



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESPECTROSCOPIA DA ATIVIDADE SOLAR NA BANDA DE ONDAS DE RÁDIO ASSOCIADA A FENÔMENOS DE “EJEÇÃO DE MASSA CORONAL – (CME)”

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Bruna Cristina Braga (ETEP FACULDADES, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: bcbraga@das.inpe.br

Dr. José Roberto Cecatto (DAS/ CEA/ INPE, Orientador)
E-mail: jrc@das.inpe.br

Fevereiro de 2007

FÍSICA DO MEIO INTERPLANETÁRIO – FMI
DIVISÃO DE ASTROFÍSICA – DAS
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – 2007

Bruna Cristina Braga (ETEP FACULDADES, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: bcbraga@das.inpe.br

Dr. José Roberto Cecatto (DAS/ CEA/ INPE, Orientador)
E-mail: jrc@das.inpe.br

Assinatura do orientador

Assinatura do bolsista

SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>4</u>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>4</u>
<u>RESUMO</u>	<u>5</u>
<u>1 – INTRODUÇÃO</u>	<u>6</u>
<u>2. SOL, ATIVIDADE SOLAR E FENÔMENOS SOLARES</u>	<u>7</u>
<u>3. INSTRUMENTAÇÃO RELACIONADA AO PROJETO</u>	<u>10</u>
<u>3.1 - O ESPECTRÓGRAFO BSS:</u>	<u>10</u>
<u>3.2 - O SOFTWARE BSSVIEW DE VISUALIZAÇÃO DOS ESPECTROS DINÂMICOS E TRATAMENTO DE DADOS DE EXPLOSÕES SOLARES</u>	<u>12</u>
<u>4. CMES E ASSOCIAÇÃO COM EMISSÃO NA BANDA RÁDIO</u>	<u>13</u>
<u>5. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</u>	<u>15</u>
<u>6 – RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES</u>	<u>18</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:</u>	<u>19</u>
<u>APÊNDICE I: RESUMO SAB</u>	<u>20</u>

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DINÂMICA DO FLUXO MAGNÉTICO QUE ESTIMULA E PREDIZ OS CICLOS DE ATIVIDADES SOLARES.....	7
FIGURA 2: IMAGEM DO EXPERIMENTO SOHO EM ÓRBITA PARA OBSERVAÇÕES SOLARES..	8
FIGURA 3: DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS ARCOS MAGNÉTICOS (CENTROS ATIVOS) DA ATMOSFERA SOLAR ONDE SÃO GERADAS AS EXPLOSÕES SOLARES E EMISSÃO DE RÁDIO ASSOCIADA DENTRO DA FAIXA DECIMÉTRICA.	9
FIGURA 4: VISÃO DA ANTENA DE 9M DE DIÂMETRO DO BSS.....	10
FIGURA 5 - DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO O BRAZILIAN SOLAR SPECTROSCOPE (BSS)	11
FIGURA 6: SEQÜÊNCIA IMAGENS DO CORONÓGRAFO C2 (LASCO) MOSTRANDO A EVOLUÇÃO DE UM CME COM O TEMPO.	13
FIGURA 7: SEQÜÊNCIA DE IMAGENS DO EIT (195Å) MOSTRANDO UM EVENTO OBSERVADO SOBRE O DISCO SOLAR.....	14
FIGURA 8: ESPECTRO DINÂMICO (1700-2000 MHz) REGISTRADO PELA EXPLOSÃO RÁDIO OBSERVADA COM INÍCIO ÀS 16:57 UT EM 05 DE ABRIL DE 2001.	14
FIGURA 9: ESPECTROS DINÂMICOS COM PERIODICIDADE REGULAR E IRREGULAR OBSERVADOS ATRAVÉS DO USO DO SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO BSSVIEW EM CONJUNTO COM O BSS.....	15

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO BSS _____	10
TABELA 2: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO CRUZADA E DESLOCAMENTO TEMPORAL ENTRE BSS E FLUXOS DE RÁDIO ONDREJOV DAS 16 FREQUÊNCIAS SELECIONADAS NA FASE DE DECAIMENTO DO FLARE DE 06 DE JUNHO 2000. _____	16

Resumo

Ejeções de massa coronal (CME) são grandes quantidades de matéria ($10^{15} - 10^{16}$ g) na forma de bolhas de gás gigantes, envoltas em linhas de campo magnético, que são expulsas do Sol, durante um período que pode durar várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para o espaço exterior, a velocidades dentro da faixa de poucas centenas a poucos milhares de km/s. Os CME são acelerados conforme vão se movendo para o espaço exterior. As primeiras evidências deste tipo de evento dinâmico foram obtidas há 3 décadas a partir de observações do coronógrafo a bordo do satélite SO-7. Ainda não se sabe qual a causa destes fenômenos, e também não está certo de onde se originam. Metade encontram-se associados a proeminências eruptivas. Boa parte dos outros que acompanha os “flares” costuma aparecer na forma de “surges” ou “sprays”. Porém, em ambos os casos existe associação com instabilidades em proeminências. Além disso, também podem ocorrer na ausência de “flares” ou proeminências eruptivas. Recentemente, foi observado pelo instrumento Brazilian Solar Spectroscope (BSS) que uma fração significativa de CME encontram-se associados a emissões no contínuo e pulsada dentro da faixa de ondas de rádio decimétricas. Para investigar essa associação de forma mais detalhada, selecionou-se o evento de 06/06/2000, observado pelo BSS dentro da faixa 1200-1700 MHz, que apresenta pulsações durante um período relativamente longo (>20 minutos). A partir da investigação detalhada daquele evento, foi encontrado que a periodicidade das pulsações apresenta intervalos de irregularidade. Para entender a origem das variações entre períodos regulares e irregulares durante este evento foram investigados a correlação cruzada entre as séries temporais de vários canais de frequência com um canal de referência (1280 MHz). Serão apresentados, uma descrição do método empregado nesta análise e os resultados preliminares obtidos.

1 – Introdução

A partir de 1998, entrou em operação regular, na sede do INPE, São José dos Campos-SP, um Rádio-espectrógrafo, batizado de “Brazilian Solar Spectroscope – BSS”, desenvolvido pela linha de pesquisas de Física do Meio Interplanetário – FMI (Sawant et al., 1996; Fernandes, 1997, Sawant et al., 2000), para observações solares na faixa de frequências decimétricas (200-2500 MHz), em conjunto com uma antena parabólica de 9m de diâmetro. O instrumento apresenta alta sensibilidade (~ 2 sfu), altas resoluções espectral (3MHz) e temporal (10-1000 ms) e precisão de tempo absoluto de 3 ms.

