ANTENA

A eficiência da antena (ε), também chamada de eficiência de abertura da antena, é a razão entre a área efetiva (A_{ef}) e a área física (A_f) da antena, (Kraus, 1966, p.159). Portanto, $\varepsilon \simeq 65$ %.

2.14 DENSIDADE DE FLUXO

A densidade de fluxo do sol calmo (S_S) pode ser calculada adotando o método de calibração de antena proposto por Guidice e Castelli (1971), cuja expressão geral é dada por:

$$S(f) = [S(f_a)/S(f_b)]^{\gamma(f)} \times S(f_a), \tag{2.7}$$

onde

$$\gamma(f) = log(f/f_a)/log(f_a/f_b) . \tag{2.8}$$

S(f) é a densidade de fluxo da fonte na freqüência f, intermediária às freqüências f_a e f_b e $S(f_a)$ e $S(f_b)$ são as densidades de fluxo da fonte nas freqüências f_a e f_b, respectivamente.

A freqüência intermediária das observações foi 1600 MHz, enquanto que as freqüências f_a e f_b usadas foram, respectivamente, 1415 e 2695 MHz. As respectivas densidades de fluxo, S(1415) = 135,2 u.f.s. e S(2695) = 202,3 u.f.s., foram obtidas dos valores médios de densidade de fluxo, extraídos do SGD (1991), entre os meses de março e novembro de 1991 (os dados para os meses de dezembro de 1991 e janeiro de 1992 não estavam disponíveis no SGD).

Com este procedimento de interpolação, foi calculada a densidade de fluxo solar média, para a freqüência de 1600 MHz, para os meses referidos acima e obteve-se que S(1600) $\simeq$ 146,0 u.f.s..

2.15 TEMPERATURA DE ANTENA DO SOL

A temperatura de antena de uma fonte rádio (T_{AF}), em graus Kelvin, pode ser obtida usando a seguinte Equação (Kraus, 1966, p.99):

$$S_F = 2\, k\, T_{AF} \,/\, A_{ef} , \tag{2.9}$$

onde S_F é a intensidade de fluxo da fonte rádio (em W/m ^{2} Hz); k é a constante de Boltzmann (k = 1,38 x 10^{-23} Ws/K) e A_{ef} é a rea efetiva da antena (em m^2).

A Equação (2.9), descrita acima, se aplica apenas para fontes pontuais. No caso do sol é necessário considerar as dimensões angulares do disco, então, de acordo com Guidice e Castelli (1971), a Equação (2.9) se transforma em:

$$S_S = 2\, k\, T_{AS}\, \mathcal{K} \,/\, A_{ef} , \tag{2.10}$$

onde foi introduzido o fator de correção da antena ($\mathcal{K}$) (seção 2.3.3); os sub-índices "S" indicam que a fonte rádio em questão é o sol.

Este fator de correção da antena é usado quando consideramos fontes rádio em forma de disco circular, com temperatura de brilhância uniforme ao longo do disco e cujo diâmetro angular é maior que cerca de 1/5 da largura do feixe da antena a meia potência (HPBW), como é o caso do sol. Portanto, a temperatura de antena é dependente deste fator de correção que, por sua vez, é função da largura do feixe da antena.

Introduzindo na Equação (2.10) os valores obtidos nas seções 2.3.3 e 2.12 para, respectivamente, o fator de correção da antena ($\mathcal{K} \simeq 1{,}05$) e a área efetiva ($A_{ef} \simeq 41{,}56$ m^2), juntamente com a constante de Boltzmann, chega-se a uma expressão para T_{AS} dependente apenas da densidade de fluxo do sol calmo (S_S), dada em unidades de fluxo solar (u.f.s.), (1 u.f.s. $= 10^{-22}$ W/m^2 Hz):

$$T_{AS} \simeq 143,41\, S_S\, (K)\,. \tag{2.11}$$

Finalmente, introduzindo-se na Equação (2.11) o valor da densidade de fluxo média do sol ($S_S \simeq 146{,}0$ u.f.s.), calculada para os meses de observação, obtem-se para a temperatura de antena do sol média, no mesmo período, o valor de $T_{AS} \simeq 2{,}09 \times 10^4$ K. Este valor pode ser comparado com o valor obtido por Benz et al. (1991), mostrado na Figura 2.19. A diferença entre os valores se deve ao fato das observações realizadas por aqueles autores terem sido feitas para polarização circular e principalmente porque a antena por eles utilizada possui uma área efetiva menor do que o do espectrógrafo decimétrico.

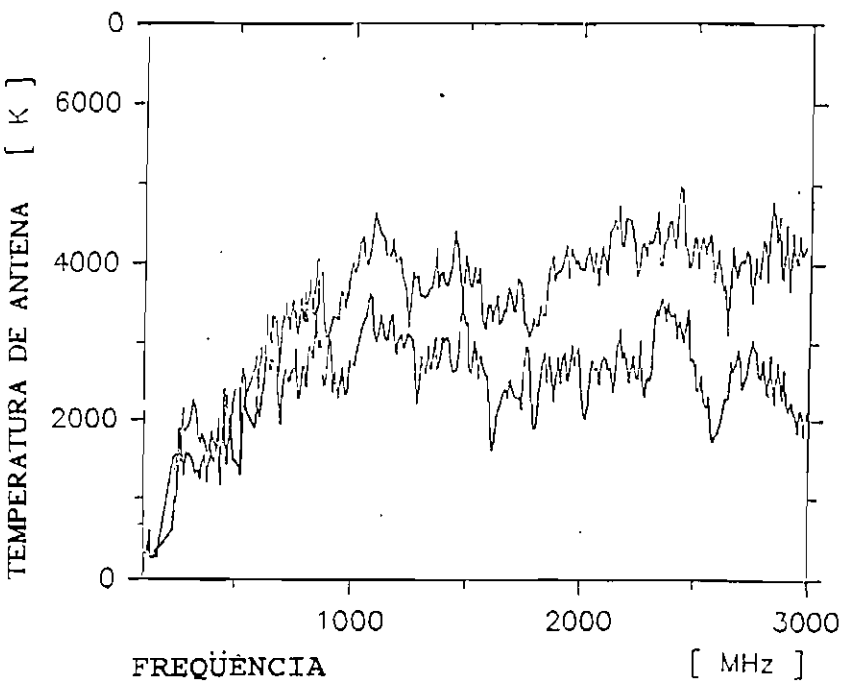

Fig. 2.19 - Excesso de temperatura de antena do sol, obtido por Benz et al. (1991), com um espectrômetro de banda larga (100–4000 MHz), com polarização circular.
FONTE: Benz et al. (1991), p.389.

2.16 TEMPERATURA DE SISTEMA

A temperatura de sistema (T_{SI}) depende da figura de ruído do amplificador (FR) e da temperatura ambiente (T_O), da seguinte forma (Kraus, 1966, p.260):

$$FR = 1 + (T_{SI}/T_O), \tag{2.12}$$

ou seja,

$$T_{SI} = (FR - 1)\, T_O). \tag{2.13}$$

Quando FR é expresso em decibéis (FR_{dB}), tem-se que

$$F = 10^{(F_{dB}/10)}. \tag{2.14}$$

A figura de ruído do amplificador é igual a 3 dB, portanto, FR $\sim$ 2. Este resultado, juntamente com o valor da temperatura ambiente ($T_O \simeq$ 290 K), (Kraus, 1966, p.237), fornece $T_{SI} \simeq$ 300 K.

2.17 TEMPERATURA DE "BACKGROUND"

Para a temperatura do "background" (T_{BG}) contribuem a temperatura do centro galático, a temperatura do céu (T_{CEU}) e a temperatura do sol calmo (T_S). No entanto, na faixa de freqüência em consideração (1600 $\pm$ 100 MHz), a temperatura ambiente ($\simeq$ 290 K) é mais de dez vezes maior que as contribuições do centro e do polo galático, (Figura 2.20), e como o sistema de alimentação não é refrigerado, esta contribuição pode ser desprezada.

Então, são consideradas apenas as contribuições do sol calmo, cuja temperatura de antena foi obtida na seção 2.15 ($T_S \simeq$ 2,09 x 10^4 K) e do céu ($T_{CEU} \simeq$ 290 K), o que fornece $T_{BG} \simeq 2{,}12 \times 10^4$ K.

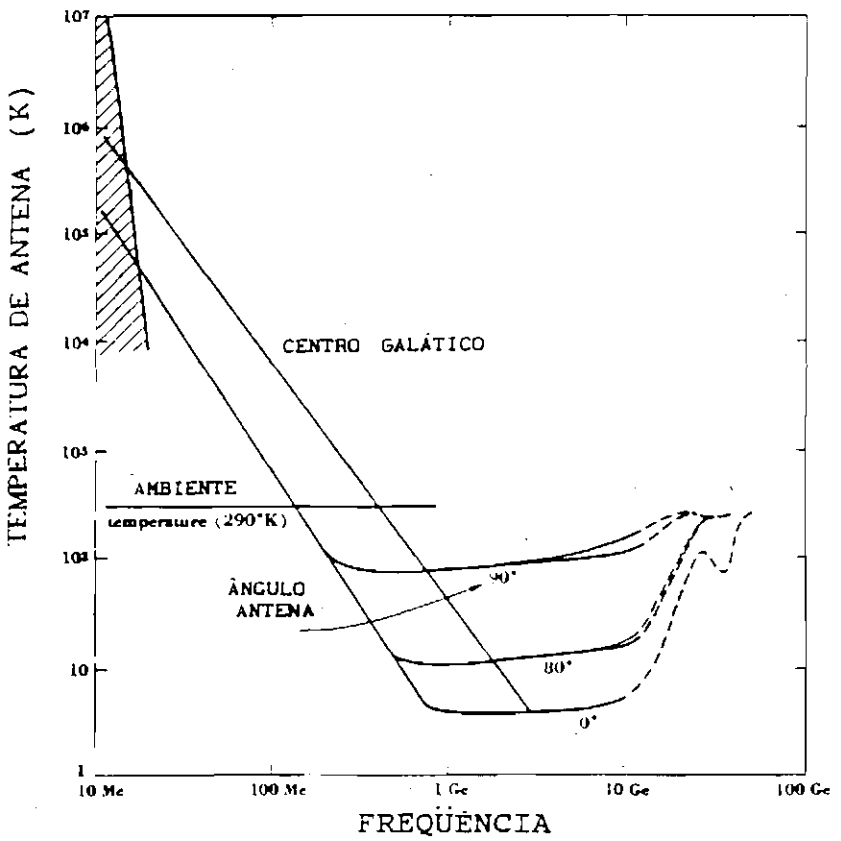

Fig. 2.20 - Temperatura de antena do fundo de céu, em função da freqüência.
FONTE: Adaptada de Kraus (1966), p. 237.

2.18 CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DO RECEPTOR

A sensibilidade (S_{min}), em outras palavras, a mínima intensidade de fluxo detectável para um sistema receptor, para uma dada freqüência, pode ser calculada por (Kraus, 1966):

$$S_{min} = \frac{2\,k\,(T_{SI} + T_{BG})}{A_{ef}\,(\Delta f \times \tau)^{1/2}}, \tag{2.15}$$

onde k é a constante de Boltzmann; T_{SI} é a temperatura de sistema; T_{BG} é a temperatura do "background"; A_{ef} é a área efetiva da antena; Δf é a resolução em freqüência e τ é a constante de tempo.

Quando se introduz a varredura, para uma determinada largura de banda de freqüência, f, a constante de tempo, τ, dever ser igual ao tempo de amostragem do sinal em cada canal, (Sawant, 1977, p.87) ou seja, o tempo total da varredura (ΔT), dividido pelo número de canais, que, por sua vez, é igual à banda total de freqüência (f), dividida pela resolução em freqüência (Δf), portanto,

$$\tau = \Delta T\,(\frac{\Delta f}{f}), \tag{2.16}$$

que expressa a resolução do sistema já discutida na seção 2.7 desta dissertação.

Substituindo na Equação (2.15) o valor da constante de Boltzmann e os valores para A_{ef}, T_{SI} e T_{BG}, calculados, respectivamente, nas seções 2.12, 2.16 e 2.17, tem-se que

$$S_{min} \simeq 1,43 \times 10^{-20}\,(\Delta f \times \tau)^{-1/2}\,\mathrm{W/m^2\,Hz}, \tag{2.17}$$

em unidades de fluxo solar (u.f.s.),

$$S_{min} \simeq 143\,(\Delta f \times \tau)^{-1/2}\ \text{u.f.s..} \tag{2.18}$$

A partir da Equação (2.18), pode-se combinar os valores de tempo de varredura, resolução em freqüência e largura de banda, para obter a sensibilidade, de acordo com o tipo de fenômeno que se deseja observar. Desta forma, a sensibilidade (S_{min}) do sistema foi calculada para algumas combinações de tempos de varredura (ΔT) iguais a 100 e 200 ms, resolução em freqüência (Δf) de 100, 300, 1000 e 3000 kHz e para largura de banda de observação (f) de 100 e 200 MHz. Os valores de sensibilidade obtidos estão reunidos na Tebela 2.5.

TABELA 2.5 - VALORES DE SENSIBILIDADE (S_{min}) OBTIDOS PARA ALGUNS VALORES DE RESOLUÇÃO EM FREQÜÊNCIA (Δf), TEMPO DE VARREDURA (ΔT) E BANDA DE FREQÜÊNCIA DE OBSERVAÇÃO (f)

f (MHz)	S_{min} (u.f.s.)				ΔT (ms)
±50	45,2	15,1	4,5	1,5	100
±50	32,0	10,5	3,2	1,1	200
±100	64,0	21,3	6,4	2,1	100
±100	45,2	15,1	4,5	1,5	200
	100	300	1000	3000	
	Δf (kHz)				

CAPÍTULO 3

OBSERVAÇÕES

3.1 OBSERVAÇÕES INICIAIS

As primeiras observações com o espectrógrafo decimétrico solar de alta sensibilidade e alta resolução temporal e em freqüência (AS–RTF) foram realizadas durante aproximadamente um mês, entre dezembro de 1990 e janeiro de 1991, no Modo Trânsito Solar (MTS), ou seja, mantendo a antena estacionária, enquanto o sol, no seu movimento aparente, cruzava a figura de radiação do espectrógrafo. Além disso, entre dezembro e janeiro, houve variação da declinação do sol, de modo que as amplitudes das figuras de radiação também variaram. A banda de freqüência das observações foi (1600 $\pm$ 50) MHz, a resolução temporal 50 ms e a resolução espectral 300 kHz, além disso, foi feita diariamente uma calibração em intensidade do sinal de 10 dB.

O objetivo destas observações foi testar as características da antena e do sistema receptor (e.g. largura do feixe da antena a meia potência (HPBW), presença ou não de lobos secundários, diferenças entre os níveis de sinal do receptor, do céu e do sol calmo, etc.), como mostra a Figura 3.1.

Os registros das observações feitas para 22 dias (6 dias em dezembro de 1990 e 16 em janeiro de 1991), conforme descrito acima, foram reunidos na Figura 3.2, onde pode–se notar que os valores de largura do feixe da antena a meia potência obtidos diariamente ($\sim 1.5^{\circ}$), concordam com os valores fornecidos pela fábrica Harald (Figuras 2.5 e 2.6).

Através destas observações foi constatada a presença de um lobo secundário, cerca de $2{,}46^{\circ}$ a oeste (O) do lobo pricipal, que também pode ser observado pela Figura 3.2.

Usando a calibração de 10 dB foram obtidas as amplitudes normalizadas (An) das figuras de radiação obtidas, de modo a evidenciar o comportamento da figura de radiação em relação a direção Norte–Sul (NS) (Figura 3.3). Através das efemérides astronômicas (Anuário Astronômico, 1991), foi possível obter o deslocamento angular do sol na direção NS neste período de observação e, com isso, calcular a HPBW nesta direção, sendo encontrado aproximadamente $1{,}65^{\circ}$. Este resultado permite uma noção tridimensional da figura de radiação da antena.

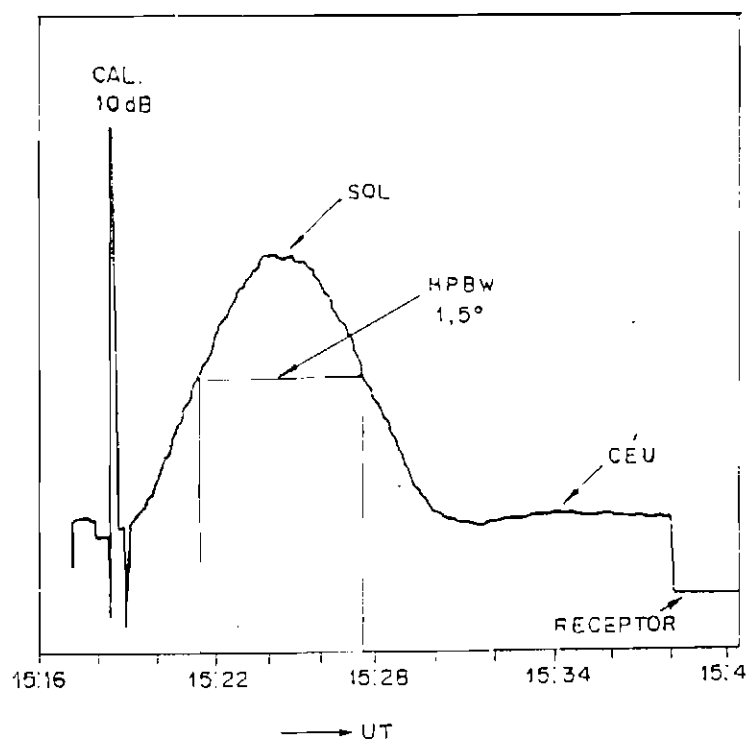

Fig. 3.1 - Figura de radiação da antena, obtida em 19/01/91, através do Modo Trânsito Solar (MTS), mostrando a largura do feixe a meia potência (HPBW) de 1,5°, a calibração de 10 dB e os níveis de sinal do sol, do céu e do receptor.

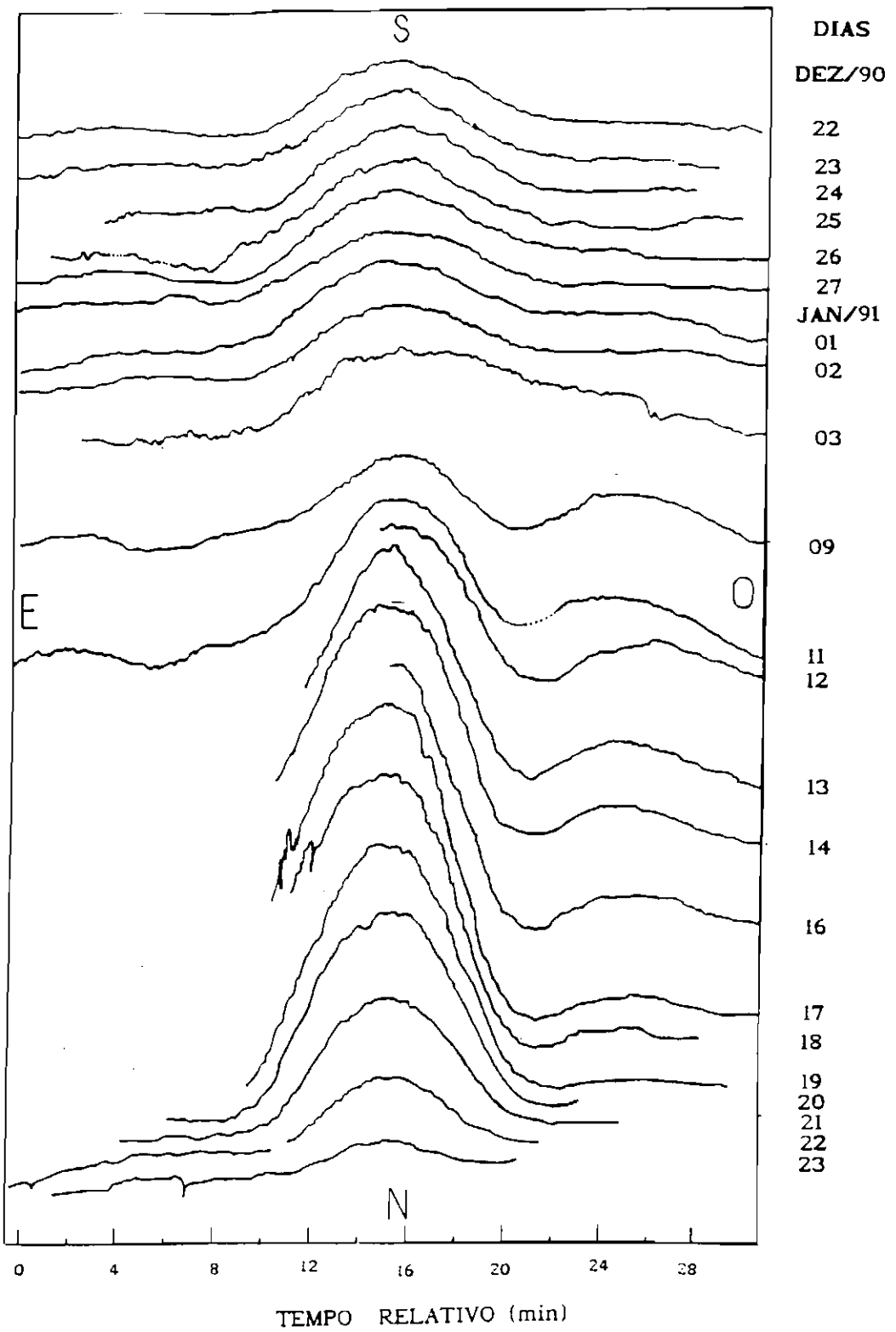

Fig. 3.2 - Figuras de radiação do espectrógrafo decimétrico obtidas entre dezembro de 1990 e janeiro de 1991, pelo MTS.

