

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

RODNEY VICENTE DE SOUZA

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA COMPONENTE S EM 7 GHz  
ANTES DE GRANDES EVENTOS

São Paulo  
2009

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA COMPONENTE S EM 7 GHz  
ANTES DE GRANDES EVENTOS

Dissertação apresentada à Universidade  
Presbiteriana Mackenzie, como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Elétrica. Orientadora:  
Profa. Dra. Emilia Correia

São Paulo  
2009

RODNEY VICENTE DE SOUZA

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA COMPONENTE S EM 7 GHz,  
ANTES DE GRANDES EVENTOS

Dissertação apresentada à Universidade  
Presbiteriana Mackenzie, como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Elétrica.

**Aprovado em 03 de Agosto de 2009**

BANCA EXAMINADORA

---

Professora Doutora Emilia Correia  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

---

Professor Doutor Carlos Guilherme Gimenez de Castro  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Professor Doutor José Roberto Cecatto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

---

Professor Doutor Joaquim Eduardo Rezende Costa (1° suplente)  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

---

Professora Doutora Adriana Válio Roque da Silva (2° suplente)  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Senhor, daí me sabedoria para que cresça em mim a humildade e eu possa aprender sempre com todos. E que o conhecimento adquirido seja sempre usado para o bem comum.

*Dedico este trabalho à Profa. Flavia Michele L. G Oliveira que é um presente de Deus em minha vida. É o anjo humano que dedica sua vida para me proteger e orientar ,vigiando e acompanhando sempre a construção de boa parte dos meus sonhos.*

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter afastado de mim a morte, pois, entre tantas outras coisas, isto permitiu que eu concluísse este trabalho. Todos os méritos positivos desta obra são motivo de louvor a esta força vital manifestada em toda natureza.

Agradeço a meus pais, de maneira mais especial, a minha mãe, Nilce aparecida Vicente. Exemplo de amor, simplicidade, luta, trabalho e honestidade, que tem enorme sabedoria oriunda da faculdade da vida, e foi responsável pelo abrigo e o sustento que tive antes de aprender a ceifar neste campo de ferozes predadores, que é a nossa vida.

Agradeço meus amigos e familiares pelas idéias, exemplos e acompanhamentos, que ajudaram a construir minha formação. Sem esta, eu certamente não teria estrutura, ética, moral e psicológica para superar os inúmeros ‘dificultadores’ desta empreitada.

Agradeço aos professores, do Centro de Rádio Astronomia e Aplicações Espaciais (CRAAM) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que contribuíram diretamente ou indiretamente nesta primeira etapa da minha formação. Especialmente todos vocês que acompanharam a evolução deste trabalho deste o início, e hoje o engrandecem participando desta banca de avaliação.

Agradeço a minha antiga colega de faculdade, a Dra. Arline Maria Melo, que há mais de 10 anos apresentou-me a Professora Emilia Correia. Desde então, a Dra Emilia Correia não tem poupado esforços para corrigir os meus milhares de textos de análise da atividade solar, lapidando sempre as várias idéias que me fizeram ‘veredar’ por tantos caminhos, especialmente durante este trabalho. Ela possibilitou meu desenvolvimento técnico e intelectual, na medida em que não coibiu minhas inúmeras tentativas de desvendamento dos padrões de comportamento da atividade solar, que se ocultavam e ainda se ocultam no sinal em 7 GHz. Pra ela peço saúde e sabedoria para que possa formar outros multiplicadores do saber. O mesmo, desejo ao Dr. Luiz Claudio Lima Botti, meu primeiro orientador no craam, que antes de nossa estrela o Sol, me convidou a observar as quase estrelas de nossa galáxia e de outras galáxias, mas que por um acaso não foi meu orientador científico. Porém, foi o amigo que mais me animou a não desistir durante estes mais de 6 anos de dedicação a este trabalho.

Por fim, agradeço ao Prof. Pierre Kaufmann, o orientador dos orientadores, que como resultado de uma vida de dedicação às investigações científicas, nos deu o CRAAM, e possibilitou com isto o meu encontro com pessoas do bem como o Aurélio, o Zé Henrique o Zé Carlos, a Neide, o Valdomiro, nosso irmão nisei Leandro Tesima, todos os pesquisadores, e tantos outros que por aqui passaram, especialmente, os amigos Marco Aurélio, Alessandra e Andreza, Elena, entre tantos outros. Todos contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho. Sem as contribuições do Prof. Kaufmann nossas histórias de vida seriam muito diferentes e eu não poderia escrever, se quer, esta pagina de agradecimentos, quanto mais este trabalho inteiro.