O BSS realiza observações diárias (11 – 19 UT), principalmente acima de 1000 MHz, com o intuito de investigar fenômenos da atividade solar (por exemplo, os “flares” solares) associados com os processos de armazenamento e liberação de energia (Sawant et al., 1994; Fernandes e Sawant, 1996; Fernandes et al., 1996a,b; Fernandes e Sawant, 1998; Meléndez et al., 1999). Durante o último ciclo de atividade solar (ciclo 23), foram registrados cerca de 300 explosões solares pelo instrumento BSS – o qual está em processo de atualização e modernização (CNPq, No. Processo: 475723-2004/0). Uma fração significativa (42) foi registrada em associação com fenômenos de Ejeção de Massa Coronal (designados por CME).

Neste caso, foi iniciado um programa de Iniciação Científica com o intuito de treinar um estudante para participar e atuar na análise de explosões solares observadas, e determinação de seus parâmetros observacionais. As atividades incluem a pesquisa sobre fenômenos de Ejeção de Massa coronal (CME), e suas características, associados às explosões solares registradas em ondas decimétricas de rádio pelo instrumento BSS. Resultados preliminares já foram obtidos (Cecatto et al., 2005). Atualmente, está sendo pesquisada a existência de uma assinatura no espectro rádio da ocorrência de CME. Em particular, estão sendo investigadas as características de explosões com emissão rádio pulsada, as quais apresentam uma grande parcela dos fenômenos observados em rádio associados aos CME.

Neste relatório final, são apresentadas as atividades desenvolvidas no decorrer do período de agosto de 2006 a junho de 2007 relacionadas ao projeto de iniciação científica.

2. Sol, atividade solar e fenômenos solares

O Sol é a estrela mais próxima de nosso planeta, a matéria que o constitui é conhecida pelo nome de “plasma”, um gás muito quente, formado de partículas elementares (elétrons e íons positivos) que carrega consigo as linhas de força de seu campo magnético. Sua rotação é dita diferencial, pois é mais rápida nas regiões equatoriais do que nas regiões polares.

O processo de rotação diferencial causa distorções em suas linhas de força que acabam por produzir centros ativos – regiões bem definidas com intensos campos magnéticos, de centenas a poucos milhares de Gauss, representadas por configurações de fluxo magnético em forma de arcadas (“loops”) presentes na atmosfera solar - onde ocorrem os fenômenos chamados de explosões solares. O período durante o qual ocorre o aumento e posterior diminuição gradual no número de arcadas presentes no disco solar, cuja duração média é de 11 anos, é chamado de ciclo de atividade solar. Existem diversos fenômenos associados a este período, entre os principais podemos citar as manchas solares, granulações, fáculas, espículas, praias, protuberâncias eruptivas e quiescentes, os ventos solares, os flares e os famosos CMEs.

Entre esses, os que mais nos interessam são os “flares” e CMEs que estão associados ao intervalo de máximo do ciclo de atividade. O “flare” é uma explosão em que ocorre enorme liberação de energia (10^{24} - 10^{32} ergs) a partir dos centros ativos presentes na atmosfera solar – cromosfera e baixa coroa. Como consequência de alguns “flares” temos as ejeções de massa coronal (CMEs) que são enormes bolhas de gases ionizados e magnetizados lançadas no espaço interplanetário. Cerca de metade dos CMEs encontram-se associados a proeminências eruptivas enquanto boa parte acompanha os “flares”, normalmente, na forma de “surges” ou “sprays”. Entretanto, em ambos os casos existe associação com instabilidades em proeminências. Além disso, também podem ocorrer na ausência de “flares” ou proeminências eruptivas. A Figura 1 abaixo representa o processo responsável pela formação de centros ativos na atmosfera solar.

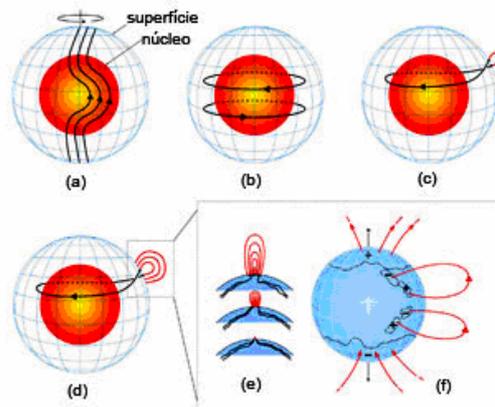


Figura 1: Dinâmica do fluxo magnético que estimula e prediz os ciclos de atividades solares. (a) o Sol tem rotação diferencial – as linhas de campo de seu campo magnético são desviadas no equador; (b) as linhas de força se encontram completamente perpendiculares ao equador solar; (c) a pressão dentro das linhas de força se torna muito intensa gerando arcadas que vêm à superfície – formam-se manchas solares; (d), (e) e (f) um fluxo adicional emerge a partir das manchas solares formando arcadas magnéticos – “loops” - que quando muito intensos causam explosões solares e outros fenômenos. Crédito: NASA. (adaptado <http://www.portaldoastronomo.org/noticia.php?id=627>).

A morfologia de um CME varia desde um formato de jato até um arco, que em casos extremos pode circundar por completo o disco solar (360°). Atualmente, o experimento “Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO)”, a bordo do satélite “Solar Heliospheric Observatory (SOHO)”, observa o Sol para o registro diário de CMEs. O SOHO é uma sonda espacial concebida para o estudo e observação do Sol. Tem como objetivo analisar a estrutura da coroa, do vento solar e obter informação sobre a dinâmica interior solar. O LASCO compreende três coronógrafos C1 (1.1-3 Rs), C2 (2-6 Rs) e C3 (3.7-30 Rs), os quais juntos observam a coroa solar de 1.1 a 30 Rs (Rs significa raio solar).

A frequência de CMEs varia com o ciclo de atividade solar, sendo que no mínimo do ciclo podemos observar cerca de um evento por semana, enquanto que no período de máximo de atividade do ciclo, podem ocorrer de 2 à 3 eventos por dia.



Figura 2: Imagem do experimento SOHO em órbita para observações solares.

Recentemente, foi descoberto que em conjunto com os flares solares os CMEs afetam diretamente o chamado clima espacial. O flare solar é caracterizado pela emissão de grandes quantidades de energia em intervalos de tempo relativamente curtos, no entanto, algumas explosões são tão fracas que não podem ser vistas a olho nu. Uma análise mais detalhada sobre os Flares solares pode ser encontrada no relatório parcial no período de agosto de 2006 a janeiro de 2007.