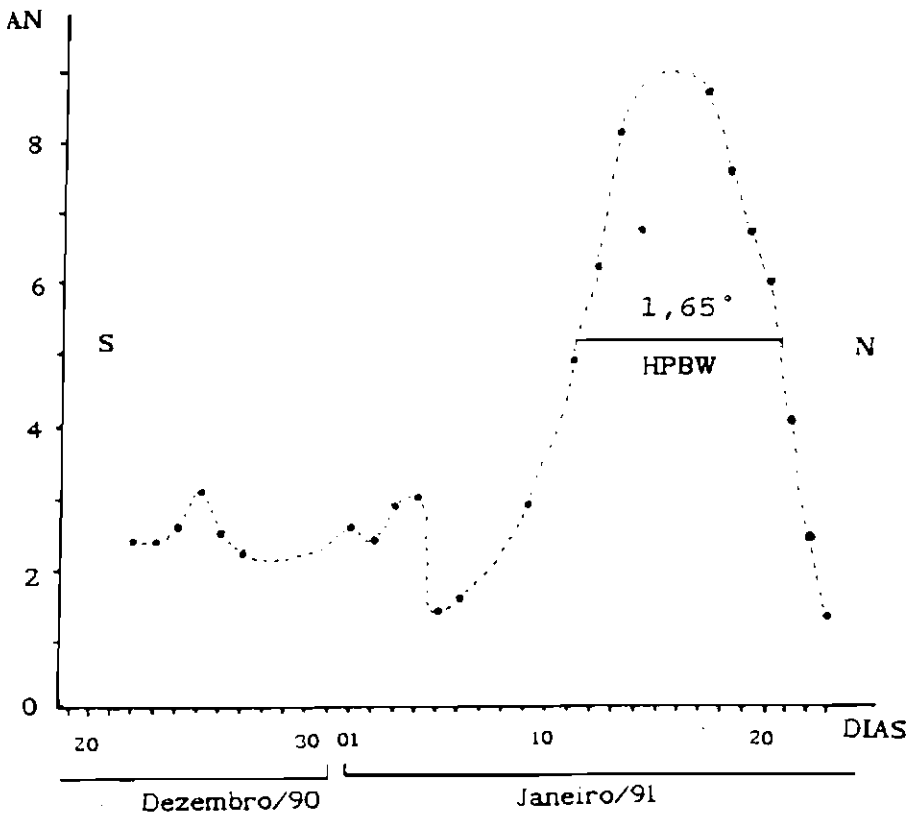

Fig. 3.3 - Perfil da figura de radiação da antena na direção Norte-Sul, obtida através da normalização das amplitudes (An) medidas pelo MTS. A largura do feixe a meia potência (HPBW) obtida é $\sim 1{,}65^{\circ}$.

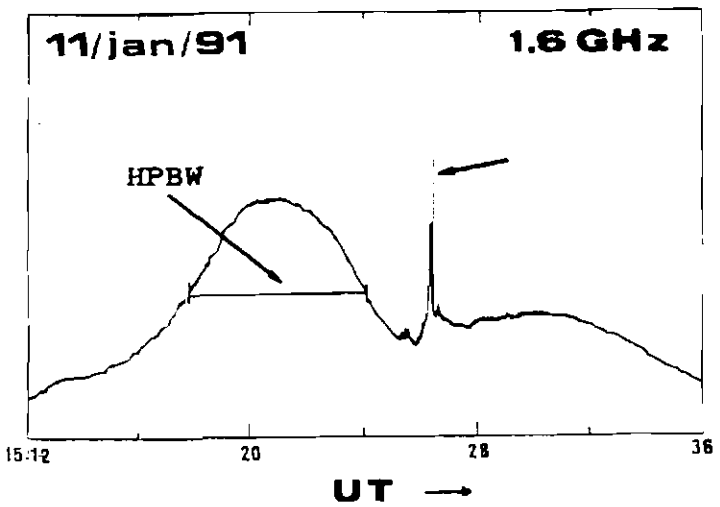

Fig. 3.4 - Primeira explosão solar observada com o espectrógrafo decimétrico de AS–RTF, em 11/01/91.

Durante este primeiro mês de observações foi registrada, no dia 11 de janeiro de 1991 (~ 15:26 UT), a primeira explosão solar observada com o espectrógrafo decimétrico de AS–RTF (Figura 3.4). A ocorrência desta explosão foi confirmada pelo SGD (1991), como sendo um flare de grande porte, associado com explosões métricas tipo II, tipo IIIG e tipo IIIRS, entre 15:24 e 15:29 UT. As densidades de fluxo detectadas em microondas para as freqüências de 8800, 2800 e 2695 MHz foram, respectivamente, 1300, 694 e 600 u.f.s. (SGD, 1991).

3.2 OBSERVAÇÕES SOLARES SISTEMÁTICAS

As observações solares sistemáticas com o espectrógrafo decimétrico de AS–RTF começaram no final do mês de março de 1991, utilizando apenas o registrador de papel para monitoramento e o sistema ótico para aquisição do filme (espectro dinâmico: intensidade versus freqüência tomados ao longo do tempo), pois o sistema de aquisição digital das explosões solares em tempo real começou a ser testado em outubro de 1991, sofrendo várias alterações desde então e só entrou definitivamente em funcionamento a partir de dezembro do mesmo ano. Foram incluídas neste trabalho as observações solares realizadas até janeiro de 1992.

3.2.1 PERÍODOS DE OBSERVAÇÃO

O resumo das observações realizadas desde março de 1991 até janeiro de 1992 é mostrado na Tabela 3.1, que inclui, mês a mês, o total de horas e dias de observação, o total de explosões observadas, a interferência local (IL) detectada, além dos parâmetros de operação utilizados nos períodos de observação citados a seguir.

TABELA 3.1 - RESUMO DAS OBSERVAÇÕES SOLARES REALIZADAS ENTRE MARÇO DE 1991 E JANEIRO DE 1992

MÊS	ANO	OBSERVAÇÃO (Dias)	OBSERVAÇÃO (Horas)	IL (Horas)	EXPLOSÕES	ΔT (ms)	Δf (MHz)	f (MHz)
mar.	91	02	5,0	0,0	0	20	1,0	100
abr.	91	13	49,8	4,7	0	20	1,0	100
mai.	91	14	47,2	0,2	9	100	1,0	100
jun.	91	11	42,7	5,9	18	100	1,0	100
jul.	91	06	21,3	1,7	6	100	1,0	100
ago.	91	11	450,2	4,7	20	100	1,0	100
set.	91	24	122,0	3,2	61	100	3,0	200
out.	91	23	131,5	1,9	17	100	3,0	200
nov.	91	02	6,5	3,5	2	100	3,0	200
dez.	91	01	4,0	0,5	0	100	3,0	200
jan.	92	14	152,4	11,1	28	100	3,0	200
TOTAL		144	546,3	37,6	161			

3.2.1.1 MARÇO E ABRIL DE 1991

As observações realizadas nestes dois primeiros meses serviram principalmente para testar e ajustar o funcionamento do sistema ótico de aquisição do espectro dinâmico, afim de obter a configuração que fornecesse a melhor relação entre a intensidade do osciloscópio e a focalização da imagem e a velocidade da câmera filmadora.

Os parâmetros observacionais usados foram: largura de banda de observação (f) de 100 MHz, centrada em 1600 MHz, resolução temporal (ΔT) de 20 ms e resolução espectral (Δf) de 1 MHz.

Entre os dias 01 e 21 de abril de 1991, as observações solares foram realizadas juntamente com o "Metsähovi Radio Research Station" (23 e 37 GHz), localizado na Finlândia e também com o radiômetro milimétrico (18–23 GHz) de

freqüência variável do Rádio Observatório de Itapetinga (ROI), em Atibaia, SP. No entanto, a atividade solar neste período foi muito baixa, e nenhuma explosão foi detectada pelo espectrógrafo decimétrico.

3.2.1.2 MAIO, JUNHO, JULHO E AGOSTO DE 1991

Entre 11 de maio e 10 de agosto, as observações solares foram feitas com uma resolução espectral de 1 MHz e a partir do dia 14 de agosto, a resolução foi alterada para 3 MHz, sendo mantidas a resolução temporal (100 ms) e a banda de freqüência das observações (1600 $\pm$ 50 MHz).

O total de explosões observadas neste período foi 41 explosões tipo III decimétricas (TIII-dm), 11 explosões tipo contínuo difuso (microondas) e uma emissão de plasma não classificada (analisada na seção 4.7 desta dissertação).

3.2.1.3 SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO DE 1991

As observações foram feitas com uma banda de 100 MHz até o dia 20 de setembro e particularmente no dia 8 de novembro, nos demais dias a banda usada foi 200 MHz. Não foram alteradas as resoluções temporal (100 ms) e espectral (3 MHz).

Entre os dias 03 e 17 de outubro de 1991, as observações solares do espectrógrafo decimétrico integraram a campanha internacional de observação solar: "Flares 22/MAX'91 Campaign Action", promovida pelo "Compton Gamma Ray Observatory" (GRO), que envolveu observatórios solares do mundo todo. Foram detectadas 3 explosões coincidentes com "flares" observados pela campanha (07/15:31 UT, 14/12:46 UT e 14/17:39 UT).

No dia 8 de novembro duas explosões observadas coincidiram com eventos detectados em "Very Low Frequency" (VLF) no Rádio Observatório de Itapetinga (ROI), em Atibaia (08/12:25 UT e 08/17:00 UT).

Ao todo foram observadas 65 explosões tipo III-dm e cerca de 15 emissões em microondas (contínuo).

3.2.1.4 DEZEMBRO DE 1991 E JANEIRO DE 1992

No final do mês de dezembro, o sistema digital de aquisição dos dados começou a ser usado, paralelamente ao sitema ótico e ao monitoramento em papel.

Entre os dias 03 e 21 de janeiro de 1992, as observações foram feitas juntamente com o ROI (18–23 GHz), o que possibilitou a observação simultânea de

uma explosão solar tipo III (04/13:41 UT). E entre 06 e 17 também de janeiro de 1992, o espectrógrafo decimétrico tomou parte de mais um "Flares 22/MAX'91 Campaign Action", realizada em decorrência do lançamento do balão "HIgh REsolution Gamma–ray and hard x–ray Spectrometer" (HIREGS), para observação solar na faixa de raios–X e raios–γ. O lançamento ocorreu no dia 09 de janeiro, na Antártica. Dentre as explosções solares observadas por outros observatórios durante a campanha, uma delas foi observada também pelo o espectrógrafo decimétrico, (12/14:34 UT), apresentando aspecto de emissão em microondas.

O número total de explosões solares observadas nestes dois meses foi 22 do tipo III–dm e 7 emissões do tipo microondas, das quais, foram digitalizadas, respectivamente, 7 e 2 explosões.

3.2.2 INTERFERÊNCIA LOCAL

A interferência local, referida na Tabela 3.1, corresponde, em número de horas, a menos de 7 % do total de horas de observação e engloba dois tipos distintos de interferência detectada:

1) Interferência em uma freqüência fixa, não acarreta grandes problemas, pois aparece, no espectro dinâmico (filme), como um linha horizontal, podendo ser facilmente eliminada deslocando–se a banda de freqüência de observação, no analisador espectral. Devido a sua precisão, pode inclusive servir como calibração em freqüência. Este foi o tipo de interferência de maior incidência registrado, cuja duração variou desde alguns minutos a dezenas de minutos, às vezes ocorrendo de forma contínua e às vezes intermitentemente (Figura 3.5).

2) Interferência tipo "sudden DC shift" (deslocamento instantâneo da tensão), geralmente ocorrendo em períodos de minutos, alternando quedas e aumentos bruscos de tensão. No filme, este tipo de interferência se manifesta exatamente como uma alternância de faixas intensas e fracas, muitas vezes em intervalos de tempo iguais.

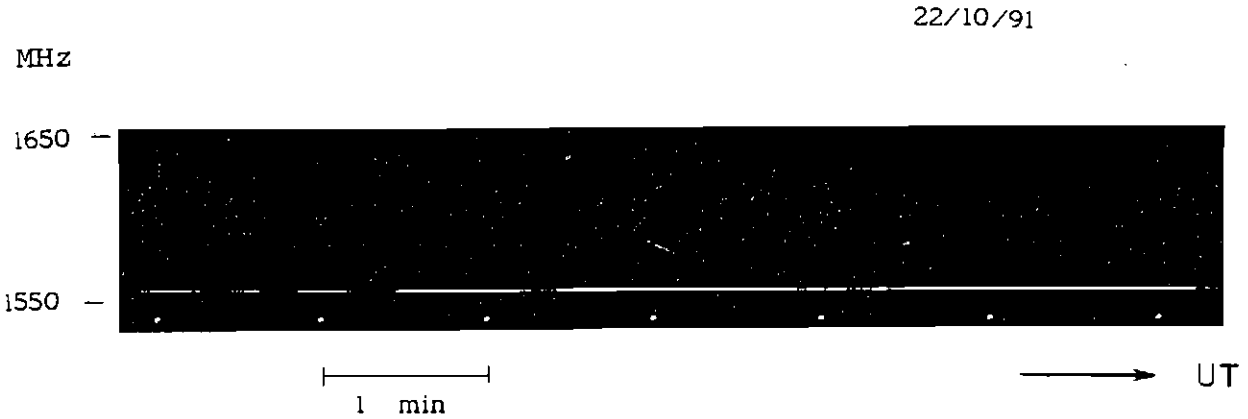

Fig. 3.5 - Espectro dinâmico mostrando interferência em freqüência fixa (~ 1570 MHz).

3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS EXPLOSÕES SOLARES OBSERVADAS

Baseado nas características morfológicas das explosões solares evidenciadas no espectro dinâmico (filme), elas foram divididas em dois grupos, de acordo com o mecanismo assumido como responsável pela emissão:

1) Emissão de plasma (explosões tipo III e variantes), cujas principais características são:
   a) duração: ≤ 2 s;
   b) presença de taxa de deriva em freqüência e
   c) possível presença de estruturas finas em freqüência.
2) Emissão em microondas (girossicrotrônica), caracterizada por:
   a) duração: de segundos a minutos;
   b) aspecto difuso;
   c) não apresenta taxa de deriva em freqüência e
   d) não apresenta estrutura fina em freqüência.

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 mostram exemplos de explosões classificadas, de acordo com as características dadas acima, como emissão de plasma e emissão em microondas.

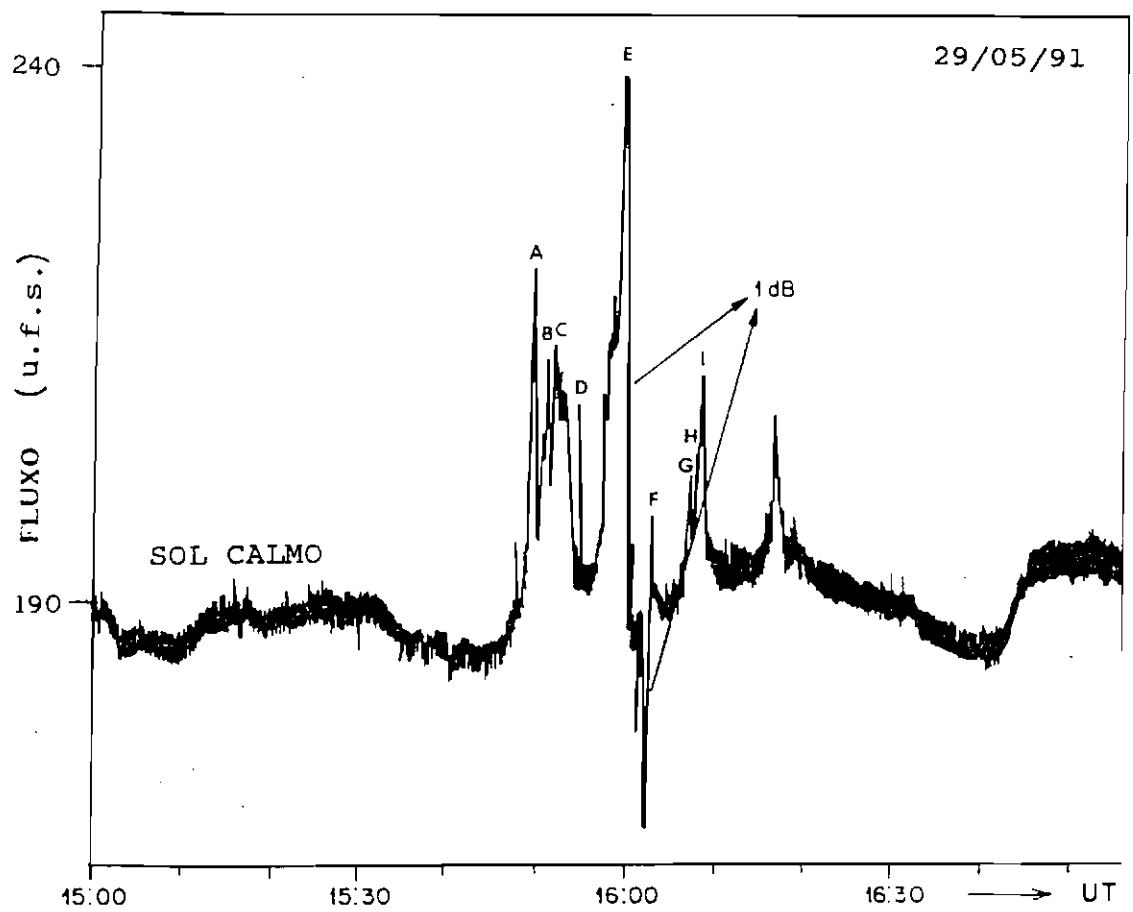

Fig. 3.6 - Explosões solares observadas em 29 de maio de 1991, cujo espectro dinâmico é mostrado na Figura 3.7.

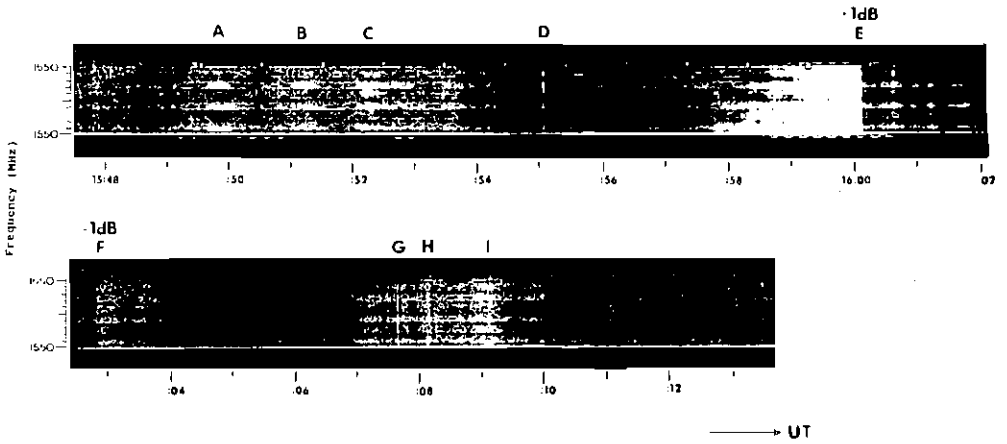

Fig. 3.7 - Espectro dinâmico das explosões solares observadas em 29 de maio de 1991. Os pontos D, G e H assinalam explosões tipo III–dm (emissão de plasma), de curta duração (< 3 s). Os pontos A, B, C, E, F e I representam explosões contínuas em microondas, originadas do processo de emissão girossincrotrônico. Entre os pontos E e F o sinal foi atenuado em 1 dB.

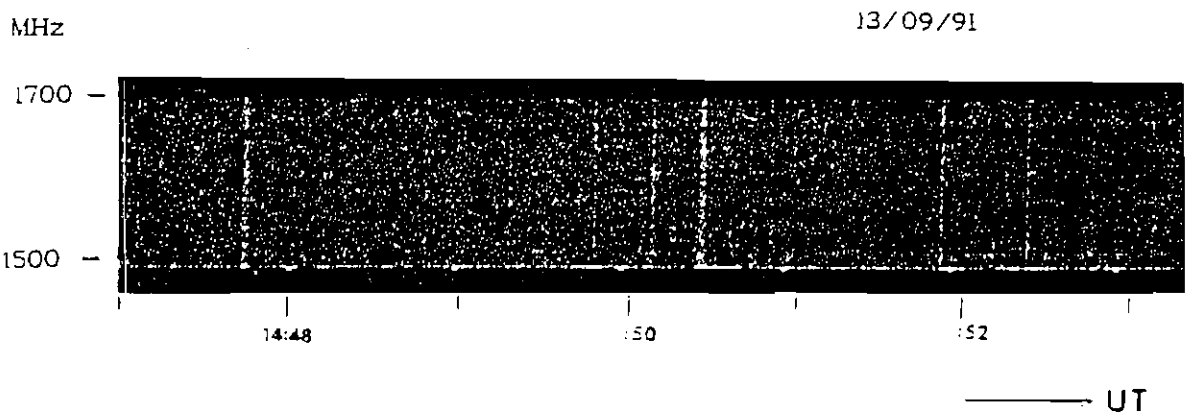

Fig. 3.8 - Espectro dinâmico mostrando um grupo de explosões solares tipo III–dm.

Fig. 3.9 - Espectro dinâmico de emissão solar girossincrotrônica.

De acordo com esta classificação, foram contabilizadas 129 emissões de plasma: 128 explosões do tipo III–dm, incluindo 42 explosões do tipo IIIG (grupo com 10 ou menos explosões tipo III)[1] e tipo IIIGG (grupo com mais de 10 explosões tipo III)[1] e uma explosão não classificada. Sendo que, destas 128 explosões tipo III–dm, 7 foram digitalizadas.