**Que Deus conduza para a felicidade a vida de cada um de nós.**

## Resumo

Os fenômenos solares são os principais agentes perturbadores da magnetosfera terrestre e podem produzir tempestades geomagnéticas. Durante as tempestades geomagnéticas os elétrons, presentes na magnetosfera, podem ser acelerados até velocidades relativísticas. Estes elétrons causam grandes danos aos equipamentos elétricos nos satélites em órbita. Durante várias décadas as ejeções de massa coronal (EMCs) e as explosões solares têm sido objeto de estudos, mas ainda não se entende totalmente os processos físicos, que os antecede. O objetivo deste trabalho é contribuir para a previsão destes eventos solares, através da análise dos padrões de comportamento do sinal em 7 GHz. Os dados foram obtidos com alta sensibilidade ( $>0,5$  sfu) e resolução temporal (10 ms) com o Rádio Polarímetro Solar em operação no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI). A análise do sinal rádio em 7 GHz é feita para o período de grande atividade solar de outubro de 2003. Utilizamos a técnica ondeletas de Multi-Resolução para identificar as componentes de período do sinal. Foi feita a comparação entre as variações na amplitude do ruído do sinal e na potência das componentes de períodos associados a polarização circular em 7 GHz e a evolução da configuração magnética das regiões obtidas do experimento MDI onde ocorreram as grandes explosões. Os resultados mostram aumentos na amplitude do ruído do sinal associados a aumentos pronunciados na potência das componentes de períodos do sinal em diferentes faixas, minutos antes das explosões menores (classificação em raios X  $\leq$  B), horas ou até dia antes das explosões maiores (classificação em raios X C, M ou X). Apresentamos detalhadamente neste trabalho, o padrão de comportamento da componente S em 7 GHz, que antecede as explosões solares.

## Abstract

The solar phenomena are the main agents of magnetosphere disturbance and geomagnetic storms. During geomagnetic storms, the electrons in the magnetosphere can be accelerated to high speeds. These electrons can cause great damage to electrical equipment on the orbital satellite. For several decades the coronal mass ejections (CMEs) and the solar bursts have been studied but their physical processes are not fully understood. The goal of this work is establishing a possible tool to predict the occurrence of solar events from the behavior 7 GHz signals. The radio data were obtained with high sensitivity ( $<0.5$  sfu) and temporal resolution (10 ms) with the Solar Radio Polarimeter in operation at the Itapetinga Radio Observatory (ROI). The analysis of the radio signal is made for the period of high solar activity on October 2003. The Wavelet Multi-Resolution technique was used to analyse the components of the period of radio signal at 7 GHz. We compare the signal noise amplitude, which also compared with the polarization changes at 7 GHz and the evolution of magnetic configuration of active regions obtained with MDI. The results show increase in the noise amplitude at 7 GHz and the appearance of period components, minutes before the minor burst (class  $\leq B$ ), and hours or even day before the larger burst (class C, M, or X). We present in detail the behavior of component *S* at 7 GHz in association with the activity increasing and the occurrence of great explosions.

## Lista de ilustrações

<b>Figura 1.1-</b> Imagem de uma EMC.....	19
<b>Figura 1.2-</b> Exemplos de auroras.....	20
<b>Figura 1.3-</b> Esquema artístico de uma frente de choque na magnetosfera terrestre.....	20
<b>Figura 1.4-</b> Transformador da Hidroelétrica de Quebec no Canadá.....	20
<b>Figura 2.1-</b> Modelo da atmosfera solar com a distribuição de temperatura.....	24
<b>Figura 2.2-</b> Manchas solares vistas em H $\alpha$ .....	27
<b>Figura 2.3-</b> Exemplo de um grupo de manchas solares.....	27
<b>Figura 2.4-</b> Magnetograma da mancha solar complexa ( $\beta \gamma \delta$ ) 10486 observada no disco solar em 28 de outubro de 2003.....	28
<b>Figura 2.5-</b> a) Imagem em ultravioleta de uma proeminência no limbo solar; b) imagem em H $\alpha$ de filamentos próximo do centro do disco solar.....	30
<b>Figura 3.1-</b> Esquema artístico da emissão girossincrotrônica.....	38
<b>Figura 3.2-</b> Espectro dinâmico de um evento solar tipo I.....	42
<b>Figura 3.3-</b> Espectro dinâmico de um evento solar tipo II.....	43
<b>Figura 3.4-</b> Espectro dinâmico de um evento solar tipo III.....	44
<b>Figura 4.1-</b> Esquema ilustrativo dos modos de propagação.....	54