Em busca de explicações da física solar, diversas observações são realizadas com emissões solares nas faixas centimétricas a decamétricas de ondas de rádio. As observações solares em frequências métricas e decimétricas são essenciais como ferramentas para uma melhor compreensão sobre problemas fundamentais como: armazenamento e liberação de energia, aquecimento do plasma, aceleração de partículas, e transporte de partículas em plasmas magnetizados.

Nas faixas de frequências métrica e decimétrica encontramos explosões de diversos tipos, dentre estas podemos destacar as explosões tipo-III, pois são as mais importantes e úteis devido a permitirem um diagnóstico das condições físicas da região de aceleração. Tratam-se de feixes de elétrons acelerados se propagando pelas arcadas magnéticas a partir da região de aceleração e interagindo com o plasma ambiente gerando a emissão de radiação eletromagnética em frequências próximas à frequência de plasma local. O processo de emissão das explosões tipo-III pode ser visto na figura 3.

Os feixes de elétrons acelerados dentro de “loops” se movimentam em direções ascendentes e/ou descendentes. Os feixes descendentes normalmente geram as explosões tipo-III decimétricas (DCIM) com deriva em frequência reversa (RS), já os feixes ascendentes produzem explosões tipo-III métricas, no entanto, também podem gerar explosões DCIM.

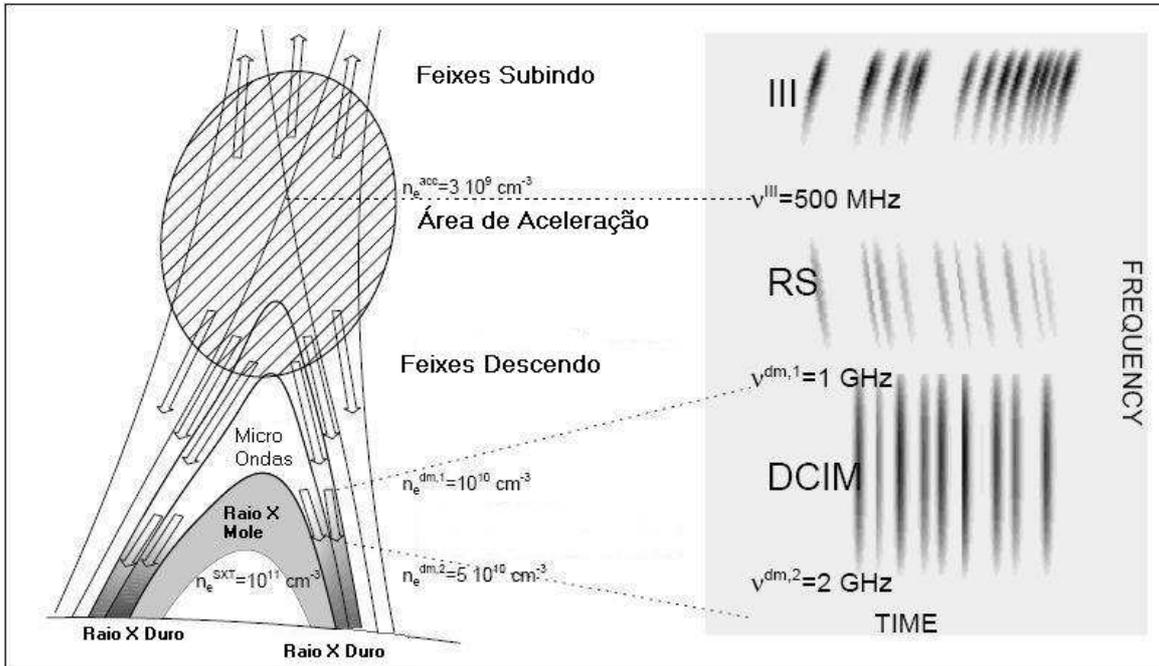


Figura 3: Diagrama representativo dos arcos magnéticos (centros ativos) da atmosfera solar onde são geradas as explosões solares e emissão de rádio associada dentro da faixa decimétrica.

A explosão tipo-III decimétrica:

A explosão tipo-III dm, ocorre geralmente na escala 400–800 MHz, mas pode ocorrer em frequências mais baixas (200 MHz) e também muito mais elevadas. Elas são claramente mais numerosas do que as explosões métricas. Os feixes de elétrons das explosões tipo-III acima de 1GHz normalmente têm movimento descendente no arco magnético. A mudança de movimentos ascendentes e descendentes ocorre geralmente na faixa de 0,4-1 GHz. A explosão tipo-III dm está associada com os feixes de elétrons em “loops” fechados dos centros ativos.

O mecanismo de emissão rádio dominante durante os “flares” depende dos comprimentos de onda observados e das condições locais da fonte das explosões. Embora não seja um padrão, frequentemente a emissão do girossíncrotron domina a emissão em λ -cm e λ -mm (centimétricas e milimétricas) e a radiação de plasma domina em λ -m e λ -dm (métricas e decimétricas). Além da emissão de plasma (tipo-III e variantes - estruturas finas), na faixa de frequências decimétricas podemos também observar a emissão microondas (girossíncrotron em banda larga - contínuo).

O estudo das emissões rádio solares tem contribuído em grande parte para melhorar a compreensão de questões relacionadas aos “flares” solares, por isso a linha de pesquisas de Física do Meio Interplanetário (FMI), da Divisão de Astrofísica do INPE, buscando o aprimoramento desse tipo de observação, desenvolveu um espectrógrafo solar digital decimétrico de banda larga capaz de operar com alta resolução e alta sensibilidade. Esse instrumento é conhecido como BSS (Brazilian Solar Spectroscope) e através dele muitos avanços já foram alcançados. Detalhes sobre este instrumento são dados na próxima seção.

3. Instrumentação relacionada ao projeto

3.1 - O espectrógrafo BSS:

O BSS é um rádio-espectrógrafo solar que opera em conjunto com um refletor parabólico de 9m de diâmetro, instalado no campus do INPE, em São José dos Campos (Figura 4). A Tabela 1 abaixo apresenta suas principais características.



Figura 4: Visão da antena de 9m de diâmetro do BSS.