As demais explosões (33) foram classificadas como emissão girossincrotrônica, sendo que duas destas explosões foram digitalizadas, duas coincidiram com eventos em VLF registrados no ROI e outras duas coincidiram com explosões tipo IV (SGD, 1991).

Não houve evidência de explosões tipo "blips" ou "spikes" durante estes períodos de observações.

Como o foco de interesse deste trabalho é a análise preliminar das explosões solares decimétricas causadas por emissão de plasma, serão descartadas aquelas explosões causadas por processo girossincrotrônico e do tipo IV, que contribuem apenas para atestar e ilustrar o bom funcionamento do espectrógrafo decimétrico solar.

Enquanto que as 129 emissões de plasma (tipo III–dm e variantes) passaram por uma triagem, sendo selecionadas para análise preliminar 44 grupos de explosões tipo III–dm (Apêndice F), que corresponderam a um total de cerca de 100 explosões solares tipo III–dm individuais.

[1]Nomenclatura utilizada pelo SGD.

O critério de seleção utilizado foi principalmente a intensidade das explosões individuais no espectro dinâmico, de modo que foram excluídas aquelas cuja baixa intensidade (densidade de fluxo $\leq$ 0,5 dB acima do nível do sol calmo), impossibilitava ou tornavam imprecisas as determinações, através do espectro dinâmico (filme), da duração, largura de banda e taxa de deriva em freqüência.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES

4.1 INTRODUÇÃO

A análise que constitui o presente capítulo refere-se à obtenção de alguns parâmetros intrínsecos apenas para as explosões solares tipo III decimétricas (TIII-dm) selecionadas, como referido no capítulo anterior. O termo "preliminar" foi usado pois, para esta análise foram utilizados os registros em filme (espectro dinâmico) das explosões solares TIII-dm, excetuando-se cerca de 10 explosões digitalizadas que foram incluídas na análise. Desta forma, pode-se dizer que houve uma estimativa destes parâmetros observacionais, não uma determinação definitiva. O interesse foi justamente obter as ordens de grandeza dos parâmetros estimados, ou seja, o comportamento médio da amostra, a partir do qual foram inferidas informações sobre o feixe de elétrons responsável pela emissão.

Cabe ressaltar que a análise realizada, que será apresentada no presente capítulo, mesmo que preliminar, constitui os primeiros estudos sistemáticos de explosões solares realizados na faixa de freqüência entre 1 e 3 GHz, conforme pode ser constatado através da Tabela 4.1, que reúne os estudos de explosões solares decimétricas publicados até 1991.

A última seção deste capítulo foi reservada à uma breve discussão a respeito da explosão solar não classificada, registrada através do espectrógrafo decimétrico em junho de 1991.

TABELA 4.1 - CONTEXTO ATUAL DOS ESTUDOS DE EXPLOSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS

Freqüência (GHz)	Tipo de Explosão	Referência
0,1 - 1,0	III, IIIRS	Wiehl et al. (1985)
0,6 - 1,0	"blips"	Fürst et al. (1982)
1,6	"blips"	Sawant et al. (1987)
1,6	III	Sawant et al. (1990)
0,1 - 3,0	III	Benz et al. (1991)
3,0	III	Stäli e Benz (1987)

4.2 PARÂMETROS OBSERVACIONAIS DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII-dm

A partir do espectro dinâmico de uma explosão solar tipo III–dm foram obtidos os seguintes parâmetros observacionais: a duração total da explosão, a largura de banda em freqüência, além de uma estimativa da densidade de fluxo da explosão, feita através da calibração em intensidade (seção 2.10.1 desta dissertação).

A instrumentação (projetor/ampliador) utilizada para analisar os filmes (espectros dinâmicos) possibilitou uma ampliação das imagens inicialmente em 10 vezes e posteriormente em cerca de 90 vezes. Nas imagens ampliadas 10 vezes, considerando que a resolução espacial das medidas (menor dimensão possível de se medir), foi tomada como sendo 1 mm, que corresponde a um deslocamento de aproximadamente 0,3 segundos no filme (velocidade do filme $\sim$ 2 cm/min), o limite superior de taxa de deriva em freqüência possível de observar, nos espectros dinâmicos obtidos, foi $\sim$ 330 MHz/s, para os filmes com banda total de observação de 100 MHz e $\sim$ 660 MHz/s, para os filmes com banda total de observação de 200 MHz. Portanto, com esta ampliação não foi posível obter boas estimativas das taxas de deriva em freqüência das explosões analisadas.

Quando os espectros dinâmicos foram analisados com uma ampliação de cerca de 90 vezes, a resolução espacial das medidas melhorou, de forma que foi possível estimar as taxas de deriva com melhor precisão.

Os diversos parâmetros obtidos da análise das explosões são apresentados um a um nas seções a seguir.

4.2.1 DENSIDADE DE FLUXO DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII–dm

Usando dados extraídos do "Solar Geophysical Data" (SGD), foram calculadas as densidades de fluxo do sol calmo em 1600 MHz, para os respectivos dias das explosões observadas, através do método de interpolação proposto por Guidice e Castelli (1971), apresentado na seção 2.14 desta dissertação.

Uma vez obtido o valor da densidade de fluxo do "background" solar, foram estimados os fluxos (S_S), acima do nível do sol calmo emitidos durante cada explosão observada, usando a calibração em intensidade do espectro dinâmico (1 a 3 dB acima do "background" solar).

A Figura 4.1 mostra o histograma de freqüência das densidades de fluxo estimadas para 91 explosões solares tipo III–dm (os dados de densidade de fluxo do sol calmo, do "Solar Geophysical Data", para 9 explosões individuais observadas em janeiro de 1992, não estavam disponíveis). A densidade de fluxo média

obtida foi 32,0 u.f.s., sendo 12,9 e 90,0 u.f.s. os valores mínimo e máximo obtidos, respectivamente.

De certa forma, estes valores são tendenciosos, pois foram incluídas na análise apenas as explosões solares mais intensas, (S > 0,5 dB acima do nível do sol calmo, que correspondeu a um fluxo sempre maior que 10 u.f.s.), isto significa que, na prática, foram tomadas apenas as explosões mais nítidas no filme, de modo que, certamente, como as densidades de fluxo estão diretamente relacionadas com a intensidade das explosões observadas, o fato de se descartar as explosões muito fracas, faz com que os valores de densidade de fluxo obtidos estejam, até certo ponto, superestimados.

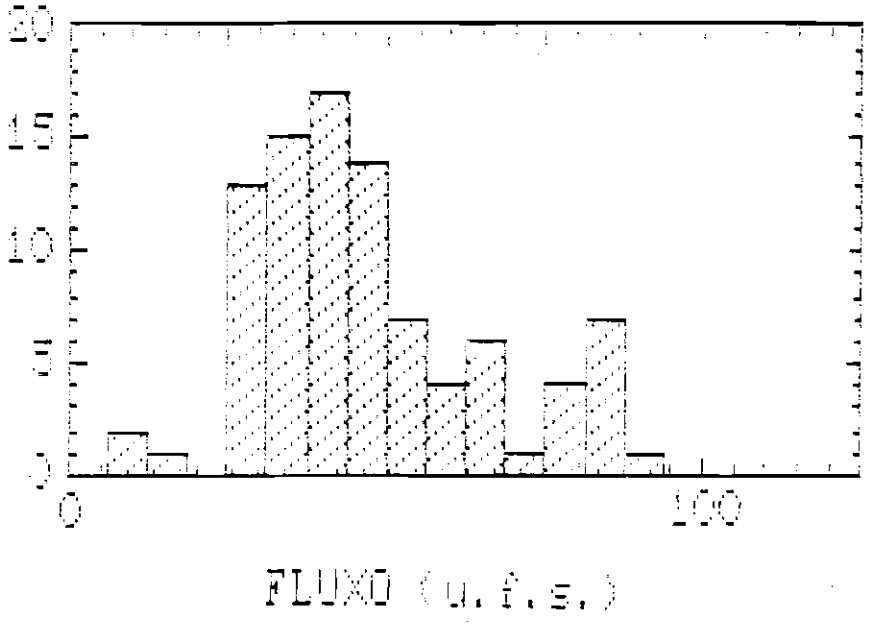

Fig. 4.1 - Histograma de freqüência dos valores de densidade de fluxo de 91 explosões solares tipo III–dm individuais analisadas.

4.2.2 DURAÇÃO DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII–dm

Os valores de duração total, definida como o intervalo de tempo tomado para 50 % do valor do fluxo máximo, obtidos para 100 explosões tipo III–dm individuais analisadas são mostrados no histograma da Figura 4.2. O valor médio obtido foi ~ 740 ms, e as durações obtidas ficaram entre ~ 280 ms e 1500 ms.

Dentre as 100 explosões solares tipo III–dm individuais analisadas, cerca de 75 % apresentaram duração total inferior a 1 s, para estas explosões o valor médio da duração foi $\sim$ 585 ms.

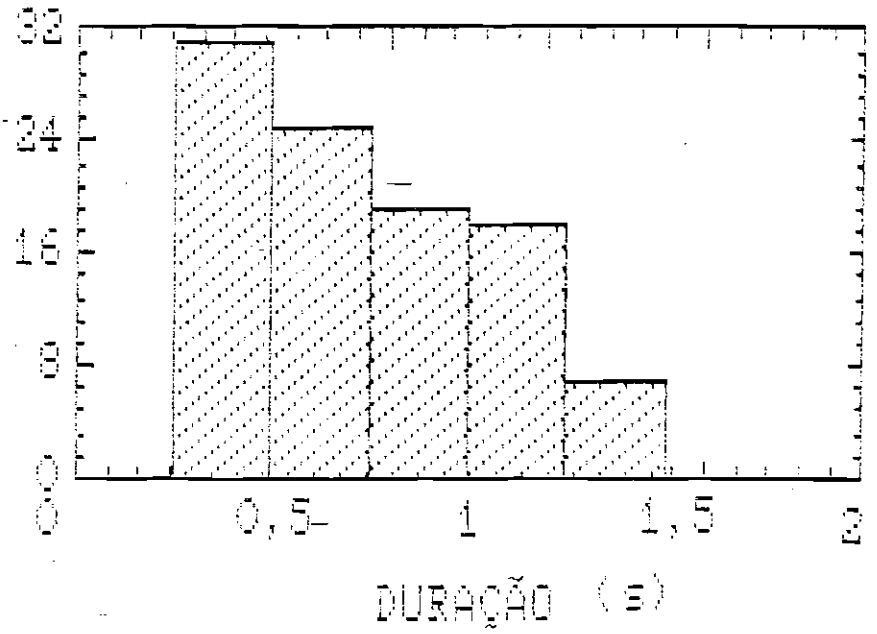

Fig. 4.2 - Histograma de freqüência das durações totais de 100 explosões tipo III–dm analisadas. A duração média obtida é $\sim$ 740 ms.

Apenas 11 explosões individuais digitalizadas foram investigadas, das quais, 3 apresentaram duração total $\leq$ 200 ms, de modo a não ser possível a obtenção de um perfil temporal da explosão apenas com 2 ou 3 varreduras (pontos). Assim, foram incluídas na análise estatística apenas 8 explosões individuais. A Figura 4.3 mostra o gráfico tri–dimensional (freqüência versus tempo versus intensidade) de uma destas explosões solares tipo III–dm incluídas na análise.

A partir do perfil temporal das explosões digitalizadas, foram construídos gráficos do logarítimo do fluxo (S) versus tempo (t), como mostrado na Figura 4.4, a partir dos quais, foram determinadas as durações totais das explosões digitalizadas.

O valor médio para as durações das 8 explosões solares tipo III–dm digitalizadas analisadas é de $\sim$ 328 ms e a Figura 4.5 mostra o histograma das durações totais obtidas.

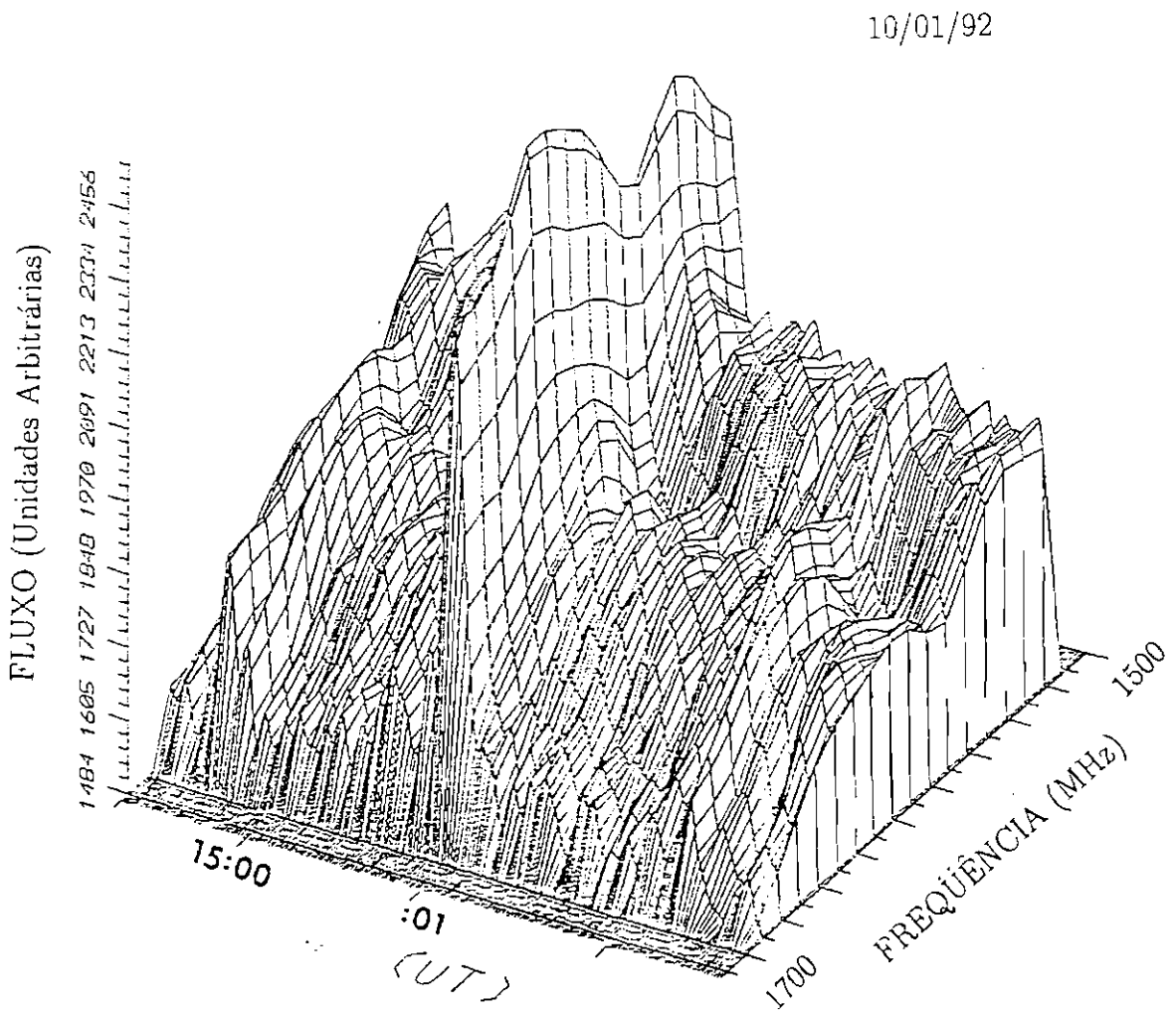

Fig. 4.3 - Gráfico tri-dimensional de uma explosão solar tipo III-dm, observada em 10 de janeiro de 1992 na faixa de freqüência de 1500 a 1700 MHz.

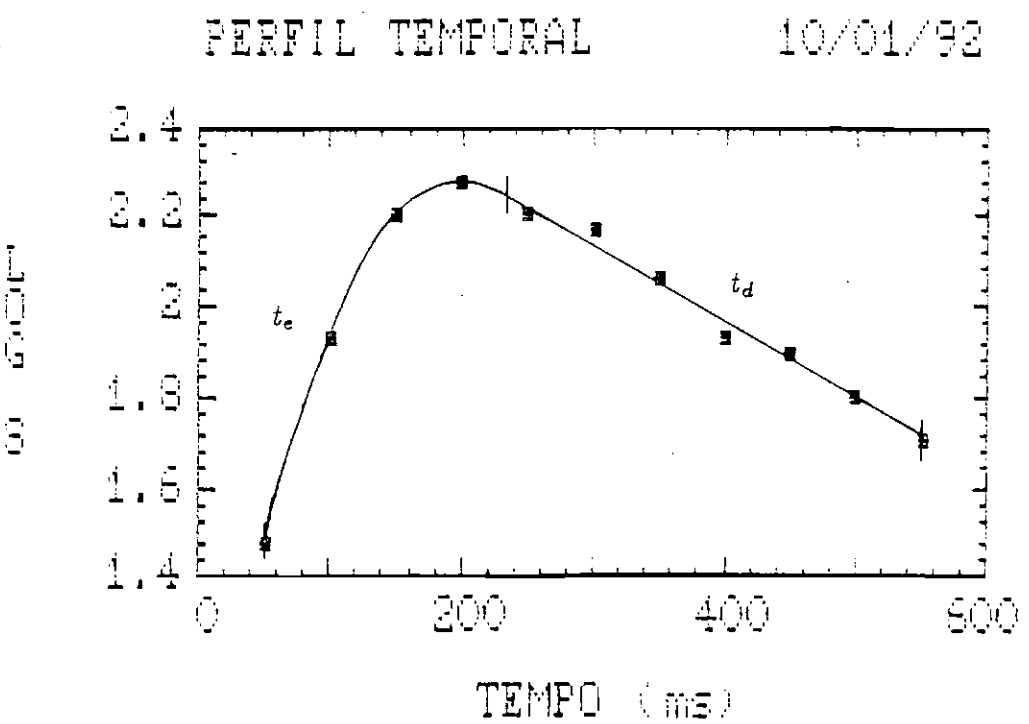

Fig. 4.4 - Gráfico do logarítimo da densidade de fluxo versus tempo, de uma explosão solar tipo III–dm observada em 10 de janeiro de 1992.

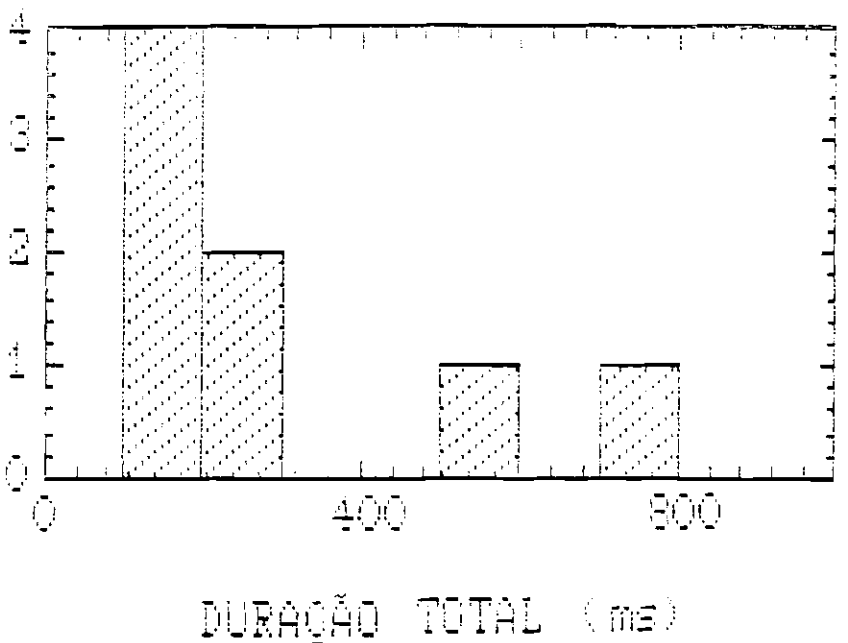

Fig. 4.5 - Histograma de freqüência das durações totais das 8 explosões solares tipo III–dm digitalizadas. A duração média é $\sim$ 328 ms.

4.2.3 TAXAS DE DERIVA EM FREQÜÊNCIA DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII–dm

Conforme mencionado na introdução deste capítulo, através da ampliação dos espectros dinâmicos das explosões solares tipo III–dm selecionadas em cerca de 90 vezes, foram estimadas as taxas de deriva em freqüência destas explosões, ou seja, a variação em freqüência da emissão com o tempo.

Os valores de taxa de deriva em freqüência obtidos ficaram compreendidos entre 350 e 3000 MHz/s, com uma incerteza na determinação de aproximadamente 300 MHz/s. 100 % das explosões analisadas apresentaram taxa de deriva "Reverse Slope", isto é, de baixas para altas freqüências (sugerindo um deslocamento do feixe de elétrons na atmosfera solar rumo à baixa cromosfera), portanto estas explosões serão referidas daqui em diante por explosões tipo IIIRS–dm.

A Figura 4.6 apresenta um histograma com os valores de taxas de deriva em freqüência estimados para as explosões tipo IIIRS–dm.