Tabela 1 – Principais características do BSS

Antena/Montagem	9 metros / polar
Alimentador	Log-periódico cruzado
Faixa de frequências	1000-2500 MHz
Resolução temporal	10, 20, 50, 100, 500 ou 1000 ms
Resolução Espectral	3 MHz
Precisão tempo absoluta	3ms
Sensibilidade	~2-3sfu
Número de canais	25 ou 50 ou 100
Visualização	Tempo quase-real
Campo de visada	Todo o disco solar
Intervalo de observações	11:00-19:00 UT

Os principais aspectos operacionais do BSS são:

- a) Visualização dos dados em tempo quase-real na forma de espectro dinâmico (gráfico da variação da intensidade da emissão em função do tempo e da frequência), o que possibilita a mudança dos parâmetros de observações de acordo com a atividade solar;
- b) Flexibilidade na escolha das resoluções temporal e espectral e da banda de frequências de observação, dependendo das fontes observadas;
- c) Precisão de tempo absoluta ~ 3 ms, o que possibilita estudos multi-espectrais a partir de dados de observação simultâneas realizadas por outros observatórios;
- d) Único espectrógrafo digital do hemisfério ocidental Sul com observações solares na faixa de ondas decimétricas.

Até recentemente, o instrumento utilizava o mesmo sistema de aquisição de dados – hardware e software – desenvolvido há uma década. Os dados provenientes do analisador de espectros – que faz a varredura do sinal na faixa de frequências e com as resoluções selecionadas – são digitalizados no microcomputador IBM-PC1. Posteriormente, os dados digitalizados são enviados a um segundo micro-computador, onde são visualizados na forma de espectro dinâmico, em tempo quase real (5 minutos) e armazenados para posterior análise. O software BSSView (Faria, 1999) é utilizado para visualização e análise preliminar de dados espectrais. O monitoramento contínuo da atividade solar através do BSS é feito diariamente durante cerca de 8 horas (11-19 UT) o que gera um volume de cerca de 120 Mbytes de dados diários. A Figura 5 a seguir mostra o diagrama de blocos representando o novo sistema de recepção e aquisição de dados do BSS.

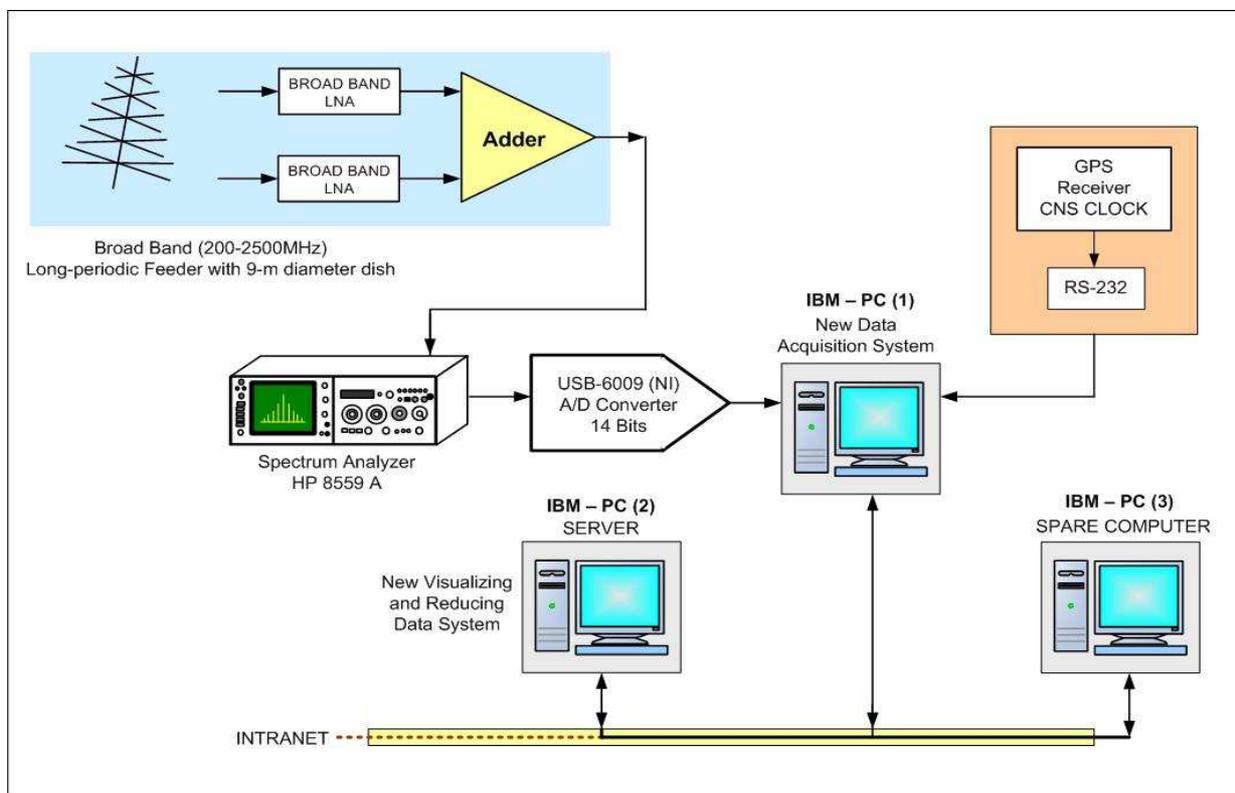


Figura 5 - Diagrama de blocos representando o Brazilian Solar Spectroscope (BSS)

No entanto, o sistema de aquisição de dados estava obsoleto e apresentando falhas constantes. Além disso, o BSSView está desatualizado e necessitando de novas rotinas para a análise detalhada de explosões solares. Também estamos no período de mínimo de atividade do ciclo solar. Por todos estes motivos, no presente momento todo o sistema de aquisição de dados do BSS está sendo atualizado através de um Projeto aprovado junto ao CNPq (No. Processo: 475723-2004/0). Isto com o intuito de modernizar todo sistema de aquisição de dados do instrumento - incluindo o “software” de tratamento e análise de dados - e recuperar sua competitividade.

3.2 - O software BSSView de visualização dos espectros dinâmicos e tratamento de dados de explosões solares

O espectro dinâmico da radiação solar na banda de rádio fornece informações a respeito do tipo de fenômeno energético observado. Além disso, particularmente na banda de ondas decimétricas, outras informações podem ser obtidas, como por exemplo, usando-se um modelo de densidade para a atmosfera solar, pode-se estimar a altura da região de aceleração das partículas, o tipo de agente excitador – por exemplo feixe de partículas aceleradas no caso das explosões tipo-III – o comprimento de percurso e a velocidade do feixe de partículas na atmosfera solar, o que pode ser medido através da taxa de deriva em frequência (razão intervalo de frequências por intervalo de tempo).