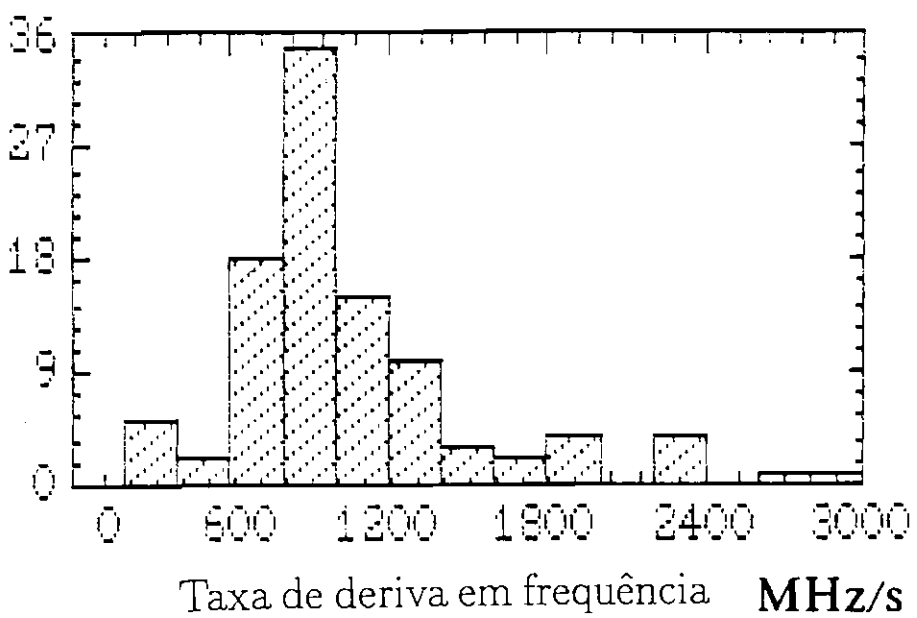

Fig. 4.6 - Histograma de freqüência das taxas de deriva das explosões solares tipo IIIRS–dm.

Estes valores também foram plotados juntamente com os valores de taxa de deriva obtidos por Stähli e Benz (1987), para explosões solares tipo III métricas (< 500 MHz) e em microondas (~ 3500 MHz), conforme mostrado na Figura 4.7.

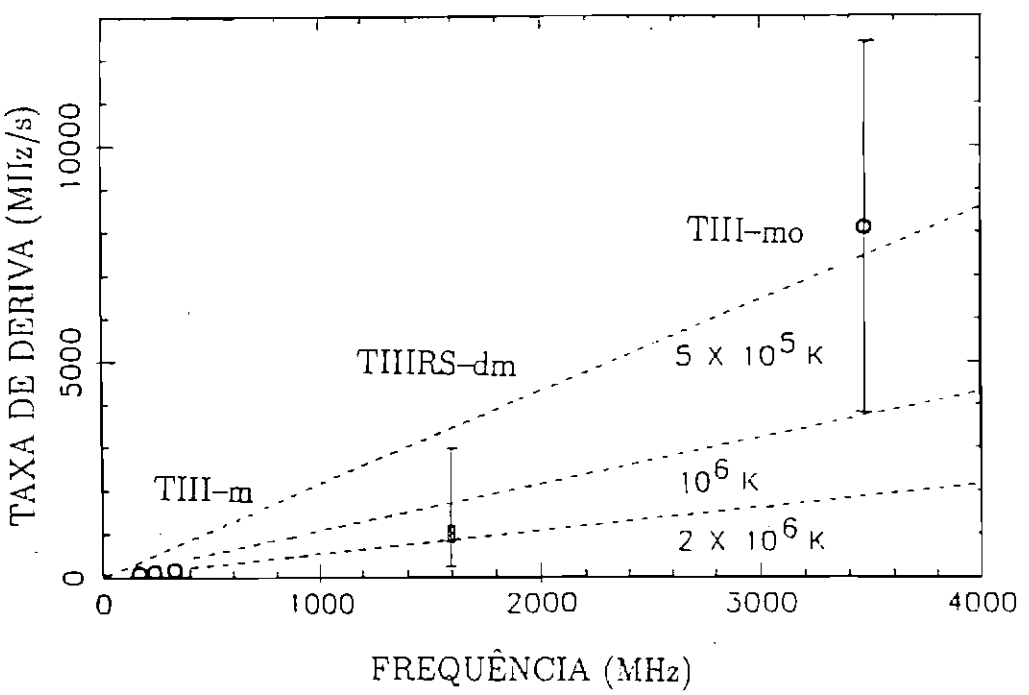

Fig. 4.7 - Gráfico da taxa de deriva em freqüência versus freqüência das explosões solares tipo IIIRS-dm, juntamente com os valores obtidos por Stähli e Benz (1987) para explosões solares tipo III métricas (TIII-m) e em microondas (TIII-mo).
FONTE: Adaptada de Stähli e Benz (1987), p. 273.

4.3 PARÂMETROS DE PLASMA

4.3.1 DENSIDADE DE ELÉTRONS

A densidade de elétrons (N_e) da atmosfera solar, dada em cm^{-3}, está relacionada com a freqüência de plasma (f_p) pela seguinte equação (McLean, 1985, p. 93):

$$f \simeq 8,98 \times 10^{-3} \sqrt{N_e} \text{ (MHz)}. \tag{4.1}$$

As explosões solares observadas na faixa decimétrica, em torno de 1600 MHz, podem tanto ser provenientes de emissões no estado fundamental (f_p), quanto no segundo harmônico ($2f_p$). Os valores de densidade de elétrons obtidos da Equação (4.1) para a emissão em 1600 MHz, no estado fundamental e no segundo harmônico, (freqüência de plasma igual a metade da freqüência observada), são, respectivamente, $\sim 7{,}94 \times 10^9$ e $\sim 3{,}17 \times 10^{10}$ cm^{-3}.

4.3.2 ALTITUDE HELIOCÊNTRICA

Conhecendo a densidade de elétrons (N_e), do meio, correspondente a uma dada freqüência de plasma, é possível calcular a respectiva altitude heliocêntrica (h) da região emissora usando o modelo de Cilliè e Menzel (1935), citado por Kundu (1965, p.15). A Tabela 4.2 mostra alguns valores de altitude heliocêntrica e os respectivos valores do logarítimo da densidade de elétrons e freqüência de plasma (no estado fundamental e no segundo harmônico), fornecidos pelo modelo citado.

Com base nos valores da Tabela 4.2, foi ajustada uma reta, (coeficiente de correlação = 0,999904), cuja expressão geral é dada por:

$$h = 1,05 - 4,2 \times 10^{-3} \, logN_e, \tag{4.2}$$

onde h é obtido em unidades de raio solar (1 $R_\odot \simeq 696500$ km). O ajuste desta reta é mostrado na Figura 4.8.

TABELA 4.2 - VALORES DE DENSIDADE DE ELÉTRONS (N_e), FREQÜÊNCIA DE PLASMA (f_p) E ALTITUDE HELIOCÊNTRICA (h) OBTIDOS PELO MODELO DE CILLIÈ E MENZEL

log N_e (cm^{-3})	f_p (MHz)	2 f_p (MHz)	h ($R_\odot$)
11,76	6808	13616	1,0007
11,59	5615	11230	1,0014
11,26	3821	7642	1,0029
10,59	1769	3538	1,0058
9,92	819	1638	1,0086
8,52	176	352	1,0144

FONTE: Adaptada de Kundu (1965), p.16.

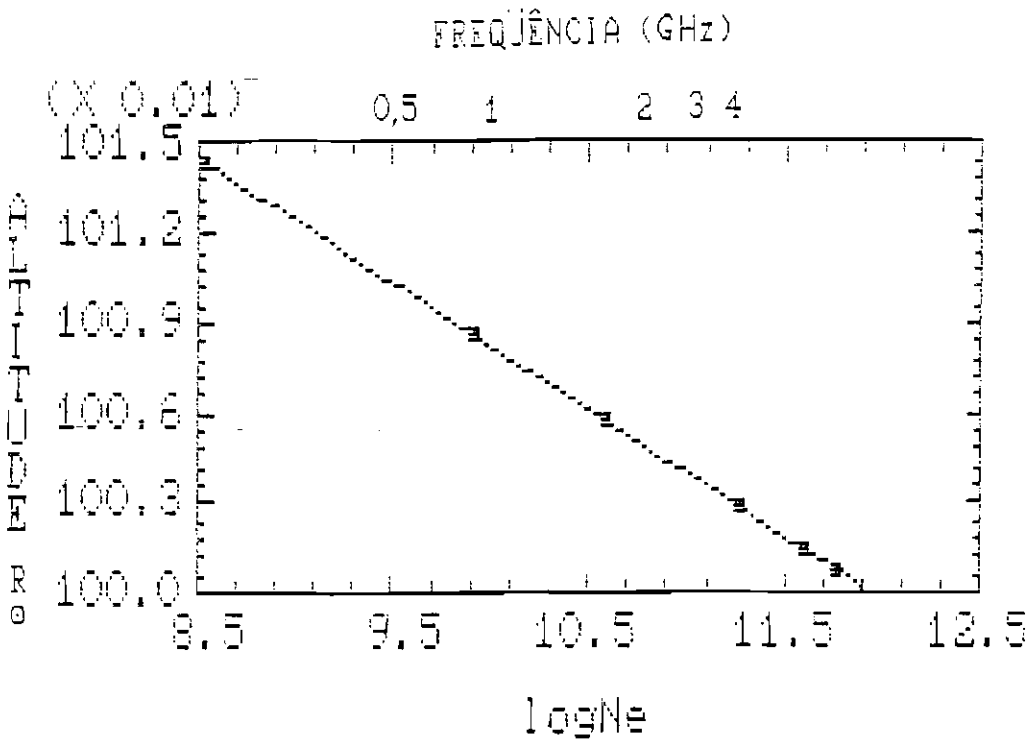

Fig. 4.8 - Ajuste da reta (Equação 4.2) de logarítimo da densidade de elétrons (N_e) e freqüência de plasma (f_p) versus altitude heliocêntrica (h), obtida dos valores da Tabela 4.2.

4.4 VELOCIDADE DO FEIXE DE ELÉTRONS

A velocidade do feixe de elétrons emissores pode ser obtida se for conhecida a taxa de deriva da emissão, nestes casos, são calculadas as densidades de elétrons relativas aos extremos da banda de freqüência da explosão (Equação 4.1). A partir destes valores, são determinadas as respectivas altitudes heliocêntricas (Equação 4.2), de forma a se obter o espaço percorrido pelo feixe dentro da atmosfera solar (diferença das altitudes). Tal espaço dividido pelo tempo que o agente excitador (feixe) levou entre os extremos da banda de freqüência, fornece a velocidade do feixe (v_f). Por sua vez, o espalhamento em velocidade do feixe (Δv_f), isto é, a diferença entre a velocidade dos elétrons mais rápidos e mais lentos do feixe, é tomado como sendo 10 % de v_f.

Medidas efetuadas com ampliação de cerca de 90 vezes do espectro dinâmico forneceram taxas de deriva entre 350 e 3000 MHz/s. A partir destes valores foram calculadas as respectivas velocidades do feixe de elétrons responsável pela emissão, no entanto, as velocidades estimadas são da ordem ou inferiores à velocidade térmica dos elétrons do meio (v_T), da ordem de 10 km/s (Rosenberg, 1973). Este fato implicaria na inexistência de um feixe de elétrons em deslocamento na atomosfera solar, no entanto, a prova da existência do feixe é a própria detecção da emissão tipo III.

Para tentar explicar estes baixos valores da velocidade do feixe duas hipóteses podem ser consideradas: que tais velocidades são devido a deslocamentos não perpendiculares à fotosfera, sendo que a velocidade obtida refere–se apenas a uma componente da velocidade real e/ou reflete uma deficiência no modelo de densidade adotado, quando se trata de regiões decimétricas da atmosfera solar (gradiente de densidade com altura maior do que o real).

Desta maneira, a velocidade do feixe de elétrons será assumida como sendo $\sim$ 0,3 c (onde c é a velocidade da luz no vácuo), (Kaplan e Tsytovich, 1973). A largura de banda instantânea (Δw) foi assumida como sendo a própria banda de freqüência de observação.

4.5 PERFIS TEMPORAIS DAS EXPLOSÕES SOLARES TIII–dm DIGITALIZADAS

4.5.1 TEMPOS DE EXCITAÇÃO E DESCIDA

Para as 8 explosões solares tipo IIIRS–dm digitalizadas, para as quais foi possível obter os perfis temporais, além dos parâmetros observacionais já mencionados, foram determinados os tempos de subida ou excitação (t_e) e de descida

(t_d), definidos em relação ao ponto de máxima intensidade da explosão e tomados com 50 % desta intensidade nos gráficos do logarítimo do fluxo versus tempo, como aquele mostrado na Figura 4.4, onde a parte linear da curva corresponde ao tempo de descida (t_d), enquanto que, o tempo de excitação (t_e) é tomado desde o início da explosão, até o início da parte linear.

Os histogramas de freqüência obtidos para os tempos de excitação e de descida das explosões, são mostrados, respectivamente, na Figura 4.9 e na Figura 4.10. Para os tempos de excitação os valores obtidos variaram de $\sim$ 117 a $\sim$ 346 ms, e para os tempos de descida de $\sim$ 45 a $\sim$ 396 ms, cujos valores médios são, respectivamente, $\sim$ 122 ms e $\sim$ 206 ms, com incertezas na determinação da ordem de 75 ms.

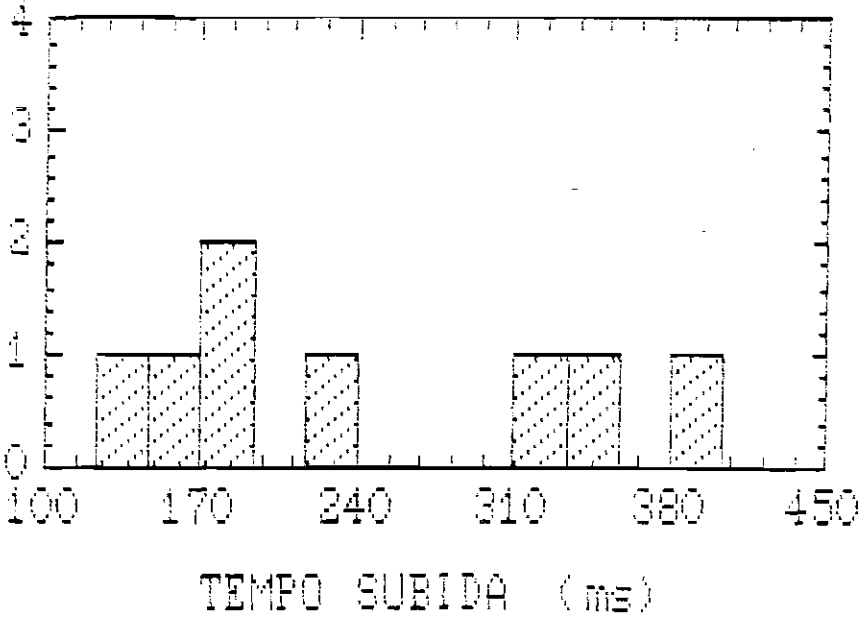

Fig. 4.9 - Histograma de freqüência dos tempos de excitação obtidos para as 8 explosões tipo IIIRS–dm digitalizadas.

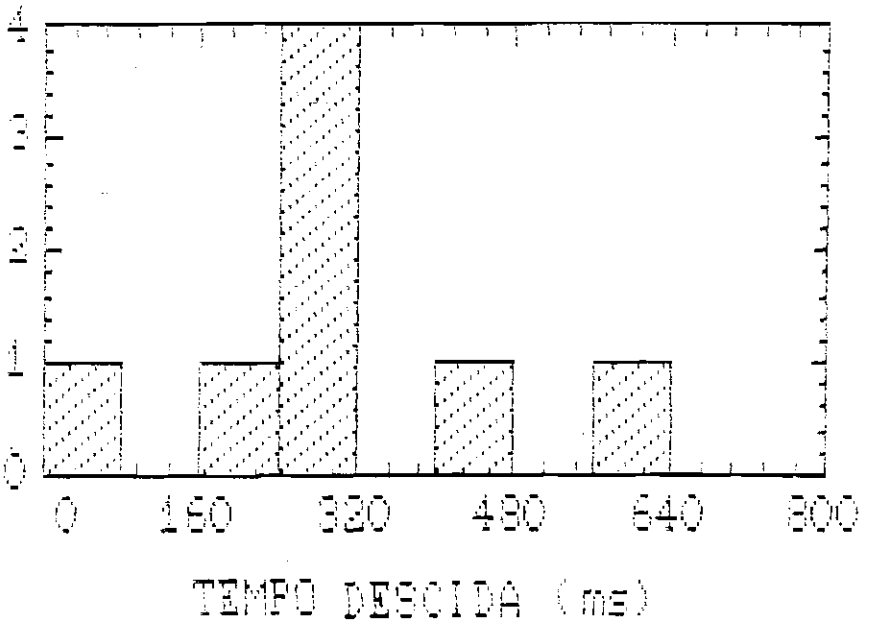

Fig. 4.10 - Histograma de freqüência dos tempos de descida obtidos para as 8 explosões tipo IIIRS–dm digitalizadas.

Alvarez e Haddock (1973) reuniram valores de tempo de descida de explosões tipo III métricas até freqüências de 300 MHz, observadas por diversos autores e obtiveram a seguinte relação empírica, assumindo que a emissão das explosões tipo III métricas ocorre no local de geração de freqüência no segundo harmônico:

$$t_d = 10^{7,71} f^{-0,95} \text{ (s)}, \tag{4.3}$$

onde f é a freqüência de observação, dada em Hz e o tempo de descida (t_d) é dado em segundos, de tal forma que, a estimativa para o tempo de descida para explosões tipo III, em 1600 MHz, é da ordem de 90 ms, assumindo emissão no segundo harmônico.

A Figura 4.11 mostra o ajuste desta curva com tempos de descida de explosões tipo III métricas até 300 MHz (Alvarez e Haddock, 1973) e atualizada com observações de explosões tipo III decimétricas, acima de 300 MHz (Benz et al., 1983) e de "blips" observados em 1663 MHz (Sawant et al, 1987). Estes resultados têm grande importância nas argumentações de que a emissão decimétrica ocorre preferivelmente no segundo harmônico.

Na Figura 4.11 foi incluído também o tempo de descida médio ($<t_d>$ $\simeq 206 \pm 75$ ms), das explosões solares tipo IIIRS–dm, que é cerca de duas vezes maior do que o tempo obtido pela relação (4.3), possivelmente devido a tendenciosidade da amostra.

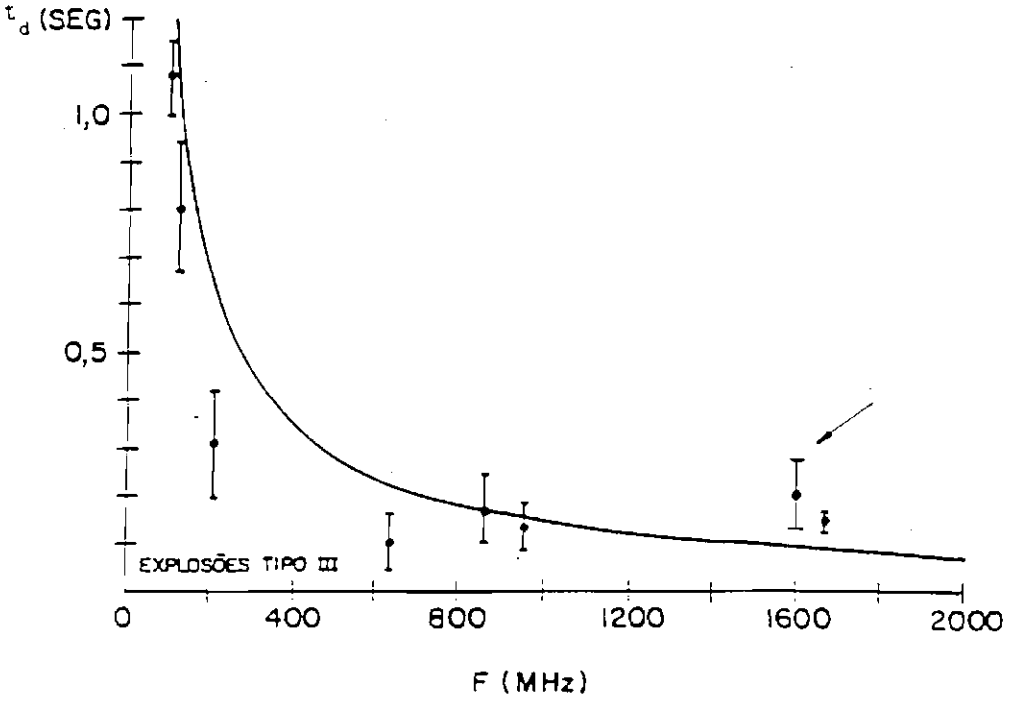

Fig. 4.11 - Gráfico do tempo de descida (t_d) versus freqüência (f) das explosões solares tipo III acima de 300 MHz. A seta indica o tempo de descida médio ($\sim 206 \pm 75$ ms), obtido das 8 explosões tipo IIIRS-dm digitalizadas, observadas com o espectrógrafo decimétrico (1600 MHz). FONTE: Adaptada de Alvarez e Haddock (1973) e atualizada com observações acima de 300 MHz (Benz et al., 1983), e em 1663 MHz (Sawant et al., 1987).

A Figura 4.12 mostra um gráfico de tempo de descida versus freqüência, no qual foi inserido o valor médio do tempo de descida das explosões solares tipo IIIRS–dm, juntamente com os valores obtidos por Stähli e Benz (1987) para explosões solares tipo III métricas e em microondas.