Os espectros dinâmicos dos fenômenos solares são registrados diariamente pelo instrumento BSS, apresentado anteriormente. Este instrumento possui um “software” chamado de BSSView (Faria, 2001) que é o responsável pela visualização dos espectros dinâmicos em tempo quase-real, e também pelo tratamento preliminar dos dados adquiridos e armazenados. Uma descrição simples, porém um pouco mais detalhada deste software, desenvolvido na linguagem IDL (Interactive Data Language), se encontra no relatório parcial 08/2006-01/2007.

Os espectros dinâmicos com altas resoluções temporal e espectral dos fenômenos registrados pelo BSS permitem determinar os seguintes parâmetros observacionais das estruturas individuais:

- duração total;
- largura de banda instantânea;
- separação em frequência entre duas estruturas consecutivas;
- taxa de deriva em frequência;
- classificação do tipo espectral e determinação dos parâmetros espectrais.

Portanto, é uma ferramenta versátil e muito útil para iniciar a análise dos dados dos fenômenos observados pelo BSS.

4. CMEs e associação com emissão na banda rádio

Desde as primeiras observações pelos satélites Skylab e SMM, as Ejeções de Massa Coronal (CME) têm sido cada vez mais investigadas. Contudo, até o presente sua origem e mecanismo de disparo permanecem uma questão em aberto, quer estejam associados ou não aos “flares” solares. Observações recentes sobre um amplo espectro sugerem que a energia dos “flares” é liberada em regiões de onde se origina a emissão de rádio na banda decimétrica. Por este motivo, a investigação da emissão radio decimétrica observada em associação com CME pode dar pistas para a solução das questões acima.

O instrumento BSS (Sawant et al., 2001) observa diariamente (11-19 UT), com altas resoluções em tempo (100, 50, 20 ms) e frequência (50, 100 canais dentro da banda 1000-2500 MHz), os espectros dinâmicos de explosões solares. Durante o período 1999-2002, foram observados 274 CME pelo experimento “Large Angle and Spectroscopic Coronal Observatory - LASCO” a bordo do satélite SOHO. Desses 42 CME estavam associados com dados do BSS e foram selecionados para análise. Foi observado que em cerca de metade dos casos apenas um tipo de emissão da explosão solar em rádio estava associada com o início dos CME, enquanto que no restante dos casos dois ou mais tipos de emissão foram observados em associação com o disparo dos CME. Os tipos de emissões dominantes foram contínuo e/ou pulsações combinados ou não (Cecatto et al., 2005). A emissão no contínuo indica uma possível associação com explosão tipo IV em rádio. Por sua vez, as pulsações sugerem um aprisionamento mais precipitação de partículas dentro de uma arcada de campo magnético.

Podemos dar um exemplo observado pelo coronógrafo C2 às 17-18 UT do dia 5 de abril de 2001. A figura 6 mostra uma seqüência de 5 imagens com o tempo de evolução de um CME observado pelo instrumento LASCO a bordo do satélite SOHO.

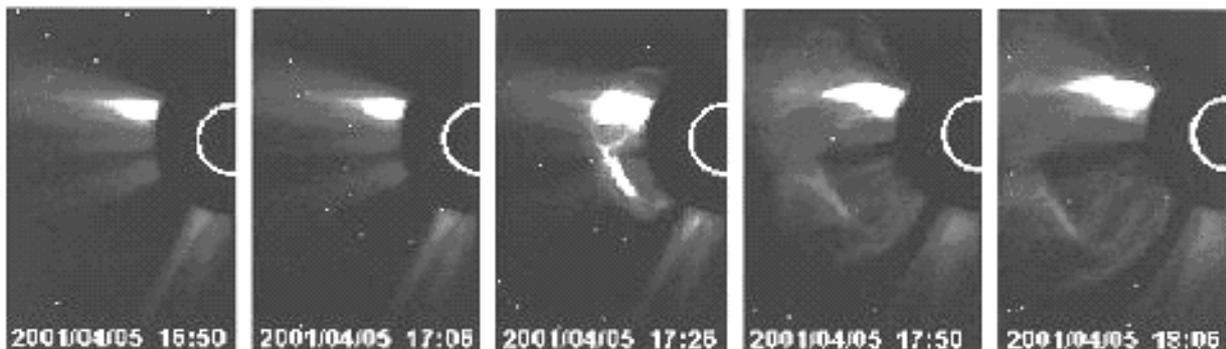


Figura 6: Seqüência imagens do coronógrafo C2 (LASCO) mostrando a evolução de um CME com o tempo. Por volta das 17:26 UT o CME pode ser visto como um brilhante arco magnético. O semicírculo branco indica o limbo do sol, enquanto o disco preto indica o pequeno limite do campo de visão do C2.

É claro, que a seqüência de imagens mostra que um CME começa antes das 17:26 UT. A seqüência de 4 imagens do instrumento EIT (“Extreme-ultraviolet imaging telescope” - a bordo do satélite SOHO) demonstrando a emissão EUV do disco solar durante aproximadamente o mesmo intervalo de tempo é mostrado na figura 7.

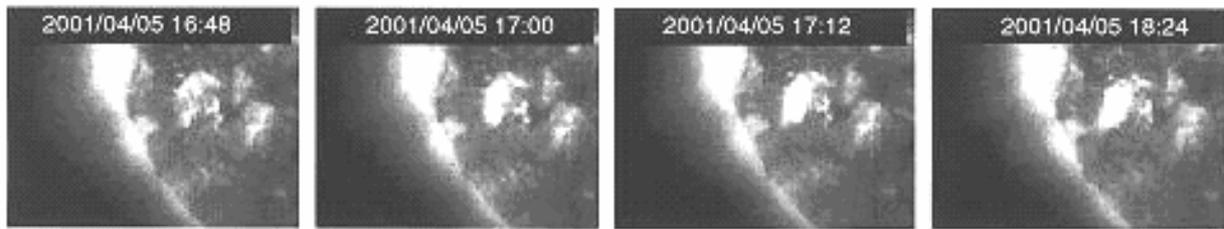


Figura 7: Seqüência de imagens do EIT (195Å) mostrando um evento observado sobre o disco solar (NOAA 9415, S24 E50) registrado entre 17:00 e 18:24 UT em 05 de abril de 2001.

Observando a estrutura na figura, fica claro que a região ativa NOAA 9415 localizada no S24 E50, próxima ao centro, mostrou um visível aumento no brilho por volta de 17:00 UT, permanecendo brilhante por mais de uma hora.