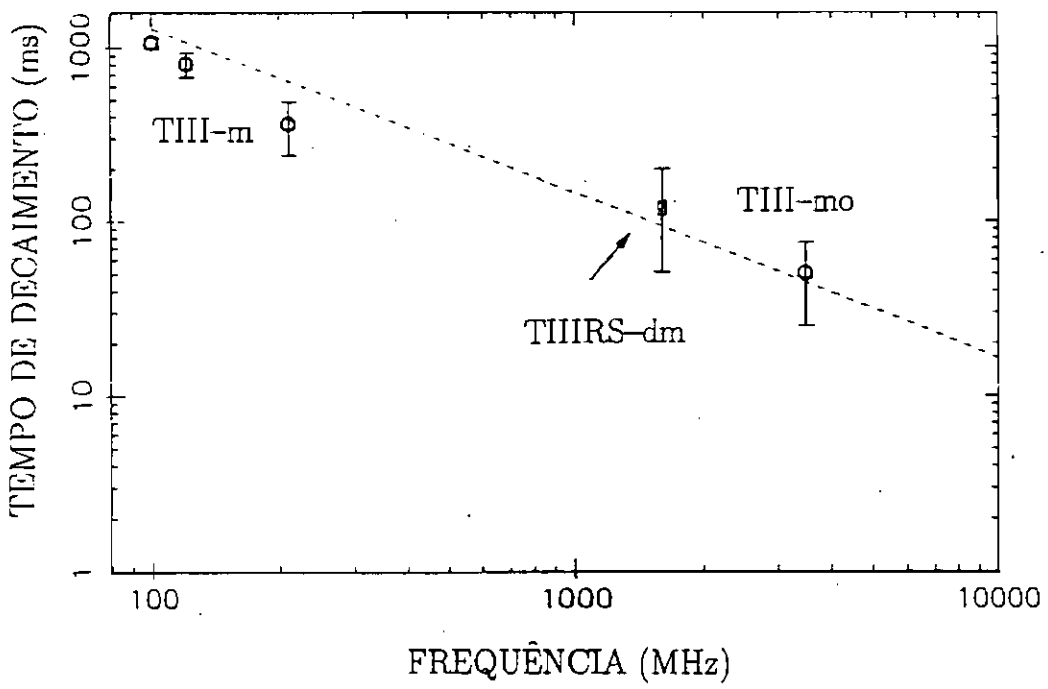

Fig. 4.12 - Gráfico mostrando os tempos de descida em função da freqüência para as explosões solares tipo III métricas e em microondas. A seta indica o tempo de descida médio estimado para as explosões solares tipo IIIRS–dm (1600 MHz).
FONTE: Adaptada de Stähli e Benz (1987), p. 274.

Além disso, foi investigado o comportamento exponencial do tempo de descida das explosões analisadas, ou seja, se o tempo de descida se apresenta como uma reta, num gráfico log–linear. A Figura 4.4 mostra um destes gráficos, obtido para a explosão do dia 10 de janeiro de 1992, onde pode–se notar claramente o comportamento exponencial do tempo de descida, o que possibilita a argumentação a cerca do amortecimento da radiação.

4.6 AMORTECIMENTO DA RADIAÇÃO

Uma vez evidenciado que o tempo de descida da emissão é exponencial, pode–se assumir que o amortecimento da radiação é colisional, onde a energia das ondas de plasma é perdida através de colisões com íons/elétrons (Melrose, 1985b, p.234), ou não colisional, também chamado de amortecimento de Landau, onde a energia das ondas de plasma é absorvida por partículas com velocidade térmica próxima à velocidade de fase das ondas (Krall, 1973, p.12).

4.6.1 AMORTECIMENTO COLISIONAL

Assumindo que a colisão (íons e elétrons) é responsável pela perda de energia das ondas de plasma (amortecimento colisional) o tempo de descida (t_d), em segundos, é dado por (Smert e Westfold, 1949, citados por Kundu, 1965, p.329):

$$t_d \simeq \frac{T^{3/2}}{42\, N_e}, \tag{4.4}$$

onde T é a temperatura da coroa, (K) e N_e é a densidade de elétrons do plasma, (cm^{-3}).

Usando a Equação (4.1), pode–se reescrever a Equação (4.4) em termos da freqüência de plasma (f_p), de modo que, conhecendo o tempo de descida, a temperatura da coroa (T) pode ser obtida por:

$$T = (1,92 \times 10^3)^{-2/3}\, t_d^{2/3}\, f_p^{4/3}\, (10^6\ \mathrm{K}), \tag{4.5}$$

onde f_p é a freqüência de plasma no segundo harmônico, em MHz e t_d é o tempo de descida, dado em segundos.

Introduzindo na Equação (4.5) o tempo de descida médio ($<t_d> \simeq 206$), obtido das 8 explosões tipo IIIRS–dm digitalizadas (seção 4.1.3), o valor de temperatura da coroa obtido, para a emissão harmônica em 1600 MHz, foi $\simeq 1{,}68 \times 10^7$ K.

Este valor é cerca de uma ordem de grandeza maior do que o valor esperado para a temperatura da coroa ($\sim 10^6$ K), indicando que o tempo de descida usado no cálculo da temperatura é superior ao valor esperado. A justificativa para

esta diferença (além da possibilidade de superestimação dos tempos de descida), pode ser atribuída à geração de radiação também pelos elétrons mais lentos do feixe, durante a fase principal do amortecimento, este efeito acarretaria uma dilatação do tempo de descida da radiação (Kundu, 1965, p.330).

4.6.2 AMORTECIMENTO DE LANDAU

O amortecimento de Landau ou amortecimento não colisional, pode ser entendido considerando que, em uma distribuição térmica dos elétrons do meio (Figura 4.13a), para uma dada velocidade da onda ($v \sim v_\phi$), o número de elétrons se movendo um pouco mais lentos, é ligeiramente maior que aqueles se movendo um pouco mais rápidos que a onda.

Os elétrons mais rápidos tendem a ceder energia para a onda, enquanto que os elétrons mais lentos, ao contrário, absorvem energia da onda. Assim, como há sempre mais elétrons retirando, do que cedendo, energia da onda, o resultado é que a onda amortece e a distribuição de velocidades dos elétrons torna-se não-maxwelliana, com uma configuração do tipo "bump on tail" (Figura 4.13b), que é responsável pelo crescimento das ondas de Langmuir, através de uma instabilidade de plasma (Krall, 1973, p.12).

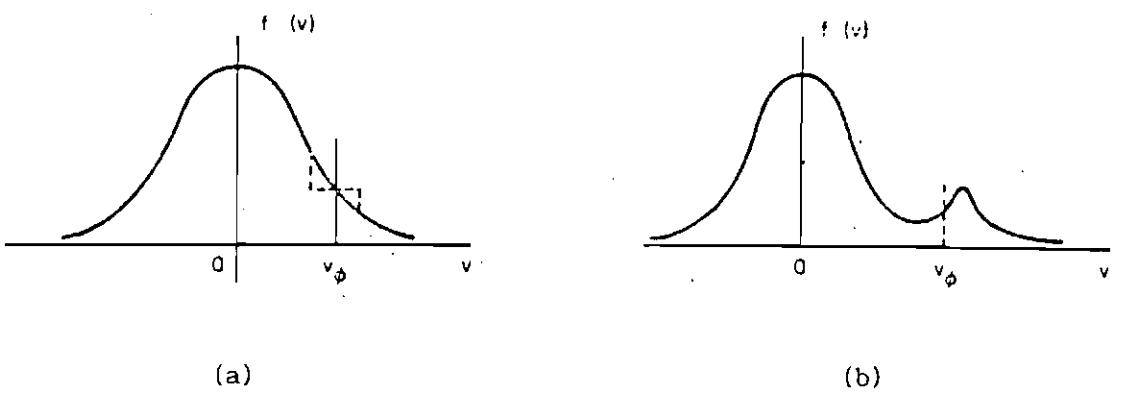

Fig. 4.13 - (a) Distribuição maxwelliana de elétrons do meio, mostrando que existem mais elétrons mais lentos, do que mais rápidos que a velocidade de fase (v_ϕ) da onda. (b) Distribuição não maxwelliana dos elétrons ("bump on tail"), resultante do amortecimento da onda. FONTE: Chen (1983), p.247.

4.7 DENSIDADE E NÚMERO TOTAL DE ELÉTRONS DO FEIXE

A densidade numérica (N_f) e o número total ($\mathcal{N}$) de elétrons do feixe emissor foram obtidas de duas maneiras distintas: i) através dos tempos de descida e excitação e ii) através da densidade de fluxo média das explosões solares tipo IIIRS–dm, conforme descrito a seguir.

Considerando o amortecimento de Landau como responsável pelo decréscimo da radiação, a partir dos tempos de excitação (t_e) e de descida (t_d), dados em segundos, o número de elétrons emissores pode ser obtido através das equações dadas a seguir (Subramanian et al., 1981).

$$t_d = \left(\frac{1}{6\pi^{3/2}}\right) \left(\frac{v_r}{v_l}\right)^2 \left(\frac{v_T}{v_r}\right) \left(\frac{N_e}{N_r}\right)^2 \left(\frac{1}{f_p}\right) \exp\left(\frac{v_r - v_l}{v_T}\right)^2 \tag{4.6}$$

$$t_e = \left(\frac{3\mathcal{N}}{8\pi\, N_r}\right)^{1/3} \left(\frac{1}{v_r} + \frac{1}{v_l}\right) , \tag{4.7}$$

onde

N_e é a densidade de elétrons, (cm^{-3});

$\mathcal{N}$ é o número total de elétrons energéticos;

N_r e v_r são, respectivamente, a densidade e a velocidade dos elétrons mais rápidos do feixe;

N_l e v_l são, respectivamente, a densidade e a velocidade dos elétrons mais lentos do feixe;

v_T é a velocidade térmica dos elétrons, (km/s) e

f_p é a freqüência de plasma, (Hz).

As razões entre as velocidades assumidas para as explosões solares geradas por emissão na faixa decimétrica são: $v_l \simeq 0{,}9\ v_r$ e $v_r = 10\ v_T$ (Fürst et al., 1982). Usando tais parâmetros típicos e os valores de densidade de elétrons (N_e), freqüência de plasma (f_p), tempos médios de descida ($<t_d> \simeq 206$ ms) e excitação ($<t_e> \simeq 122$ ms) e assumindo um valor de $\sim 0{,}3$ c para a velocidade do feixe de elétrons, (Kaplan e Tsytovich, 1973), a densidade numérica dos elétrons mais rápidos

do feixe (N_r), obtida pela Equação (4.6), foi $\sim 6{,}2 \times 10^4$ cm^{-3}. Então, o número total de elétrons energéticos ($\mathcal{N}$), responsáveis pelas explosões tipo IIIRS–dm, obtido da Equação (4.7), foi $\mathcal{N} \simeq 7{,}2 \times 10^{31}$ elétrons.

Considerando que a largura de banda estreita das explosões decimétricas é uma evidência clara de que tais explosões são provocadas pela emissão de plasma (turbulência de Langmuir causada por feixes de elétrons acelerados), Fürst et al., (1982) deduziram uma equação que expressa o valor da densidade de fluxo de explosões em ondas decimétricas, levando em consideração também que a emissão fundamental para estas freqüências é fortemente absorvida.

Assumindo uma interação unidimencional entre o feixe e o plasma e a homogeneidade do sistema (baixa coroa), (Smith et al., 1979), a densidade de fluxo (S_f), em u.f.s., pode ser calculada por:

$$S_f = 1,16 \times 10^{-5} \left(\frac{v_f}{c}\right) \left(\frac{f_p}{\Delta w}\right) \left(\frac{N_f}{N_e}\right)^4 \left(\frac{v_f}{\Delta v_f}\right)^8 \frac{V_{dm}\, N_e\, k\, T\, \delta}{\mathcal{R}^2}, \qquad (4.8)$$

onde

v_f é a velocidade do feixe de elétrons, (cm/s);

c é a velocidade da luz no vácuo, ($2{,}98 \times 10^{10}$ cm/s);

f_p é a freqüência de plasma para a emissão no segundo harmônico, (Hz);

Δw é a largura de banda instantânea, (Hz);

N_f é a densidade do feixe de elétrons, (cm^{-3});

N_e é a densidade de elétrons ambiente (região da emissão), (cm^{-3});

Δv é o espalhamento de velocidade do feixe, (cm/s);

V_{dm} é o volume da fonte de emissão em ondas decimétricas, (cm^3);

k é a constante de Boltzmann, ($1{,}38$ x 10^{-23} Ws/K);

T é a temperatura da coroa, (K);

δ é a absorção da radiação decimétrica e

$\mathcal{R}$ é a distância da observação do fluxo (distância Sol–Terra), (UA).

Então, substituindo na Equação (4.8) os valores dos parâmetros de plasma para emissão decimétrica: $V_{dm} = 10^{27}$ cm^3, $(v_f \ / \ \Delta v_f) = 10$ e $\delta = 0{,}1$ (Fürst et al., 1982), juntamente com os valores de f_p, Δw, N_e e T, obtidos anteriormente e assumindo $\mathcal{R}$ como sendo igual a 1 UA e a velocidade do feixe de elétrons como sendo 0,3 c, obtém-se a seguinte relação:

$$S_f \simeq 1,6 \times 10^{-16} (v_f/c) \, N_f{}^4 , \tag{4.9}$$

Então, tomando a densidade de fluxo média ($<S_f> \simeq 32{,}0$ u.f.s.), obtida das explosões tipo IIIRS–dm analisadas foi calculada a densidade do feixe de elétrons (N_f), que escapa da região fonte de emissão em microondas e que viaja pela cromosfera e baixa coroa, causando as emissões decimétricas pela interação com o plasma. O valor obtido foi $N_f \simeq 2{,}1 \times 10^4$ cm^{-3}, que concorda com o resultado obtido por Sawant et al. (1987), ($N_f \simeq 3{,}3 \times 10^4$ cm^{-3}), para explosões tipo "blip", observadas em 1663 MHz.

Finalmente, o número de elétrons ($\mathcal{N}$) necessários para gerar uma explosão tipo III–dm, foi obtido multiplicando a densidade do feixe (N_f) pelo volume da fonte emissora ($V_{dm} = 10^{27}$ cm^3), assim, $\mathcal{N} \simeq 2{,}1 \times 10^{31}$.

Este resultado concorda com aquele obtido anteriormente, através da Equação (4.7), ($\mathcal{N} \simeq 7{,}2 \times 10^{31}$) elétrons. Ambos os resultados concordam com aquele fornecido por Fürst et al., (1982), que aponta, para o número total de elétrons necessários para gerar uma emissão decimétrica tipo "blip", o valor de $\sim 5 \times 10^{31}$, para freqüências entre 600 e 1000 MHz.

4.8 EXPLOSÃO NÃO CLASSIFICADA

Em 15 de junho de 1991 ($\sim$ 13:39 UT), foi observada uma explosão solar, cujo espectro dinâmico é mostrado na Figura ??, apresentando as seguintes características:

1) Duração total: $\sim$ 14 s (dependente da freqüência).

2) Banda estreita em freqüência: $\sim$ 1585 a 1630 MHz.

3) Taxa de deriva em freqüência negativa (de alta para baixa freqüência): $\sim$ 5,5 MHz/s.

4) Densidade de fluxo: $\sim$ 90 u.f.s..

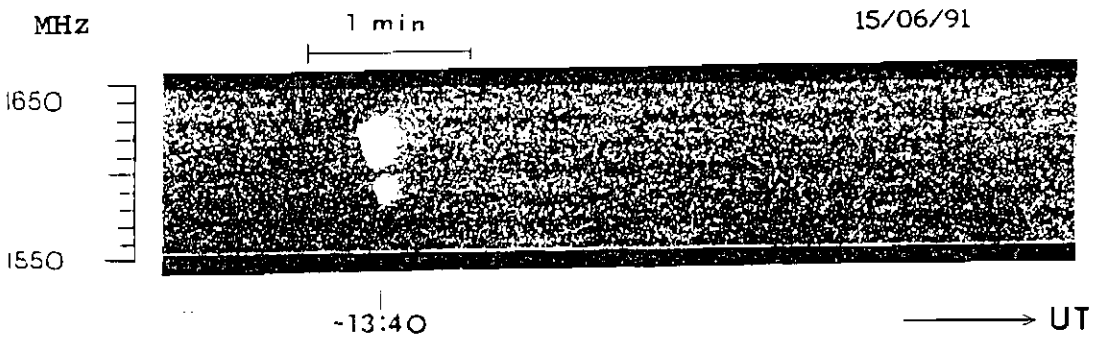

Fig. 4.14 - Espectro dinâmico da explosão solar não classificada observada em 15 de junho de 1991.

Certamente não representa uma emissão em microondas, as quais apresentam banda larga e ausência de taxa de deriva em freqüência, e também difere consideravelmente das explosões tipo "patches", observadas por Smith e Benz (1990) e Bruggmann et al. (1990), que não apresentam taxa de deriva em freqüência e abragem bandas de freqüência ($\sim$ 400 a 500 MHz), cerca de dez vezes maior e cuja duração não apresenta dependência com a freqüência.

Por outro lado, a taxa de deriva em freqüência observada é cerca de 3 ordens de grandeza menor do que as taxas de deriva típicas das explosões tipo III e cerca de 2 ordens de grandeza menor que das explosões causadas por ondas de choque.

Além disso, a explosão observada não apresenta nenhuma semelhança com as explosões solares apresentadas por Güdel e Benz (1988), para a banda de freqüência de (300–1000) MHz e por Allaart et al. (1990), entre 4000 e 8000 MHz.

Considerando esta explosão como emissão de plasma causada pela interação de um feixe de partículas energéticas, os cálculos para as densidades de elétrons do meio, entre os extremos da banda de freqüência observada, fornecem $N_e(1585) \simeq 7{,}6 \times 10^9$ cm^{-3} e $N_e(1630) \simeq 8{,}1 \times 10^9$ cm^{-3}, o que corresponde a uma diferença de altitudes heliocêntricas da ordem de apenas 80 km (modelo de densidade de Cilliè e Menzel) e, com isso, assumindo um feixe de elétrons como agente emissor, a velocidade obtida para o feixe seria extremamente baixa ($\sim$ 7 km/s).

Outro mecanismo emissor proposto para explicar a explosão observada, seria assumir que a emissão foi provocada por prótons de energia cinética de

$\sim$ 50 keV, (Smith e Benz, 1990), o que corresponderia a uma velocidade dos prótons de $v_+ \simeq 3{,}1 \times 10^3$ km/s.

No entanto, a interpretação desta explosão observada não está concluída, visto que as hipóteses propostas para explicá-la, seja considerando a emissão causada por um feixe de elétrons ou de prótons, não reproduzem resultados satisfatórios.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PLANOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Os principais pontos a serem ressaltados na conclusão deste trabalho e que podem ser considerados como objetivos alcançados, são apresentados a seguir.

5.1.1 DESENVOLVIMENTO DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO

O desenvolvimento do espectrógrafo decimétrico (1600 $\pm$ 100) MHz digital de alta sensibilidade e alta resolução temporal e em freqüência (AS–RTF) usando a antena de 9 metros de diâmetro, com montagem polar, foi concluído. Ao longo deste trabalho, os sistemas de aquisição e monitoramento dos dados foram desenvolvidos, testados, aperfeiçoados e adequados para a observação de explosões solares decimétricas, de forma que atualmente o espectrógrafo decimétrico encontra-se em perfeita operação. O aperfeiçoamento sofrido pelo espectrógrafo decimétrico pode ser melhor visualisado quanto são comparadas suas características de funcionamento, ao longo do desenvolvimento, como mostra o histórico abaixo:

1) Dez./90: observações inicias no modo trânsito solar; banda de freqüência de observação (f) de 100 MHz, resolução temporal (ΔT) de 50 ms, resolução espectral (Δf) de 300 kHz e sensibilidade (S_{min}) de $\simeq$ 3 u.f.s.; registro em papel.

2) Mar./91: f = 100 MHz, Δf = 1 MHz, ΔT = 20 ms e $S_{min} \simeq$ 10 u.f.s.; aquisição analógica dos dados, em papel e filme (espectro dinâmico).

3) Set./91: f = 200 MHz, Δf = 3 MHz, ΔT = 100 ms e $S_{min} \simeq$ 2 u.f.s.; aquisição analógica dos dados.

4) Jan./91: f = 200 MHz, Δf = 3 MHz, ΔT = 100 ms e $S_{min} \simeq$ 2 u.f.s.; aquisção analógica e digital dos dados.

5.1.2 OBSERVAÇÕES SOLARES

As observações, mais de 500 horas, realizadas com o espectrógrafo decimétrico, entre dezembro de 1990 e janeiro de 1992, contribuíram primeiramente para o teste das características da figura de radiação da antena e por fim, resultaram na detecção de 162 explosões solares, que comprova o bom funcionamento do sistema de aquisição dos dados.

As explosões observadas foram classificadas com base nas características morfológicas evidenciadas nos espectros dinâmicos (duração total, taxa de deriva em freqüência, largura de banda e densidade de fluxo) e divididas em 128 emissões de plasma (tipo III–dm e variantes), 33 emissões em microondas (girossincrotrônica) e 1 explosão não classificada.

Das explosões citadas acima, 28 foram observadas simultaneamente por outros observatórios (25 confirmadas através do "Solar Geophysical Data" e 3 pelos boletins das campanhas mundiais de observação solar de que o espectrógrafo tomou parte), 1 foi observada conjuntamente pelo radiômetro milimétrico do Rádio Observat rio de Itapetinga (ROI), em Atibaia e 2 coincidiram com eventos observados em VLF, também no ROI, comprovando, portanto, confiabilidade dos dados obtidos pelo espectrógrafo decimétrico.

5.1.3 ANÁLISE PRELIMINAR DAS EXPLOSÕES SOLARES

Foram selecionadas as 44 grupos de explosões tipo III–dm (e variantes) mais intensas ($S \geq 100$ u.f.s.) e definida uma metodologia para análise destas explosões, baseada no mecanismo de emissão de plasma. No total foram analisadas cerca de 100 explosões tipo III–dm individuais.