O espectro dinâmico registrado na faixa de comprimentos de onda decimétricos (1700-2000 MHz) pelo BSS pode ser visto na Figura 8 abaixo.

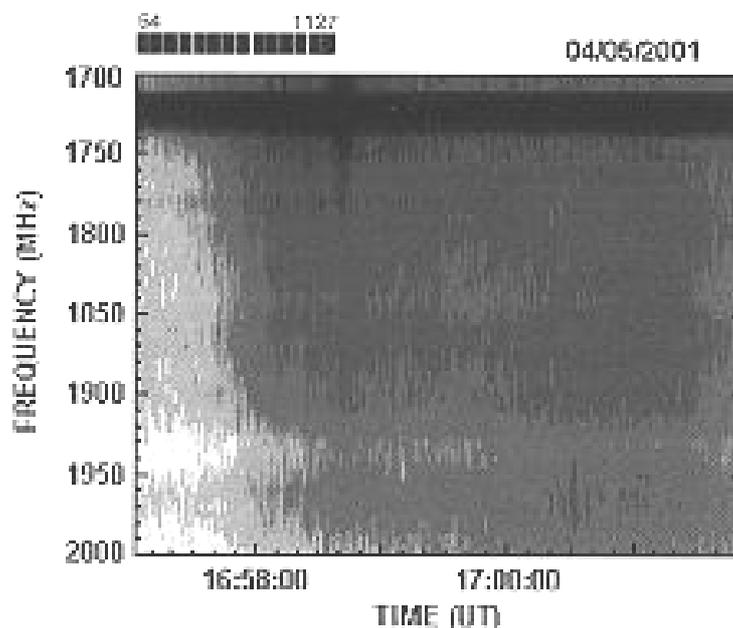


Figura 8: Espectro dinâmico (1700-2000 MHz) registrado pela explosão rádio observada com início às 16:57 UT em 05 de abril de 2001. Uma região escura observada no início da explosão rádio indica uma forte emissão na banda larga do contínuo.

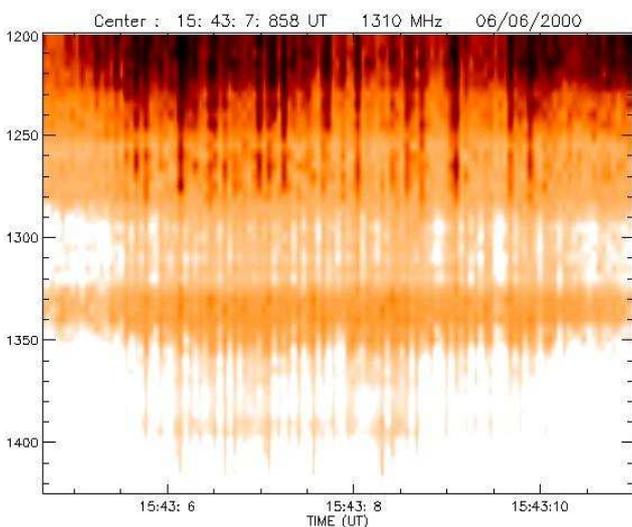
A emissão do contínuo em banda larga (>300MHz) iniciando-se por volta de 16:57 UT pode ser vista na figura variando de 1700 MHz para frequências altas. Esta figura mostra um exemplo no qual os dados obtidos sugerem fortemente uma associação entre CME (LASCO) e emissão rádio (BSS). Além da emissão no contínuo, foi observado que grande parte dos fenômenos observados em rádio associados aos CME apresentou emissão pulsada, além da emissão pulsada combinada com outros tipos de emissão, sendo que os tipos dominantes foram pulsações e contínuo.

Dando seqüência ao trabalho, este projeto de Iniciação científica faz parte de um programa de investigação das características da emissão pulsada associada aos CME com o intuito de investigar a presença de alguma assinatura nos espectros rádio responsável pelo disparo de CME.

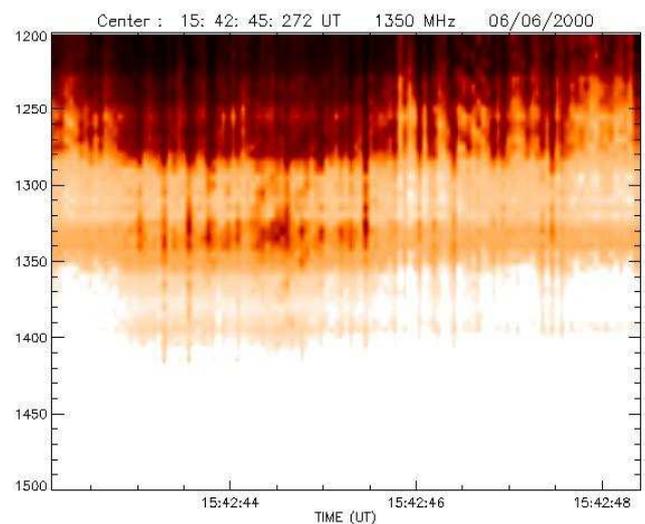
5. Descrição das atividades desenvolvidas

Para iniciar o estudo de investigações para relacionar os CME associados às explosões solares observadas em rádio é necessário a compreensão de conceitos indispensáveis da Física solar. Neste sentido, durante os primeiros meses de bolsa o orientador recomendou algumas pesquisas e estudos complementares que estão descritos detalhadamente no relatório parcial. Foi estudado um pouco a respeito das características do Sol, ciclo de atividade e fenômenos solares, além de textos sobre radiotelescópios usados para a pesquisa nesta área, que foram construídos e que estão em planejamento ou em desenvolvimento em diferentes países. Além disso, também foi aprendido sobre o instrumento usado para pesquisa solar no INPE, o espectrógrafo BSS, seu “hardware” e “software” de visualização e tratamento de dados, o BSSView. Algumas atividades complementares foram realizadas como consultas a sites (listados no final do relatório como referências) de atividade solar muito úteis para a freqüente atualização acerca de informações solares e para a busca de dados a respeito do Sol. Foram vistos também pequenos vídeos cujas imagens foram adquiridas pelo observatório espacial SOHO (Solar And Heliospheric Observatory). Através destes vídeos foi possível visualizar e melhor compreender a estrutura solar e os diversos fenômenos que ocorrem em sua superfície, em particular “flares” solares e CME.