Foram determinados os parâmetros observacionais (duração total, tempos de descida e excitação, taxa de deriva em freqüência e densidade de fluxo) das explosões selecionadas, cujos valores médios obtidos são sumarizados na Tabela 5.1. A partir destes parâmetros observacionais foram estimados os valores limites para a velocidade, para a densidade e para o número total de elétrons do feixe emissor, além da temperatura da coroa. Os resultados obtidos estão reunidos na Tabela 5.2.

TABELA 5.1 - PARÂMETROS OBSERVACIONAIS OBTIDOS DAS EXPLOSÕES TIPO III–dm ANALISADAS

Parâmetro Observacional	Tamanho da amostra	Valores Médios
Duração total (ms) (espectro dinâmico)	100	~ 740
Duração total (ms) (explosões digitalizadas)	8	~ 326
Tempo de descida (ms)	8	~ 206
Tempo de excitação (ms)	8	~ 122
Densidade de fluxo (u.f.s.)	91	~ 32
Taxa de deriva (MHz/s)	100	~ 1080

TABELA 5.2 - PARÂMETROS ESTIMADOS

Parâmetro Estimado		Banda de Observação 100 MHz	200 MHz
Velocidade do feixe		$\geq 5 \times 10^{-3}$ c	$\geq 1 \times 10^{-2}$ c
Densidade de elétrons	*	$\sim 2{,}1 \times 10^{4}$	
do feixe (cm^{-3})	ø	$\sim 6{,}2 \times 10^{4}$	
Número total de	*	$\sim 2{,}1 \times 10^{31}$	
elétrons do feixe	ø	$\sim 7{,}2 \times 10^{31}$	
Temperatura da coroa (K)		$\sim 1{,}7 \times 10^{7}$	

* – Estimativa usando as Equações 4.8 e 4.9.

ø – Estimativa usando as Equações 4.6 e 4.7.

Apesar da amostra de explosões digitalizadas ser pequena, os resultados obtidos são bastante significativos visto que, na literatura não existe, pelo nosso conhecimento, até hoje, este tipo de análise das características temporais das explosões solares decimétricas (tipo III–dm), acima de 1000 MHz, a não ser pelos estudos feitos por Sawant et al. (1990), para explosões tipo "blips", na freqüência fixa de 1663 MHz.

Os valores de densidade e número total de elétrons estimados, além da estimativa da temperatura da coroa, em confronto com os resultados obtidos anteriormente por Fürst et al. (1982) e por Sawant et al. (1987), comprovam a validade de se assumir o mecanismo de emissão das explosões observadas, como sendo o mecanismo de plasma, cuja emissão está ocorrendo preferencialmente no segundo harmônico.

Os limites de velocidade do feixe de elétrons estimados estão abaixo dos valores esperados, no entanto, cabe ressaltar que, estas estimativas são dependentes do modelo de densidade adotado (Cilliè e Menzel). No entanto, não existem, até o momento, outros estudos feitos para explosões solares observadas acima de 1000 MHz, exceto o trabalho de Sawant et al. (1990), já citado, de forma a comprovar a eficácia do modelo na determinação das altitudes heliocêntricas a partir das densidades de plasma, o que possibilita pensar numa revisão dos modelos de densidade, justamente para freqüências maiores que 1000 MHz.

5.2 PLANOS FUTUROS

5.2.1 EXPLOSÕES SOLARES

Será feita uma análise completa, seguindo a metodologia do Capítulo 4, contudo, utilizando os dados digitalizados de cerca de 80 grupos de explosões solares observadas entre 03 e 13 de abril de 1992, durante a "MAX'91/ Solar Campaign", motivada principalmente pelas observações de VLA (20, 6 e 3,5 cm) e do satélite "YOHKOH". A análise será feita utilizando as estações de trabalho ("workstations") da SUN, da Divisão de Astrofísica (DAS), nas quais os dados digitalizadas já estão armazenados.

Para estas explosões será feito um estudo de correlação cruzada entre duas freqüências distintas (dois canais de observaão), por exemplo, para os extremos da banda de observação (1500 e 1700 MHz), com o intuito de se obter as taxas de deriva em freqüência de tais explosões com maior precisão.

5.2.2 INSTRUMENTAÇÃO

1) Aquisição digital

   Aproveitando, as conexões feitas através de fibras óticas, em vias de instalação em todo INPE, a aquisição digital dos dados obtidos pelo espectrógrafo decimétrico solar, poderá ser feita diretamente através das estações de trabalho da SUN, em tempo real. Atualmente apenas o armazenamento dos dados está sendo feito nas estações de trabalho da SUN.

2) Calibração em tempo

   Também aproveitando e rede de fibras óticas, o sistema de marcação de tempo, poderá ser feito através de uma ligação direta com o relógio padrão de alta precisão "CESIUM BEAM FREQUENCY STANDARDN" (HP5061B), em funcionamento no INPE, evitando imprecisões provocadas pelo ajuste manual da hora local, visto que a curacidade em tempo absoluto do relógio padrão é de 100 milisegundos.

3) Calibração em fluxo

   Além da calibração feita através do método de interpolação (Guidice e Castelli, 1971), que utiliza o sol calmo como fonte calibradora, sera feita a calibração absoluta em fluxo através da observação de uma rádio-fonte conhecida (e.g. Virgo A, Júpiter, Lua).

4) Antena e sistema receptor

   A próxima etapa do projeto do espectrógrafo decimétrico a ser desenvolvida consiste na ampliação da faixa de freqüência de operação de (1500 – 1700)

MHz para (200 - 2500) MHz, através da instalação, no foco da antena, de um alimentador de banda larga composto por duas antenas log-periódicas cruzadas, fabricada pela Watkins - Johnson (USA). Esta alteração permitirá obter sinais nas polarizações horizontal e vertical.

Na saída do alimentador, os sinais nas duas polarizações serão amplificados por dois pré-amplificadores (200 - 2500) MHz e, em seguida, passarão por um circuito híbrido de banda larga, resultando nos sinais correspondentes às polarizações circulares à direita (R) e à esquerda (L).

Através de um sistema de chaveamento (diodo PIN), os sinais das polarizações (R) e (L) serão introduzidos em um analisador espectral, em sincronismo com o tempo de varredura, sendo selecionada uma freqüência central entre 200 e 2500 MHz, em torno da qual será feita a varredura de 50 até 500 MHz, dependendo do tipo de atividade solar (tipo III, "spikes", etc.) que se deseja observar. A principal motivação desta configuração é poder operar com alta resolução temporal (10 a 100 ms) e em freqüência (0,3 a 3 MHz), de modo a observar estruturas finas em tempo e/ou em freqüência nas explosões solares decimétricas nas polarizações (R) e (L) (Figura 5.1).

Os componentes do espectrógrafo/polarímetro de banda larga já foram testados individualmente no INPE, pelo LIT e DEA.

Paralelamente ao sistema descrito anteriormante, um segundo analisador espectral receberá o sinal não polarizado e efetuará uma varredura lenta, da ordem de 1 segundo, em baixas freqüências ($\geq$ 500 MHz), com máxima sensibilidade, com o intuito de se observar, por exemplo, explosões tipo II e tipo IV (Figura 5.2).

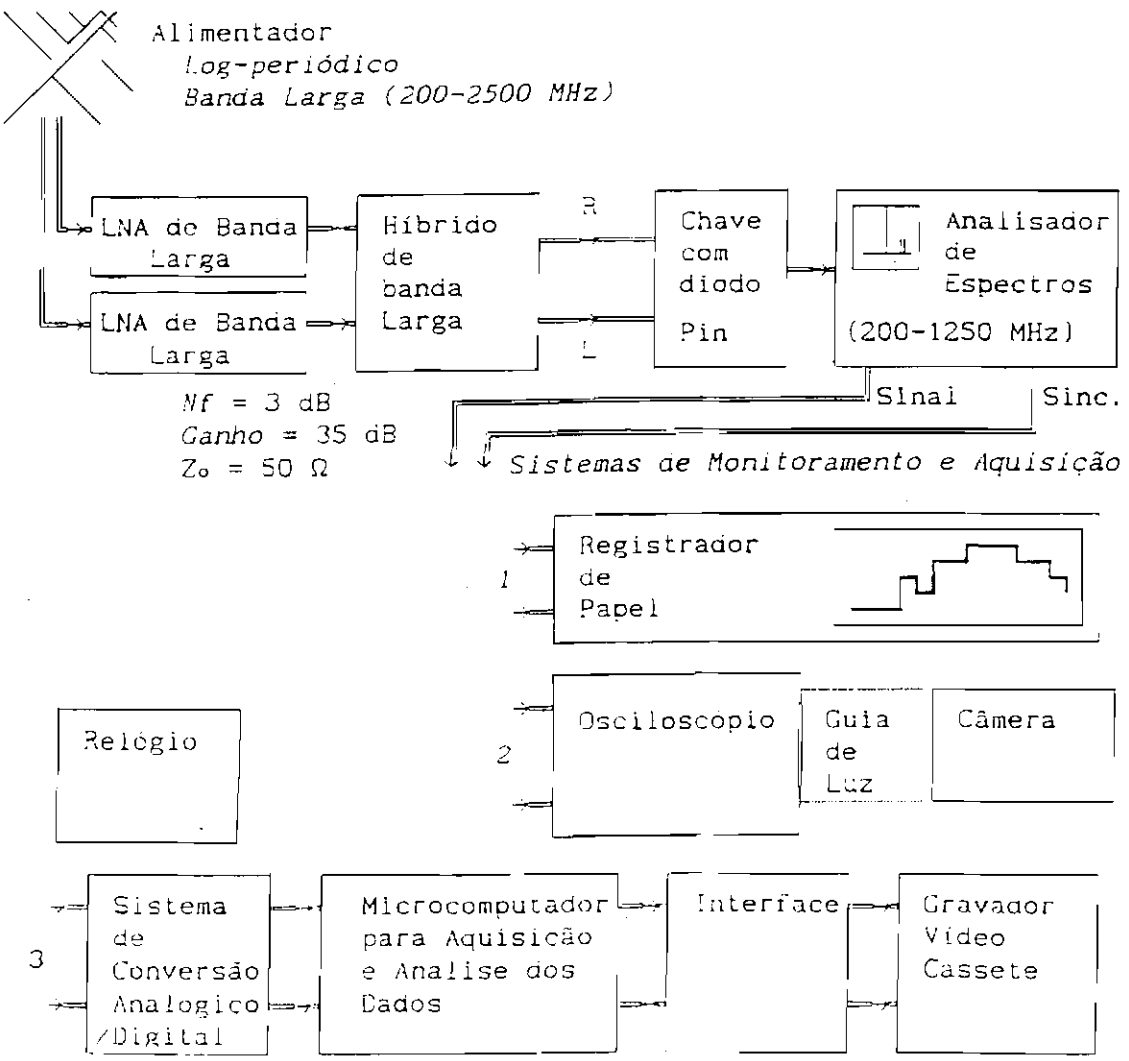

Fig. 5.1 - Diagrama de blocos do espectrógrafo decimétrico (200 – 2500) MHz, que operará nas polarizações (R) e (L), com um alimentador de banda larga, constituído de duas antenas log-periódicas cruzadas.

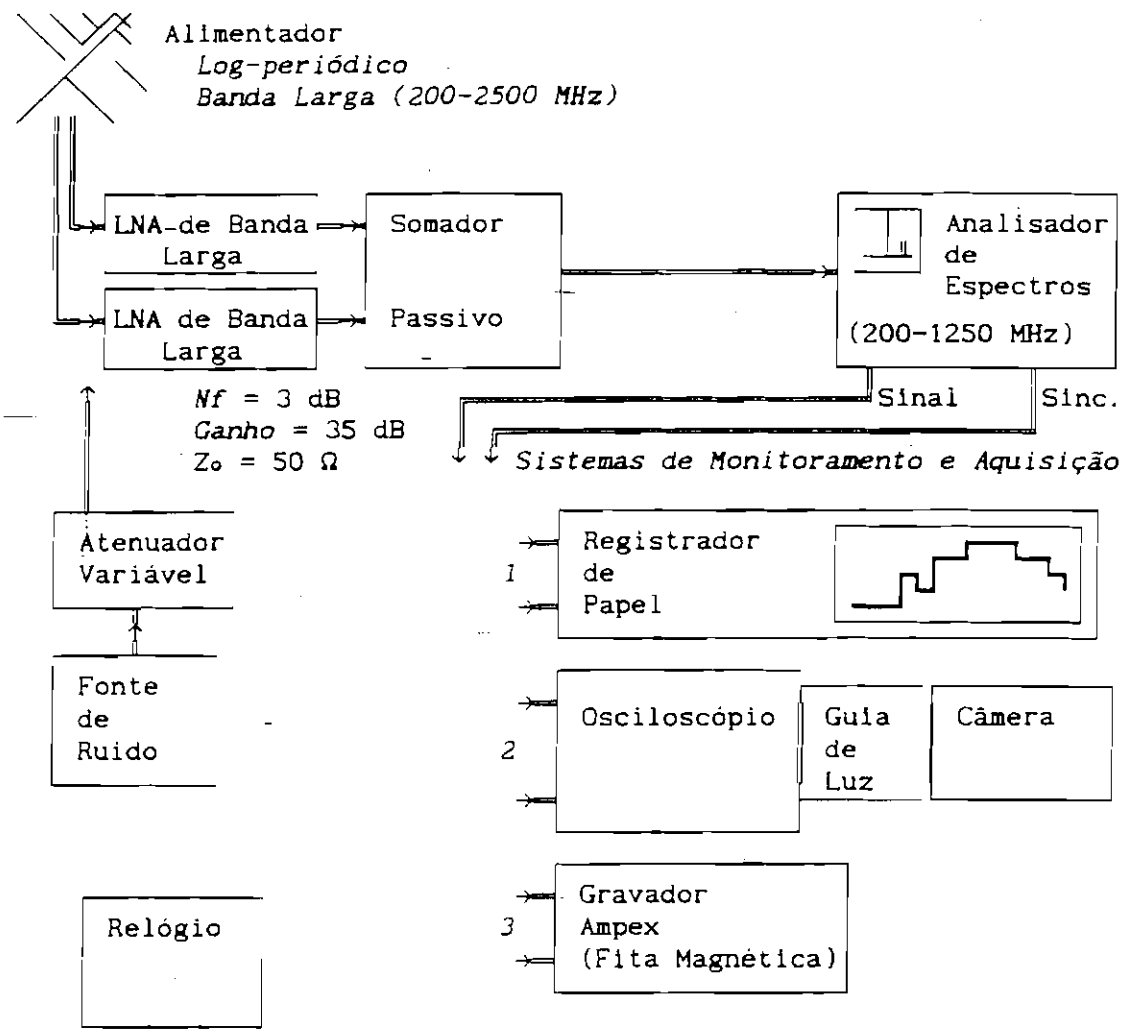

Fig. 5.2 - Diagrama de blocos representando o sistema com baixa resolução e alta sensibilidade (BRAS), para freqüências $\geq$ 500 MHz.

5.3 INTERCÂMBIO

Promover estudos de acoplamento Sol–Terra utilizando dados espectrométricos (decimétricos) solares e dados de ionosfera em solo.

O acoplamento energético entre o Sol e a Terra através do vento solar e da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, é um dos principais temas de estudos atualmente. O grupo internacional de estudos "Solar Terrestrial Energy Program" (STEP) é um programa de estudos que investiga o acoplamento energético entre o Sol e a Terra através de colaboração internacional e campanhas experimentais.

O INPE faz parte do programa STEP através dos grupos de ionosfera e de pesquisa decimétrica solar. Estudos poderão ser feitos durante as tempestades magnéticas em que os dados ionosféricos (obtidos através de iono–sonda, polarímetro e fotômetro), poderão complementar os dados solares (obtidos com o espectrógrafo decimétrico) e vice–versa, visando o estudo dos efeitos globais, no meio ambiente espacial terrestre, das explosões solares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allaart, M.A.F.; van Nieuwkoop, J.; Slottje, C.; Sondaar, L.H. Atlas of fine structure in solar microwave bursts. Aceito para publicação no **Solar Physics**, Oct. 26 1990.

Alvarez, H.; Haddock, F.T. Decay time of type III solar bursts observed at kilometric wavelengths. **Solar Physics**, 30(1): 175–182, Jan. 1973.

Anastasiadis, A.; Vlahos, L. Particle acceleration inside a 'gas' of shock waves. **Astronomy and Astrophysics**, 245(1): 271–278, May 1991.

Anuário Astronômico. São Paulo. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1991.

Balanis, C.A. **Antenna Theory:** analysis and deisgn. New York, Harper & Row, 1982. 790 p.

Benz, A.O. Millisecond radio spikes. **Solar Physics**, 104(1): 99–110, Mar. 1986a.

Benz, A.O. Special Issue: Radio continua during solar flare. **Solar Physics**, 104(1), Mar. 1986b.

Benz, A.O.; Bernold, T.E.X.; Dennis, B.R. Radio blips and hard X–rays in solar flares. **The Astronomical Journal**, 271(1): 355–366, Aug. 1983.

Benz, A.O.; Furst, E.; Hirth, W.; Perrenoud, M.R. Solar radio blips and X–ray kernels. **Nature**, 291: 210–211, May 1981.

Benz, A.O.; Güdel, M. Harmonic emission and polarization of millisecond radio spikes. **Solar Physics**, 111(1): 175–180, 1987.

Benz, A.O.; Güdel, M.; Isliker, H.; Miszkowicz, S.; Stehling, W. A broadband spectrometer for decimetric and microwave radio bursts: first results. **Solar Physics**, 133(2): 385–393, Jun. 1991.

Benz, A.O.; Magun, A. Special Issue: Particle beams in the solar atmosphere. **Solar Physics**, 130(1–2), Dec. 1990.

Benz, A.O.; Su, H.; Magun, A.; Stehling, W. Millisecond microwave spikes at 8 GHz during solar flares. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series.** In press, 1991.

Brown, J.C.; Smith, D.F.; Spicer, D.S. Solar flare observations and their interpretation. In: Jordan, S. ed. **The Sun as a star:** Monograph series on thermal phenomena in stellar atmospheres. Washington, D.C., 1981. (NASA SP–450).

Bruggmann, G.; Benz, A.O.; Magun, A.; Stehling, W. Solar flare microwave observations with high spectral resolution. **Astronomy and Astrophysics**, 240(2): 506–510, Dec. 1990.

Cecatto, J.R. **Analisador espectral.** São José dos Campos, 1991. Palestra realizada no INPE – Seminário do curso: Instrumentação Eletrônica em Astrofísica, em 24 de set. de 1991.

Chen, F.F. Waves in plasma. In: ——— **Introduction to plasma physics and controlled fusion** Vol. 1: Plasma physics. 2.ed. New York, Plenum, 1983.

Dröge, F. Millisecond fine–structures of solar burst radiation in the range 0.2–1.4 GHz. **Astronomy and Astrophysics**, 57(1): 285–290, 1977.

Dulk, G.A. Radio emission from the sun and stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, 23(1): 169–224, 1985.

Elgaroy, O. Discussion on the classification of fine structures in continua. **Solar Physics**, 104(1): 41–42, Mar. 1986.

Engelson, M. **Spectrum analyser measurements:** theory and practice. Beaveton, Oregon, Tektronix. 1971. 292 p

Fürst, E.; Benz, A.O; Hirth, W. About the relation between radio and soft X–ray emission in case of very weak solar activity. **Astronomy and Astrophysics**, 107(1): 178–185, 1982.

Gotwols, B.L.; Phipps, J. A solar radio spectrograph with high time resolution. **Solar Physics**, 26(2): 386–392, 1972.

Güdel, M.; Benz, A.O. A catalogue of decimetric solar flare radio emission. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, 75(2): 243–259, Oct. 1988.

Güdel, M.; Benz, A.O. Time profiles of solar radio spikes. **Astronomy and Astrophysics**, 231(1): 202–212, May 1990.

Guidice, D.A.; Castelli, J.P. The use of extraterrestrial radio sources in the measurement of antenna parameters. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 7(2): 226–234, Mar. 1971.

Hewlett Packard (HP) **Spectrum analysis:** spectrum analyser basics. New York, 1974. (Application Note 150).

Hewlett Packard (HP). **Mannual.** 1985.

Holman, G.D. Acceleration of runnaway electrons and joules heating in solar flares. **The Astrophysical Journal,** 293(2): 584–594, June 1985.

Hudson, H.S. Thick–target processes and white–light flares. **Solar Physics,** 24(1): 414–428, 1972.

Hudson, H.S. Solar flare discovery. **Solar Physics,** 113(1–2): 1–12, 1987.

Kaplan, S.A.; Tsytovich, V.N. **Plasma Astrophysics.** Oxford, Pergamon, 1973. 358 p.

Krall, N.A.; Trivelpiece, A.M. **Priciples of plasma physics.** New York, McGraw–Hill, 1973. 674 p.

Kraus, J.D. **Antenas.** [Antennas]. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 1983. 516 p.

Kraus, J.D. **Radio Astronomy.** New York, McGraw–Hill, 1966. 481 p.

Kraus, J.D.; Carver, K.R. **Eletromagnetismo.** [Eletromagnetics]. Rio de Janeiro, 2.ed., Editora Guanabara, 1973. 783 p.

Kundu, M.R. **Solar radio astronomy.** New York, Interscience Publishers (John Wiley & Sons, Inc.), 1965. 660 p.

Kundu, M.R.; Spencer C.L. Spectral characteristics of solar continuum radiation in the 500–1000 Mc/s range. **The Astrophysical Journal,** 137(1–2): 572–579, Jan. 1963.

Kundu, M.R.; Roberts, J.A.; Spencer,C.J.; Kuiper, J.W. A comparison of the dynamic spectra of solar radio bursts in the decimeter and meter–wave–length ranges. **The Astrophysical Journal,** 133(1): 255–257, Jan. 1961.