Nos meses seguintes, relativos ao ano de 2007, iniciou-se o trabalho com a investigação dos espectros dinâmicos da emissão rádio dando ênfase a emissão pulsada. Foi selecionado um conjunto de dados de explosão solar observada pelo BSS (1200-1700 MHz) no dia 06/06/2000, com 50ms de resolução temporal, cuja emissão do tipo pulsado teve uma duração relativamente longa (cerca de 20 minutos). Esta explosão solar foi observada simultaneamente em frequências mais altas, até 4500 MHz, pelo Ondrejov Observatory da República Tcheca. Foi encontrado que a periodicidade das pulsações apresenta intervalos durante os quais ocorrem irregularidades (Figura 9 abaixo).



(a)Espectro dinâmico com peridiocidade regular observado às ~ 15:43:08 UT do dia 06/06/2000 pelo BSS



(b)Espectro dinâmico com peridiocidade irregular observado às ~ 15:42:45 UT do dia 06/06/2000 pelo BSS.

Figura 9: Espectros dinâmicos com periodicidade regular e irregular observados através do uso do software de visualização BSSView em conjunto com o BSS. Note que o eixo vertical da freqüência é decrescente de acordo com o padrão adotado internacionalmente.

Com o intuito de compreender a origem das pulsações e as variações observadas nos períodos foram calculados a correlação cruzada e deslocamentos temporais entre as séries temporais de vários canais de frequência com a série de um canal de referência (1280 MHz). Foram encontrados períodos dentro da faixa de intervalos de 3.5 a 78.8 s. A bolsista acompanhou estes trabalhos e participou da montagem da Tabela 2 (a seguir) correspondente aos coeficientes de correlação cruzada e deslocamentos temporais entre os canais de frequência. Além disso, participa como co-autoria do trabalho intitulado: “Periodicidade irregular de pulsações observada na banda rádio durante o decaimento do Flare de 06 de junho de 2000”, submetido à XXXIII Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira, cujo resumo se encontra no Apêndice I.

Compared fluxes at frequencies [MHz]	15:40:05–15:45:33 UT		15:45:34–15:51:02 UT		15:51:03–15:56:31 UT		15:56:32–16:02:00 UT	
	CC coefficient	Time shift [ms]						
1280 & 1200	–	–	–	–	0.88	0	0.87	0
1280 & 1250	–	–	–	–	0.86	0	0.87	0
1280 & 1300	0.92	0	0.95	0	0.89	0	0.85	0
1280 & 1350	0.84	0	0.93	0	0.86	0	0.80	0
1280 & 1400	0.76	0	0.92	0	0.81	0	0.76	-150
1280 & 1450	0.59	0	0.89	0	0.75	0	0.71	0
1280 & 1500	0.48	–	0.90	0	0.68	0	0.66	-50
1280 & 1550	0.53	-100	0.90	0	0.65	-100	0.59	100
1280 & 1600	0.47	–	0.89	50	0.64	0	0.60	-150
1280 & 1650	0.45	–	0.87	0	0.63	0	0.58	150
1280 & 2150	0.20	–	0.42	–	0.28	–	0.31	–
1280 & 2500	0.31	–	0.52	–	0.12	–	0.57	-150
1280 & 3000	0.27	–	0.79	3750	0.54	550	0.07	–
1280 & 3500	0.18	–	0.42	–	-0.37	–	0.29	–
1280 & 4000	0.10	–	0.39	–	-0.42	–	0.26	–
1280 & 4450	0.09	–	0.39	–	-0.41	–	0.22	–

Tabela 2: Coeficiente de correlação cruzada e deslocamento temporal entre BSS e fluxos de rádio Ondrejov das 16 frequências selecionadas na fase de decaimento do Flare de 06 de Junho 2000.

Na tabela, observamos que os valores do deslocamento temporal estão presentes somente nos coeficientes de correlação cruzada ≥ 0.5 . O coeficiente de correlação indica a dependência entre a série temporal escolhida com relação à série tomada como referência. Portanto, quanto maior o coeficiente maior e melhor a dependência. O contrário ocorrendo para valores menores do coeficiente. Além disso, isto indica a coerência ou não do mecanismo de emissão dentro de determinada faixa de frequências correspondente às séries das 2 frequências comparadas. Por outro lado, o valor positivo do deslocamento temporal significa que a melhor correlação foi obtida com um deslocamento positivo no tempo com relação à série tomada como referência, com o mesmo ocorrendo no caso de deslocamentos negativos.

Em suma, durante este período a bolsista realizou as seguintes atividades:

- Pesquisas a respeito do Sol sua estruturas interna e externa, composição química, principais características, como se dá o transporte de energia e a importância da investigação solar;
- Aprendeu sobre fenômenos solares -entre os mais energéticos- “Flares e CMEs”, sua influência no clima espacial, a radio emissão de flares solares, o que são espectros eletromagnéticos, tipos de explosões solares, entre outros;

- Aprendeu sobre espectros de explosões decimétricas e suas variações entre a qual se destaca a explosão tipo III. Trabalhou com espectros destas explosões e das tipo fibra e pulsações regulares e irregulares;
- Estudou o catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscopy (BSS) nos anos de 1999-2002;
- Conheceu e começou a utilizar o software de visualização BSSView adquirindo a habilidade de criar espectros no mesmo.
- Também iniciou o trabalho com programas na linguagem IDL, seus comandos e utilidades; especificamente o software BSSView;
- Teve contato com diversas publicações científicas entre elas: artigos, livros, sites, manuais, Cds, revistas, resumos;
- Adquiriu habilidade de ler e trabalhar com artigos e livros científicos estrangeiros especificamente escritos em inglês, adquirindo um pequeno vocabulário científico;
- Conheceu e começou a utilizar o programa gráfico GNUPLOT;
- Aprendeu conceitos de eletromagnetismo e da Física moderna;
- Participou da elaboração do resumo de um artigo científico sobre os resultados de pesquisas a serem submetidos para publicação;
- Teve contato com a instrumentação utilizada no projeto BSS e pôde conhecer todo seu sistema de monitoramento solar;
- Efetuou pesquisas sobre o Sol através do acesso a sites de atividades solares;
- Participou de palestras científicas voltadas para a astrofísica mostrando suas diversas ramificações (áreas de atuação);
- Criou espectros dinâmicos de explosões solares registradas pelo instrumento BSS usando o BSSView;
- Aprendeu sobre projetos com radiotelescópios desenvolvidos ou em desenvolvimento para estudos do Sol como o VLA Very Large Array, FASR Fast Large Solar Array, NMA Nobeyama Millimeter Array e GMRT Giant Metrewave Radio Telescope;
- Trabalhou e aprendeu novos aplicativos além de se aperfeiçoar em programas já conhecidos;
- Pôde visualizar imagens e vídeos adquiridos por satélites que estão em órbita para investigações solares como SOHO e TRACE e assim melhor compreender como os fenômenos são desencadeados na superfície solar.

Estes resultados indicam que o trabalho da bolsista foi muito positivo para o grupo de trabalho e para ela, e sugerem a continuidade das atividades do projeto aplicando a mesma metodologia a um conjunto maior de dados para a verificação dos resultados e validação da metodologia aplicada.

6 – Resultados obtidos e conclusões

Durante o período Julho de 2006 a Maio de 2007, a bolsista participou das atividades relacionadas ao projeto, aprendendo sobre o Sol, ciclo de atividade e fenômenos solares. Aprendeu a pesquisar na “internet” informes de atividade e dados sobre fenômenos solares, e também sobre o espectrógrafo Brazilian Solar Spectroscope (BSS) – hardware e software - usado pelo grupo de trabalho para a coleta de dados científicos dentro da banda de ondas de rádio decimétricas (com comprimentos de onda na escala de decímetros). Tomou conhecimento sobre a plataforma de trabalho Interactive Data Language (IDL) e sobre o software BSSView utilizado para a visualização dos espectros dinâmicos e tratamento preliminar dos dados coletados. A bolsista ainda aprendeu a usar o BSSView para produção de espectros dinâmicos e realização de processamentos básicos com os dados do instrumento.

Por fim, a bolsista participou da preparação do trabalho intitulado: “Periodicidade irregular de pulsações observada na banda rádio durante o decaimento do Flare de 06 de junho de 2000”, cujo resumo foi submetido e aceito para apresentação no congresso XXXIII Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB) que será realizado no mês de Setembro de 2007. A bolsista conheceu o trabalho e metodologia de correlação de séries de dados e participou na preparação da tabela com os resultados deste trabalho. Este trabalho está em andamento e em breve deveremos submeter a versão final do artigo para publicação num periódico internacional com corpo de revisores.

Referências Bibliográficas:

- [1] Space Environment Center (SEC), nov.2006 [on-line] <<http://www.sec.noaa.gov/> >
- [2] National Geophysical Data Center, nov.2006 [on-line] <<http://www.ngdc.noaa.gov/> >
- [3] DX-Listeners' Club, nov.2006 [on-line] <<http://www.dxlc.com/solar/> >
- [4] Solar Monitor, nov.2006 [on-line] <<http://www.solarmonitor.org/> >
- [5] Cecatto, J.R., Soares, A.C., Fernandes, F.C.R., Madsen, F.R.H., Andrade, M.C. and Sawant, H.S. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 67:1674-1679, 2005.
- [6] Faria, C., Dissertação de Mestrado, INPE-8036-TDI/752, 1999.
- [7] Fernandes, F.C.R., Tese de Doutorado, INPE-6396-TDI/612, 1997.
- [8] Fernandes, F.C.R., Sawant, H.S. *Proc. 6th Brazilian Plasma Astrophysics Workshop*, 125, 1996.
- [9] Fernandes, F.C.R., Sawant, H.S.; Zheleznyakov, V.V. *Advances in Space Research*, 17(4/5), 143, 1996a.
- [10] Fernandes, F.C.R., Sawant, H.S.; Zheleznyakov, V.V. *Solar Physics*, 168(1): 159, 1996b.
- [11] Fernandes, F.C.R., Sawant, H.S. *Proc. 7th Brazilian Plasma Astrophysics Workshop*, 357, 1998.
- [12] Martinon, A.R.F., Relatório de Iniciação Científica – PIBIC-CNPq/INPE, 2000.
- [13] Melendez, J.L., Sawant H.S.; Fernandes, F.R.C.; Benz, A.O., *Solar Physics*, 187,77,1999.
- [14] Sawant, H.S.; Fernandes, F.C.R. and Néri J.A.C.F., *Astrophysical Journal Supplement Series*, 90, 689-691, 1994.
- [15] Sawant, H.S.; Sobral, J.H.A.; Fernandes, F.C.R.; Cecatto, J.R.; day, W.R.G.; Néri J.A.C.F., Alonso, E.M.B. and Moraes, A., *Advances in Space Research*, vol. 17(4/5): 391, 1996.
- [16] Sawant, H.S. et al., *ASP Conference Series*, 206, 357, 2000.
- [17] Kahler, S.W. *Solar Flares and Coronal Mass Ejections. Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, September 1992, Vol. 30, Pages 113-141
- [18] Sawant, H.S. et al. 2001, *Brazilian Solar Spectroscopy*, *Sol. Physics*, 200:167-176.

Apêndice I: Resumo SAB

PERIODICIDADE IRREGULAR DE PULSAÇÕES OBSERVADA NA BANDA RÁDIO DURANTE O DECAIMENTO DO FLARE DE 06 DE JUNHO DE 2000

J. R. Cecatto¹, H. Meszarosova^{1,2}, H. S. Sawant¹, M. Karlicky², F.C. R. Fernandes³, J. Rybak⁴, M. C. Andrade¹, K. Jiricka², B. C. Bragal

1 - INPE

2 - Ondrejov Observatory, Czech Republic

3 - UNIVAP

4 - Astronomical Institute, Slovak Republic

Durante a fase de decaimento do "flare" de 06 de Junho de 2000, entre _ 15:40 e 16:02 UT, observado pelos rádio-espectrógrafos do Brazilian Solar Spectroscope (BSS), Brasil, e do Observatório Ondrejov (OO), Rep. Tcheca, foram registrados irregularidades na periodicidade de pulsações dentro da faixa de frequências de 1200-4500 MHz. Para investigar isto, foram pesquisados períodos característicos pelo método de "wavelets". Para entender a origem das variações entre períodos regulares e irregulares durante este evento foram investigados a correlação cruzada entre as séries temporais de vários canais de frequência com um canal de referência, os deslocamentos temporais, coerência, e diferença de fase entre as séries temporais dos canais de frequência selecionados. O estudo estatístico global em rádio deste "flare" revela períodos característicos dentro do intervalo de 2-48 s. A correlação cruzada entre distintos canais de frequência auxiliam na determinação da emissão gerada pelos mecanismos girossíncrotron e de plasma. A análise estatística detalhada mostra que este evento deve ser composto de 2 partes, uma gerada pelo mecanismo de emissão de plasma e outra provavelmente devido a emissão girossíncrotron. É feita uma discussão dos períodos característicos encontrados na emissão rádio dentro da banda decimétrica associada a este flare.