Lattari, C.J.B. **Exploração da atividade solar de baixo nível (atividade de pequena intensidade) na coroa e cromosfera.** (Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais / Radioastronomia e Física Solar) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, jun. 1989. 88 p.

Martinazzo, D.; Neri, J.A.C.F.; Cecatto, J.R.; Rosa, R.R.; Fernandes, F.C.R.; Sawant, H.S. Sistema de processamento de dados para espectrômetro milimétrico solar. In: 14o. Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Nova Friburgo, 1991.

Mckean. M.E.; Wingle, M.R.; Dulk, G.A. Frequency fine structure in microwave spike bursts emitted during solar flares. Workshop on MAX 91/SMM Solar Flares Observations and Theory at Estes Park, Colorado, Jun. 3–7, 1990.

McLean, D.J.; Labrum, N.R., ed. **Solar radiophysics:** studies of emission from the sun at metre wavelengths. Cambridge, London, Cambridge University Press, 1985. 376 p.

Melrose, D.B. Plasma emmission mechanisms. In: McLean, D.J.; Labrum, N.R., ed. **Solar radiophysics:** studies of emission from the sun at metre wavelengths. Cambridge, London, Cambridge University Press, 1985a. Cap.8, p.177–210.

Melrose, D.B. Geomagnetic emissiom & bremsstrahlung. In: McLean, D.J.; Labrum, N.R., eds. **Solar radiophysics:** studies of emission from the sun at metre wavelengths. Cambridge, London, Cambridge University Press, 1985b. Cap.9, p.211–236.

Milligan, T.A. **Modern antenna design.** New York, McGraw–Hill, 1985. 408 p.

Moore, R.; McKenzie, D.L.; Svestka, Z.; Widing, K.G.; Antiochos, S.K.; Dere, K.P.; Dodson–Prince, H.W.; Hiei, E.; Krali, K.R.; Krieger, A.S.; Mason, H.E.; Petrasso, R.D.; Pneuman, G.W.; Silk, J.K.; Vorpahal, J.A.; Withbroe, G.L. **The Thermal X–Ray Flare Plasma.** In: Sturrock, P.A., ed. **Solar flares:** a monograph from Skylab solar Workshop II. Report of NASA Skylab Workshop on Solar Flares. Boulder, Colorado, Colorado University Press, 1980. Cap. 8, p.341–409.

Olver, A.D. Basic properties of antennas. In: Rudge, A.W.; Milne, K.; Olver, A.D.; Knight, P. **The handbook of antenna design.** London, UK, Peter Peregrinus, 1982. v. 1, Cap. 1, p.1–59.

Roberty, H.M.B. **Antenas:** apostila da cadeira de Radioastronomia II. Observatório do Valongo, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2. sem., 1987. 28 p. Mimiografado.

Rosa, R.R. **Estruturas finas na radioemissão solar.** (Monografia para o Exame Integrado do Curso de Mestrado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, nov. 1990. 23 p.

Rosa, R.R. **Estudos da fase impulsiva das explosões solares.** (Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais / Radioastronomia e Física Solar) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, mar. 1992. 107 p.

Rosenberg, J. **Instabilities in the solar corona.** (Ph. D. Thesis) - Rijiks University, Utrecht, Jul. 1973. 43p.

Rybicki, G.B.; Ligthman, A.P. **Radiative process in astrophysics.** New York, John Wiley & Sons, 1979. 382 p.

Sawant, H.S. **Studies in solar–terrestrial physics.** (Ph. D. Thesis) - Gujarat University Physical Research Laboratory, India, Oct. 1977. 227 p.

Sawant, H.S.; Rosa, R.R. High sensitivity, high frequency and high time resolution decimetric spectroscope. **Revista Mexicana de Astronomia Y Astrofísica,** 21(1): 651–654, 1990.

Sawant, H.S.; Lattari, C.J.B.; Benz, A.O.; Dennis, B.R. Hard X–rays and associated weak decimetric bursts. **Solar Physics,** 130(1–2): 57–73, Dec. 1990.

Sawant, H.S.; Costa, J.E.R.; Trevisan, R.H.; Lattari, C.J.B.; Kaufmann, P. Low–level decimetric (1.6 GHz) solar burst activity. **Solar Physics,** 111(1): 189–199, 1987.

Sawant, H.S.; Sobral, J.H.A.; Neri, J.A.C.F.; Fernandes, F.C.R.; Rosa, R.R.; Cecatto, J.R.; Martinazzo, D. High sensitivity, high frequency and high time resolution solar radio spectroscope. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso de Ciência (SBPC), 43., Rio de Janeiro, 14–19 jul. 1991. **Anais.** Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 1991. Vol. 43:689–690.

Sawant, H.S.; Sobral, J.H.A.; Neri, J.A.C.F.; Fernandes, F.C.R.; Rosa, R.R.; Cecatto, J.R.; Martinazzo, D. High sensitivity high frequency time resolution decimeter (1600 $\pm$ 50) MHz solar radio spectroscope. In: Svestka, Z.; Jackson, B.V.; Machado, M.E. ed. **Eruptive solar flares.** Proc. International Astronomical Union Colloquium 133, Iguazu, Argentina, Aug. 2–6, 1991. **Lecture Notes in Physics,** 399:318–321, 1992.

Smith, D.F.; Benz, A.O. A mechanism for producing plasma radiation in the gigahertz range by precipitating high–enegy protons. **Solar Physics**, 131(2): 351–361, Feb. 1990.

Smith, R.A.; Goldstein, M.L.; Papadopoulos, K. Nonlinear stability of solar type III radio bursts. I. Theory. **The Astrophysical Journal**, 234(1): 348–362, Nov. 1979.

Solar Goephysical Data Explanation of Data Reports (SGD). Bounder, Colorado, NOOA, No. 499, Mar. 1986. (Supplement).

Solar Geophysical Data Prompt Reports (SGD). Bounder, Colorado, NOOA, Nos. 558–568, 1991.

Stähli, M.; Benz, A.O. Microwave emission of solar electron beams. **Astronomy and Astrophysics**, 175(1–2): 271–276, Mar. 1987.

Stähli, M.; Fuhrer, M. Digital multichannel spectrometer for solar microwave observations. **Solar Physics**, 114(1): 105–113, 1987.

Sturrock, P.A. Type III solar radio busts. In: Hess, W.N., ed. **Proc. AAS–NASA Symposium on the Physics of Solar Flares.** NASA SP–50, 1964. p. 357.

Sturrock, P.A., ed. **Solar Flares:** A monograph from Skylab solar Workshop II. Report of NASA Skylab Workshop on Solar Flares. Boulder, Colorado, Colorado University Press, 1980.

Subramanian, K.R.; Krishan, V.; Satry, V. On the correlation between exciter duration and decay constant of solar decameter type III radio busts. **Solar Physics**, 70(2): 375–379, Apr. 1981.

Svestka, K. **Solar Flares.** Dordrecht, Holland, D.Reidel Publishing, 1976. 400 p.

Tarnstrom G.L.; Philip, K.W. Solar radio spikes bursts. **Astronomy and Astrophysics**, 16(1): 21–27, 1972a.

Tarnstrom G.L.; Philip, K.W. Spike burst–type III busrt associations. **Astronomy and Astrophysics**, 17(1): 267–275, 1972b.

Trevisan, R.H. **Estudos multiespectrais das explosões solares associadas com a fase impulsiva do flare.** (Tese de Doutorado em Ciência Espacial / Radioastronomia e Física Solar) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, mar. 1991. 157 p.

Trottet, G.; Pick, M. Special Issue: Particle acceleration and trapping in solar flares. **Solar Physics**, 111(1), Jan. 1987.

Wiehl, H.J.; Benz, A.O.; Aschwanden, M.J. Different time constants of solar decimetric bursts in the range 100–1000 MHz. **Solar Physics**, 95(1): 167–179, Jan. 1985.

Young C.W.; Spencer, C.L.; Moreton, G.E. A preliminary study of the dynamic spectra of solar radio bursts in the frequency range 500–950 Mc/s. **The Astrophysical Journal**, 133(1): 243–250, Jan. 1961.

Zirin, H. Solar flares In: ——— **Astrophysic of the sun.** Cambridge, Cambridge University, 1988. Cap. 11, p.343–404.

APÊNDICE A

DESENHO DA CÂMERA FILMADORA

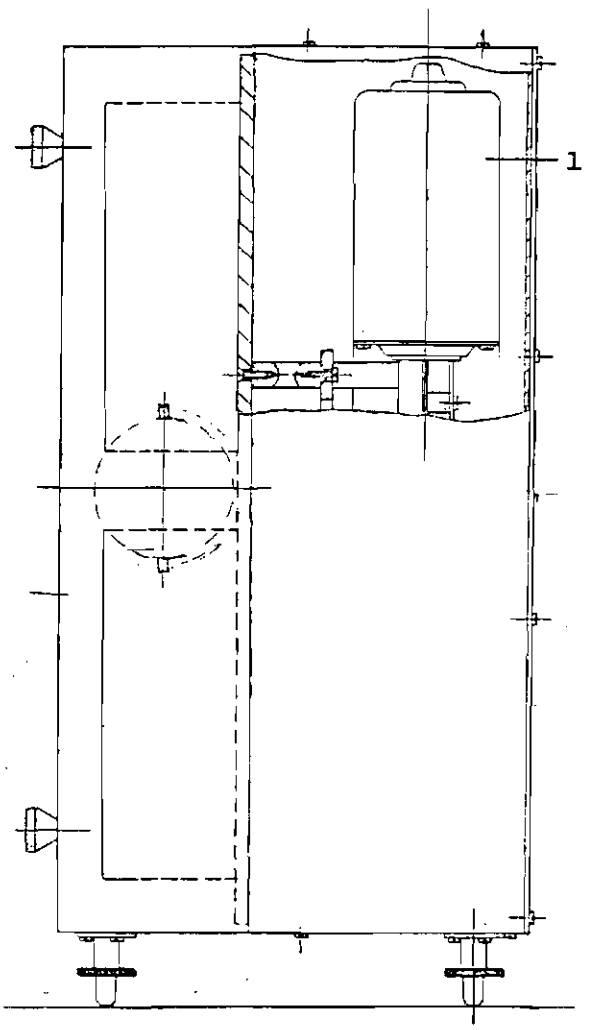

Fig. A.1 - Corte longitudinal do desenho da câmera filmadora desenvolvida no INPE mostrando o acionador (motor) da câmera (1).

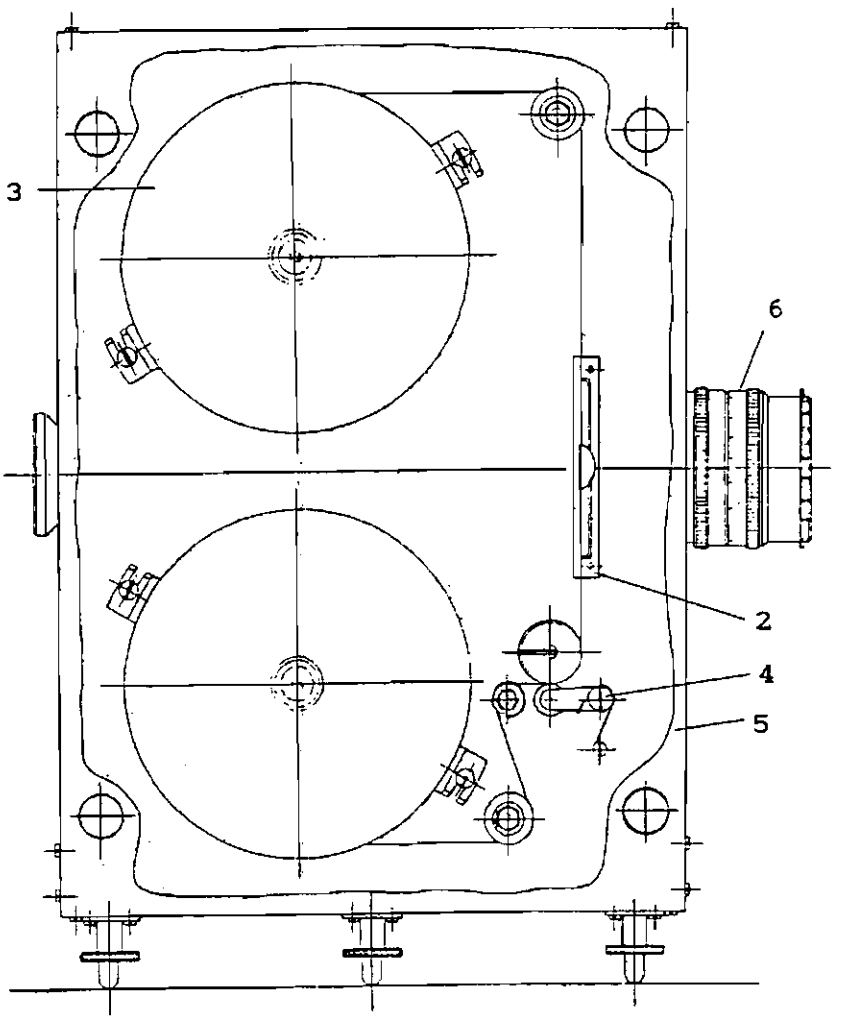

Fig. A.2 - Corte transversal do desenho da câmera filmadora desenvolvida no INPE mostrando: o sistema guia do filme (2); a caixa dos filmes (3); o compressor do filme (4); a caixa da câmera (5) e a lente objetiva de 50 mm (6).

APÊNDICE B

CÁLCULO DA VELOCIDADE DO FILME EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VARREDURA DO SISTEMA

O sinal relativo à banda de freqüência de observação, depois que sai do analisador de espectros, é projetado pelo osciloscópio (modulado em Z), de tal forma que ocupa toda a extensão horizontal da tela, ou seja, abrange 10 cm.

Esta imagem é então filmada pela câmera, ou seja, é transportada para o filme, cuja largura é 3,5 cm, através da lente, sendo reduzida por um fator $\sim$ 2,86, em outras palavras, os 10 cm da tela do osciloscópio, ocupam no filme apenas 3,5 cm.

Portanto, considerando que a menor dimensão (d) que pode ser resolvida para um sinal qualquer na tela do osciloscópio (resolução espacial) seja $\sim$ 0,5 mm, esta mesma dimensão corresponderá, no filme, a cerca de 0,17 mm.

Então, para que o sinal seja resolvido no filme, ele deverá sofrer um deslocamento igual (ou maior) a d = 0,17 mm, durante o intervalo entre duas amostragens consecutivas do sinal (= tempo de varredura, ΔT), ou seja, o limite inferior para a velocidade do filme será dado por:

$$v_{min} = \frac{d}{\Delta T} \simeq \frac{1,02}{\Delta T} \text{ (cm/min)}, \tag{B.1}$$

onde ΔT é dado em segundos.

Desta forma, se a velocidade do filme for menor que v_{min} haverá superposição do sinal, por outro lado, se a velocidade for maior que v_{min} haverá um espaçamento no filme entre sinais consecutivos.

APÊNDICE C

DIAGRAMA DA PLACA/INTERFACE

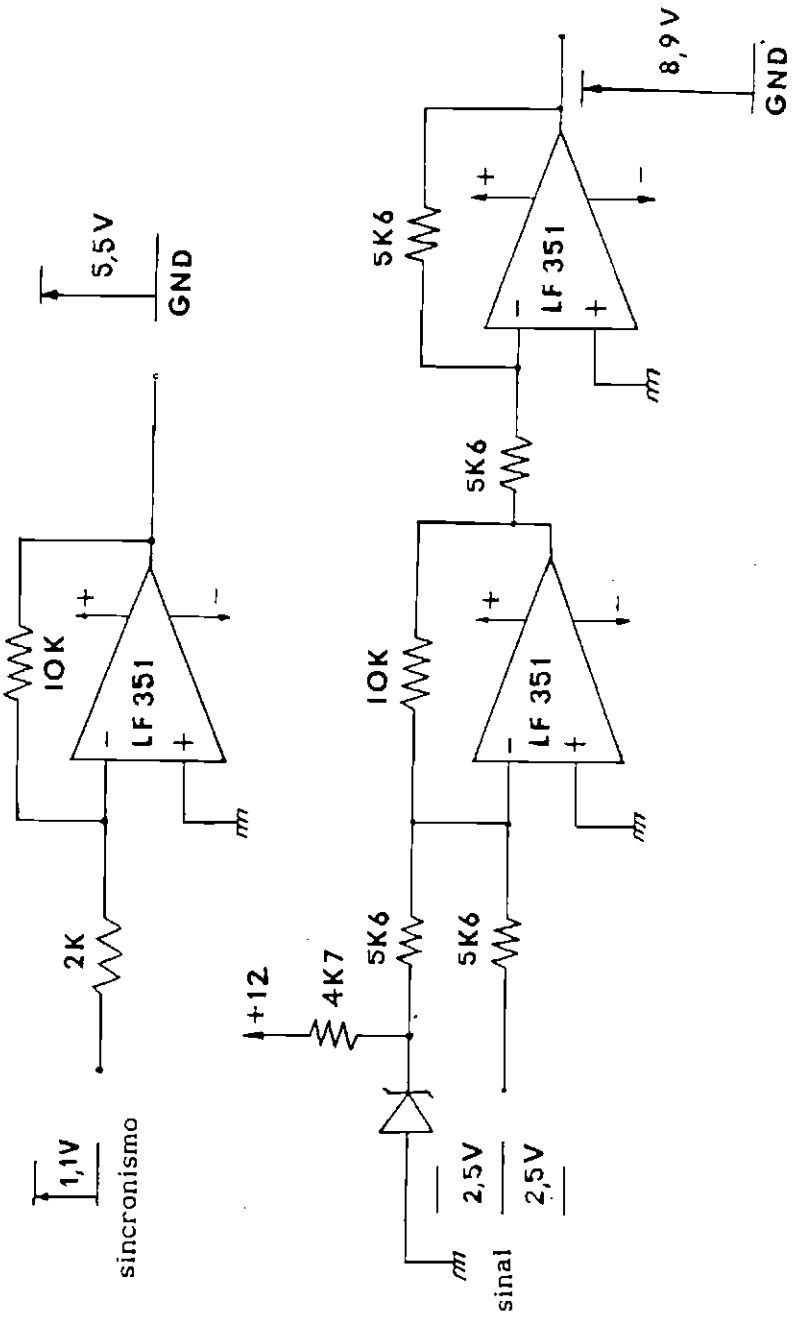

Fig. C.1 - Diagrama da placa do circuito de amplificação e interface entre o sistema receptor e a placa digitalizadora.

APÊNDICE D

PROGRAMA DE DIGITALIZAÇÃO (PRODIG.PAS) DOS SINAIS DO ESPECTRÓGRAFO DECIMÉTRICO

```
                    { PRODIG }
            { PROGRAMA DE DIGITALIZACAO }
{       Este programa é responável pela digitalização dos sinais do          }
{                 ESPECTROMETRO        DECIMETRICO                           }
{ Este programa e destinado a leitura dos dados  provinientes do Analizador  }
{ de Espectros que sao:                                                       }
{     -Potência dos sinais emitidos pelo Sol e recebidos pela antena          }
{     -Rampa de varredura das freqüências correspondentes as potencias        }
{ As medidas sao efetuadas atravez do acionamento de uma placa conversora de }
{ sinais Analógicos para Digital de 12 bits "PC CARD ADDA-12".                }
{ Os referidos dados são armazenados na memória do microcomputador em um      }
{ ciclo contínuo e fechado. Em outras palavras o armazenamento efetua-se em   }
{ forma de  "anel", a medida que os dados chegam eles são armazenados e       }
{ quando a memoria enche passa-se a rescrever no início. O programa permite   }
{ ao operador salvar o conteudo armazenado que e de 10 minutos de dados       }
{ ou seja o equivalente a 9000 varreduras), a qualquer momento apenas pelo    }
{ acionamento de uma tecla. Os dados gravados em um arquivo em disco.         }
{ Os dados de configuracao bem como o canal a ser lido sao indicados no       }
{ arquivo "conf.dat" criado pelo Configur.exe.                                }

{ Resolução temporal              - 100ms                                     }
{ número de canais pro varradura -  20Cx                                      }
{ Varredura de freqüências        - 1.50 a 1.70GHz                            }
{$m, 16000,0,550000}
{$I-}
uses
    dos, crt;

const
{ numero total de varreduras }
   max = 9000;

type
   dados= array [1..max] of word;

var
   k: integer;
   l: integer;
   h, h1,
   m, m1,
   s, s1,
   s100, s1001: word;
   nome1: string;
   dado,
   dado1,
   dado2: byte;
   nome_aux: string[7] ;
   nome  : string[12]  ;
   arqout: text        ;
```

```
    caracter : byte      ;
    fim   : boolean      ;
    horario,
    conf  : text         ;
    i, j  : word         ;
    aux   : longint      ;
    canal_freq : byte    ;
    canal_dados: byte    ;
    numero_canais : word;
    intens_sinc   : word;
    ch    : char         ;
    data1 : ^dados       ;
    data2 : ^dados       ;
    data3 : ^dados       ;
    data4 : ^dados       ;
    data5 : ^dados       ;
    data6 : ^dados       ;
    data7 : ^dados       ;
    data8 : ^dados       ;
    data9 : ^dados       ;
    data10 : ^dados      ;
    data11 : ^dados      ;
    data12 : ^dados      ;
    data13 : ^dados      ;
    data14 : ^dados      ;
    data15 : ^dados      ;
    data16 : ^dados      ;
    data17 : ^dados      ;
    data18 : ^dados      ;
    data19 : ^dados      ;
    data20 : ^dados      ;
    mataux : ^dados      ;

(*********************************************************************)
procedure prepara;
var k: integer;
  begin
    aux:= 0;
    for k:= 1 to 48 do
      begin
         Port [$27B]:= 0     ;          { reset da placa  }
         Port [$278]:= canal_dados;     { numero do canal }
         Dado:= Port [$27C]; { 1 }
         Dado:= Port [$27C]; { 2 }
         Dado:= Port [$27C]; { 3 }
         Dado:= Port [$27C]; { 4 }
         Dado:= Port [$27C]; { 5 }
         Dado:= Port [$27C]; { 6 }
         Dado:= Port [$27C]; { 7 }
         Dado:= Port [$27D]; { 1 }
         Dado:= Port [$27D]; { 2 }
         Dado:= Port [$27D]; { 3 }
         Dado:= Port [$27D]; { 4 }
         Dado:= Port [$27D]; { 5 }
         Dado:= Port [$27D]; { 6 }
         Dado:= Port [$27D]; { 7 }
         Dado1:= Port [$27A] and 15; { 4 bits mais  significativos }
         Dado2:= Port [$279];        { 8 bits menos significativos }
         aux := 256*Dado1+Dado2 + aux;
     end;
aux:=aux div 48;
end;

(*********************************************************************)
procedure sincronismo;                {procura de inicio de sincronismo}
```

```
  begin
    Repeat
         Port [$27B]:= 0     ;          { reset da placa  }
         Port [$278]:= canal_freq;      { numero do canal }
         Dado:= Port [$27C]; { 1 }
         Dado:= Port [$27C]; { 2 }
         Dado:= Port [$27C]; { 3 }
         Dado:= Port [$27C]; { 4 }
         Dado:= Port [$27C]; { 5 }
         Dado:= Port [$27C]; { 6 }
         Dado:= Port [$27C]; { 7 }
         Dado:= Port [$27D]; { 1 }
         Dado:= Port [$27D]; { 2 }
         Dado:= Port [$27D]; { 3 }
         Dado:= Port [$27D]; { 4 }
         Dado:= Port [$27D]; { 5 }
         Dado:= Port [$27D]; { 6 }
         Dado:= Port [$27D]; { 7 }
         Dado1:= Port [$27A] and 15; { 4 bits mais  significativos }
         Dado2:= Port [$279];        { 8 bits menos significativos }
      Until ((Dado1*256 + Dado2)>= intens_sinc);
    Repeat
         Port [$27B]:= 0     ;          { reset da placa  }
         Port [$278]:= canal_freq;      { numero do canal }
         Dado:= Port [$27C]; { 1 }
         Dado:= Port [$27C]; { 2 }
         Dado:= Port [$27C]; { 3 }
         Dado:= Port [$27C]; { 4 }
         Dado:= Port [$27C]; { 5 }
         Dado:= Port [$27C]; { 6 }
         Dado:= Port [$27C]; { 7 }
         Dado:= Port [$27D]; { 1 }
         Dado:= Port [$27D]; { 2 }
         Dado:= Port [$27D]; { 3 }
         Dado:= Port [$27D]; { 4 }
         Dado:= Port [$27D]; { 5 }
         Dado:= Port [$27D]; { 6 }
         Dado:= Port [$27D]; { 7 }
         Dado1:= Port [$27A] and 15; { 4 bits mais  significativos }
         Dado2:= Port [$279];        { 8 bits menos significativos }
      Until ((Dado1*256 + Dado2)>= intens_sinc);
end;

(*************************************************************************)
procedure novo_sincronismo;          {procura de fim de sincronismo}
  begin
    Repeat
         Port [$27B]:= 0     ;          { reset da placa  }
         Port [$278]:= canal_freq;      { numero do canal }
         Dado:= Port [$27C]; { 1 }
         Dado:= Port [$27C]; { 2 }
         Dado:= Port [$27C]; { 3 }
         Dado:= Port [$27C]; { 4 }
         Dado:= Port [$27C]; { 5 }
         Dado:= Port [$27C]; { 6 }
         Dado:= Port [$27C]; { 7 }
         Dado:= Port [$27D]; { 1 }
         Dado:= Port [$27D]; { 2 }
         Dado:= Port [$27D]; { 3 }
         Dado:= Port [$27D]; { 4 }
         Dado:= Port [$27D]; { 5 }
         Dado:= Port [$27D]; { 6 }
         Dado:= Port [$27D]; { 7 }
         Dado1:= Port [$27A] and 15; { 4 bits mais  significativos }
         Dado2:= Port [$279];        { 8 bits menos significativos }
```

```
      Until ((Dado1*256 + Dado2)<= intens_sinc);
    Repeat
        Port [$27B]:= 0     ;          { reset da placa  }
        Port [$278]:= canal_freq;      { numero do canal }
        Dado:= Port [$27C]; { 1 }
        Dado:= Port [$27C]; { 2 }
        Dado:= Port [$27C]; { 3 }
        Dado:= Port [$27C]; { 4 }
        Dado:= Port [$27C]; { 5 }
        Dado:= Port [$27C]; { 6 }
        Dado:= Port [$27C]; { 7 }
        Dado:= Port [$27D]; { 1 }
        Dado:= Port [$27D]; { 2 }
        Dado:= Port [$27D]; { 3 }
        Dado:= Port [$27D]; { 4 }
        Dado:= Port [$27D]; { 5 }
        Dado:= Port [$27D]; { 6 }
        Dado:= Port [$27D]; { 7 }
        Dado1:= Port [$27A] and 15; { 4 bits mais  significativos }
        Dado2:= Port [$279];        { 8 bits menos significativos }
      Until ((Dado1*256 + Dado2)<= intens_sinc);

end;


(*****************************************************************************)
begin
     assign (conf,'conf.dat');  {leitura da configuracao basica}
     reset  (conf);
     readln (conf, canal_freq); {numero do canal de frequencias }
     readln (conf, intens_sinc);{intensidade de inicio da rampa sincronismo}
     readln (conf, canal_dados);{numero do canal de dados       }
     close  (conf);
     clrscr;
gotoxy (1,25);
writeln('┌──────────────
```

```
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
writeln('|
      |');
write   ('└──────────────
```

```
gotoxy(48,15);
write(canal_freq:2);
gotoxy(48,16);
write(canal_dados:2);
gotoxy(48,17);
write(intens_sinc:3);
gotoxy (48,14);
write(nome_aux);

fim:= false;
caracter:= 65;
   repeat

   nome:= nome_aux + char (caracter);
   caracter:= caracter + 1;
gotoxy (5, 9);
getmem (data1, sizeof (dados));
getmem (data2, sizeof (dados));
getmem (data3, sizeof (dados));
getmem (data4, sizeof (dados));
getmem (data5, sizeof (dados));
getmem (data6, sizeof (dados));
getmem (data7, sizeof (dados));
getmem (data8, sizeof (dados));
getmem (data9, sizeof (dados));
getmem (data10, sizeof (dados));
getmem (data11, sizeof (dados));
getmem (data12, sizeof (dados));
getmem (data13, sizeof (dados));
getmem (data14, sizeof (dados));
getmem (data15, sizeof (dados));
getmem (data16, sizeof (dados));
getmem (data17, sizeof (dados));
getmem (data18, sizeof (dados));
getmem (data19, sizeof (dados));
getmem (data20, sizeof (dados));
getmem (mataux, sizeof (dados));

for i:= 1 to max do
  begin
    data1^[i]:= 0;
    data2^[i]:= 0;
    data3^[i]:= 0;
    data4^[i]:= 0;
    data5^[i]:= 0;
    data6^[i]:= 0;
    data7^[i]:= 0;
    data8^[i]:= 0;
    data9^[i]:= 0;
    data10^[i]:= 0;
    data11^[i]:= 0;
    data12^[i]:= 0;
    data13^[i]:= 0;
    data14^[i]:= 0;
    data15^[i]:= 0;
    data16^[i]:= 0;
    data17^[i]:= 0;
    data18^[i]:= 0;
    data19^[i]:= 0;
    data20^[i]:= 0;
  end;
gotoxy(23,9);
i:=1;
```

```
novo_sincronismo;

repeat

  asm
  cli        { desabilita todas interrupcoes  }
  end;

  sincronismo;

  prepara;
  data1^[i]:= aux;

  prepara;
  data2^[i]:= aux;

  prepara;
  data3^[i]:= aux;

  prepara;
  data4^[i]:= aux;

  prepara;
  data5^[i]:= aux;

  prepara;
  data6^[i]:= aux;

  prepara;
  data7^[i]:= aux;

  prepara;
  data8^[i]:= aux;

  prepara;
  data9^[i]:= aux;

  prepara;
  data10^[i]:= aux;

  prepara;
  data11^[i]:= aux;

  prepara;
  data12^[i]:= aux;

  prepara;
  data13^[i]:= aux;

  prepara;
  data14^[i]:= aux;

  prepara;
  data15^[i]:= aux;

  prepara;
  data16^[i]:= aux;

  prepara;
  data17^[i]:= aux;

  prepara;
  data18^[i]:= aux;

  prepara;
```

```
        data19^[i]:= aux;

        prepara;
        data20^[i]:= aux;

        inc (i);
        If i>max then i:= 1;
        novo_sincronismo;

        asm
        sti     { reabilita todas interrupcoes  }
        end;
      until (keypressed);              { testa  teclado }
      gettime (h1, m1, s1, s1001);
      gotoxy (11,10);
      write  ('PORCENTAGEM GRAVADA EM DISCO  -------------> :        % ');
      gotoxy(23,9);
      nome1:= nome + '.hor';
      nome:= nome + '.dat';
      assign (arqout, nome);
      assign (horario, nome1);
      rewrite (horario);
      writeln (horario, 'fim     ',h1:4,':', m1:2,':',s1:2,':',s1001:3);
      close (horario);
      rewrite (arqout);

{ salvar os canais gravados desde dez minutos atras ate agora "9000 varr" }

        k:=0;
        for j:= i to max do
        begin
          k:=k+1;
          gotoxy (59,10);
          write ( ((100.0 * k)/9000.0):5:1 );
          write ( arqout, k:4 );
          write ( arqout,data1^[j] :5 );
          write ( arqout,data2^[j] :5 );
          write ( arqout,data3^[j] :5 );
          write ( arqout,data4^[j] :5 );
          write ( arqout,data5^[j] :5 );
          write ( arqout,data6^[j] :5 );
          write ( arqout,data7^[j] :5 );
          write ( arqout,data8^[j] :5 );
          write ( arqout,data9^[j] :5 );
          write ( arqout,data10^[j]:5 );
          write ( arqout,data11^[j]:5 );
          write ( arqout,data12^[j]:5 );
          write ( arqout,data13^[j]:5 );
          write ( arqout,data14^[j]:5 );
          write ( arqout,data15^[j]:5 );
          write ( arqout,data16^[j]:5 );
          write ( arqout,data17^[j]:5 );
          write ( arqout,data18^[j]:5 );
          write ( arqout,data19^[j]:5 );
          writeln ( arqout,data20^[j]:5 );
        end;

        for j:= 1 to i-1 do
        begin
          k:=k+1;
          gotoxy (59,10);
          write  ( ((100.0 * k)/9000.0):5:1 );
          write ( arqout, k:4 );
          write ( arqout,data1^[j] :5 );
          write ( arqout,data2^[j] :5 );
          write ( arqout,data3^[j] :5 );
```

```
        write ( arqout,data4^[j] :5 );
        write ( arqout,data5^[j] :5 );
        write ( arqout,data6^[j] :5 );
        write ( arqout,data7^[j] :5 );
        write ( arqout,data8^[j] :5 );
        write ( arqout,data9^[j] :5 );
        write ( arqout,data10^[j] :5 );
        write ( arqout,data11^[j] :5 );
        write ( arqout,data12^[j] :5 );
        write ( arqout,data13^[j] :5 );
        write ( arqout,data14^[j] :5 );
        write ( arqout,data15^[j] :5 );
        write ( arqout,data16^[j] :5 );
        write ( arqout,data17^[j] :5 );
        write ( arqout,data18^[j] :5 );
        write ( arqout,data19^[j] :5 );
        writeln ( arqout,data20^[j] :5 );
      end;
    writeln;



    close (arqout);
    dispose (data1);
    dispose (data2);
    dispose (data3);
    dispose (data4);
    dispose (data5);
    dispose (data6);
    dispose (data7);
    dispose (data8);
    dispose (data9);
    dispose (data10);
    dispose (data11);
    dispose (data12);
    dispose (data13);
    dispose (data14);
    dispose (data15);
    dispose (data16);
    dispose (data17);
    dispose (data18);
    dispose (data19);
    dispose (data20);
    dispose (mataux);
    ch:= readkey;
    if ch=#27 then fim:= true;
    if ch=#0 then ch:= readkey;
    i:= 1;
 until (fim=true);
end.
```

APÊNDICE E

DIAGRAMA DO CIRCUITO TEMPORIZADOR

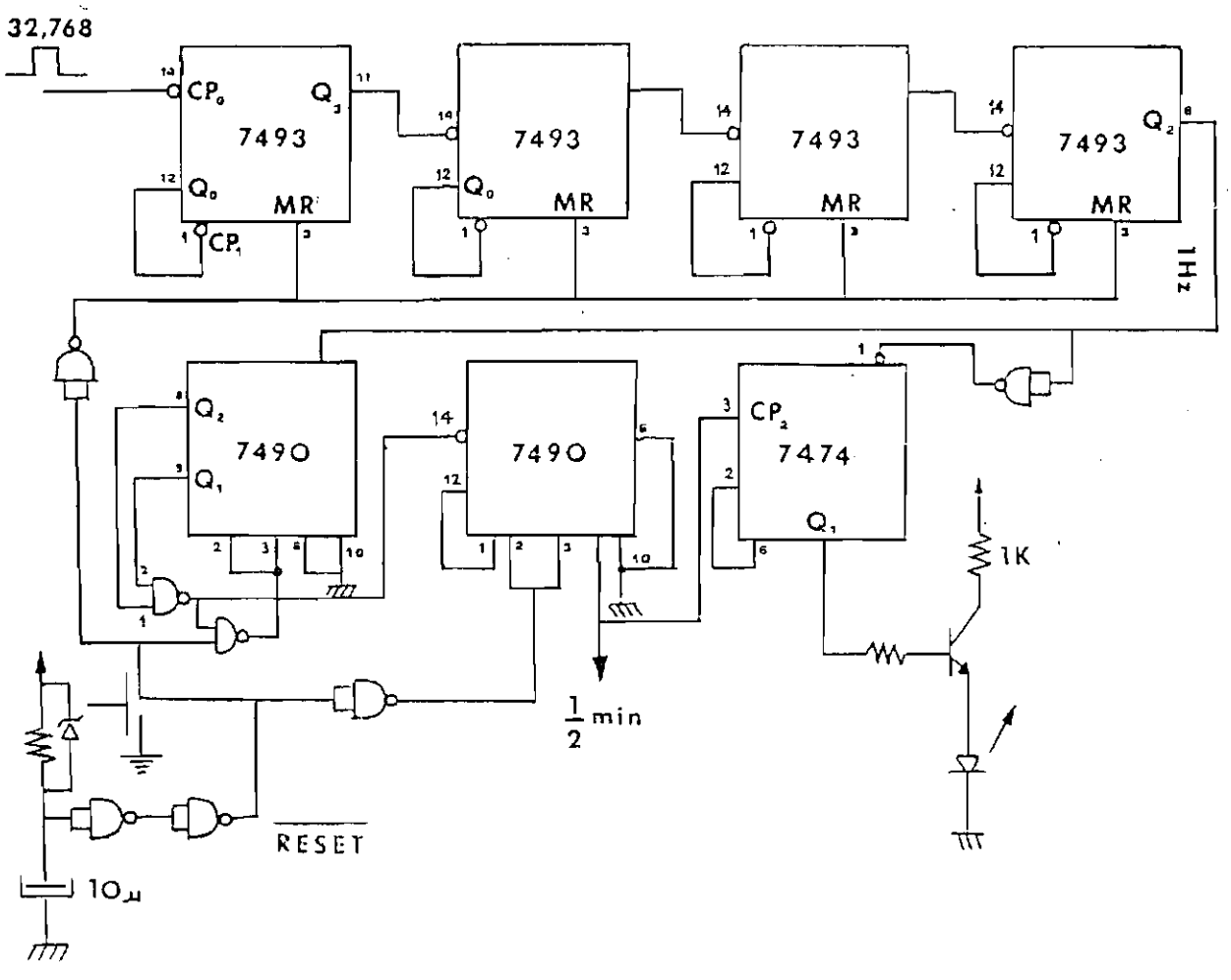

Fig. E.1 - Diagrama do circuito temporizador desenvolvido no INPE.

APÊNDICE F

LISTA DOS GRUPOS DE EXPLOSÕES SOLARES SELECIONADOS PARA ANÁLISE PRELIMINAR

Os 44 grupos de explosções solares (emissão de plasma), selecionados para a análise preliminar (Capítulo 4), estão listados na Tabela F.1, que fornece o dia, o horário de início (UT), a banda de freqüência (em MHz) e a duração (s) de cada explosão selecionada, além do tipo de emissão e da intensidade (em dB, acima do "background" solar) observada.

TABELA F.1 - EXPLOSÕES SOLARES SELECIONADAS PARA A ANÁLISE PRELIMINAR

No.	DATA	TEMPO (UT)	BANDA (MHz)	DUR[3] (s)	TIPO[1]	INT[2]	COMENT
1	27/05/91	17:29	1550–1650	3,4	III	1	
2	29/05/91	15:55	1550–1650	1,9	III	1	SGD (+mo)
3	15/06/91	13:40	1585–1630	~14	?	2	f ≃ 5 MHz/s
4	15/06/91	16:29	1550–1650	<2	IIIG(7)	2	
5	15/06/91	17:25	1550–1650	0,9	III	1	dI/df
6	16/06/91	14:59	1550–1650	2,6	III	1	
7	17/06/91	13:10	1550–1650	<2	IIIG(3)	1–2	SGD e EF
8	28/06/91	17:00	1550–1650	1,4	III	1–2	
9	08/07/91	16:06	1550–1650	1,6	III	1–2	
10	08/07/91	16:37	1550–1650	<2	IIIG(5)	1–2	
11	15/08/91	14:25	1550–1650	<2	IIIGG(4)	<1–2	SGD
12	15/08/91	17:42	1550–1650	<3	IIIG(8)	1–2	
13	19/08/91	17:04	1550–1650	1,8	III	1	
14	19/08/01	17:50	1550–1650	<1	IIIG(2)	<1	
15	22/08/91	15:06	1550–1650	2,4	III	<1	
16	06/09/91	14:31	1550–1650	~2,4	III	1	SGD
17	06/09/91	14:32:30	1550–1650	2,7	III	1	SGD
18	06/09/91	14:41:30	1550–1650	1,6	III	1	
19	06/09/91	14:44	1550–1650	≤3	III	1	
20	06/09/91	14:50	1550–1650	2,7	III	1	
21	09/09/91	14:00	1550–1650	≤1	IIIGG(3)	≤1	EFFREQ
22	09/09/91	15:51	1550–1650	<3	IIIGG(4)	<1	EFFREQ
23	09/09/91	17:40	1550–1650	~1	III	<1	
24	11/09/91	14:56	1550–1650	2	III	~1	
25	11/09/91	16:47	1550–1650	2,3	III	1	

(Continua)

Tabela F.1 (Continuação)

No.	DATA	TEMPO (UT)	BANDA (MHz)	DUR[3] (s)	TIPO[1]	INT[2]	COMENT
26	11/09/91	17:01	1550–1650	1,4	III	<1	
27	11/09/91	17:02	1550–1650	0,9	III	<1	
28	11/09/91	17:04	1550–1650	1,7	III	1	SGD (Cont)
29	11/09/91	17:07	1550–1650	2	III	~1	
30	11/09/91	17:15	1550–1650	2,3	III	1	
31	11/09/91	17:17	1550–1650	<3	IIIGG(11)	≤1	
32	11/09/91	17:38	1550–1650	0,6	III	<1	
33	12/09/91	15:00	1550–1650	<3	IIIGG(3)	≤1	
34	12/09/91	17:48	1550–1650	≤2	III	1	
35	13/09/91	14:26	1550–1650	0,8	III	<1	
36	13/09/91	14:50	1550–1650	<3	IIIG(5)	≤1	EFFREQ
37	14/09/91	13:37	1550–1650	0,6	IIIG(1)	≤1	SGD
38	14/09/91	15:06	1550–1650	≤3	IIIG(2)	<1	EFFREQ
39	17/09/91	14:09	1550–1650	<2	IIIG(2)	≤1	EFFREQ
40	17/09/91	15:35	1550–1650	≤2	IIIG(6)	≤1	
41	17/09/91	17:04	1550–1650	<3	IIIG(2)	≤2	
42	04/01/92	13:41	1590–1700	≤2	III	1	ROI
43	05/01/92	14:02	1500–1700	0,8	III	2	
44	10/01/92	15:01	1500–1700	<1	IIIG	~1	D (EF)
45	10/01/92	15:39	1500–1620	1	III	<1	D (Cont)
46	15/01/92	16:42	1540–1700	~1	III	≤1	
47	16/01/92	15:49	1500–1700	<4	IIIG(3)	1–2	D

1) Para as explosões tipo III (e variantes) foi adotada a nomenclatura do SGD:

- III – para as explosões tipo III isoladas;
- IIIG – para um grupo (≤ 10) de explosões tipo III;
- IIIGG – para um grupo (> 10) de explosões tipo III.

O número que aparece entre parenteses indica o número de explosões do grupo incluídas na análise preliminar.
"?" representa a explosão não classsificada.
"D" indica que a explosão foi digitalizada.

2) Intensidade: os algarismos 1, 2 e 3 representam, respectivamente, uma intensidade de 1, 2 e 3 dB acima do nível do sol calmo ("background" solar).

3) Para os eventos tipo IIIG e IIIGG, as durações são relativas as explosões tipo III individuais.