<b>Figura 7.1-</b> Rádio Polarímetro em 7 GHz.....	66
<b>Figura 7.2</b> Exemplo de calibração do sinal em 7GHz e normalização da amplitude do ruído.....	70
<b>Figura 8.1-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 06/10/03.....	74
<b>Figura 8.2-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita no dia 06/10/03.....	76
<b>Figura 8.2.1-</b> Ampliação do trecho das 10:00 UT às 15:00 UT da figura 8.2.....	78
<b>Figura 8.2.2-</b> Ampliação do trecho das 15:00 UT às 20:00 UT da figura 8.2.....	80
<b>Figura 8.3-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 22/10/03.....	83
<b>Figura 8.4-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita no dia 22/10/03.....	85
<b>Figura 8.4.1-</b> Ampliação do trecho das 11:00 UT às 15:30 UT da figura 8.4.....	88
<b>Figura 8.4.2-</b> Ampliação do trecho das 15:30 UT às 16:10 UT da figura 8.4.....	89
<b>Figura 8.4.3-</b> Ampliação do trecho das 16:10 UT às 20:00 UT da figura 8.4.....	91
<b>Figura 8.5a-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	92
<b>Figura 8.5b-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	93
<b>Figura 8.6-</b> Espectro dinâmico do Rádio Telescópio de Nançay na faixa de 20-70 MHz...97	

<b>Figura 8.7-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 23/10/03.....	98
<b>Figura 8.8-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita no dia 23/10/03.....	101
<b>Figura 8.8.1-</b> Ampliação do trecho das 10:00 UT às 11:30 UT da figura 8.8.....	103
<b>Figura 8.8.2-</b> Ampliação do trecho das 11:30 UT às 17:00 UT da figura 8.8.....	105
<b>Figura 8.8.3-</b> Ampliação do trecho das 17:00 UT às 20:00 UT da figura 8.8.....	107
<b>Figura 8.9-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	108
<b>Figura 8.10-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 24/10/03.....	112
<b>Figura 8.11-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita para o dia 24/10/03.....	114
<b>Figura 8.11.1-</b> Ampliação do trecho das 12:00 UT às 15:20 UT da figura 8.8.....	116
<b>Figura 12a.-</b> Imagem em ultravioleta do período das 16:00 UT às 16:50 UT obtidas com o satélite SOHO mostrando pontos de abrlhantamentos sobre a RA 10486.....	117
<b>Figura 8.13-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	118
<b>Figura 8.15-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 25/10/03.....	122
<b>Figura 8.16-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita do dia 25/10/03.....	123

<b>Figura 8.17-</b> Imagem do Sol em ultravioleta obtida com o satélite SOHO no dia 26/10/03.....	124
<b>Figura 8.18-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita do dia 26/10/03.....	126
<b>Figura 8.18.1-</b> Ampliação do trecho das 11:00 UT às 14:30 UT da figura 8.18.....	127
<b>Figura 8.18.2-</b> Ampliação do trecho das 14:30 UT às 17:30 UT da figura 8.18.....	129
<b>Figura 8.19-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	130
<b>Figura 8.20-</b> Imagem em ultravioleta do dia 27/10/03 obtida do satélite SOHO.....	134
<b>Figura 8.21-</b> Análise da componente <i>S</i> em 7 GHz feita para o dia 27/10/03.....	136
<b>Figura 8.21.1-</b> Ampliação do trecho das 11:00 UT às 14:30 UT da figura 8.21.....	138
<b>Figura 8.21.2-</b> Ampliação do trecho das 14:30 UT às 17:30 UT da figura 8.21.....	140
<b>Figura 8.22-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	142
<b>Figura 8.23-</b> Estimativa do início de uma EMC na atmosfera solar feito pelo NOAA.....	138
<b>Figura 9.1-</b> Evolução dos parâmetros de Stokes da componente <i>S</i> e do fluxo global em 3 GHz para o período de 22 a 27 de outubro 2003.....	145
<b>Figura 9.2-</b> Evolução do fluxo magnético (positivo e negativo) das RAs 10484 e 10486 no período de 22 a 27 de outubro de 2003.....	145
<b>Figura 9.3-</b> Evolução da potência das componentes de período do sinal em 7 associado ao aumento da atividade solar.....	149

## Tabelas

<b>Tabela 1-</b> Classificação magnética das manchas solares segundo o observatório de Monte Wilson.....	26
<b>Tabela 2-</b> Classificação dos eventos em raios X mole segundo o satélite Goes.....	32
<b>Tabela 3-</b> Características das explosões solares na faixa rádio.....	47
<b>Tabela 4-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 06/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	81
<b>Tabela 5-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 22/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	94
<b>Tabela 6-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 23/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	109
<b>Tabela 7-</b> Faixa dos eventos em ondas métricas que tiveram em contrapartida aumentos da amplitude do ruído em 7 GHz.....	111
<b>Tabela 8-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 24/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	119
<b>Tabela 9-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 26/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	131
<b>Tabela 10-</b> Potência ondeleta das componentes de período do sinal obtidas no dia 27/10/03, antes, durante e depois dos eventos solares.....	141
<b>Tabela 11-</b> Características da componente $S$ associadas a evolução da atividade solar.....	148

## SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	18
CAPÍTULO 2- O SOL.....	24
2.1- Atmosfera solar.....	24
2.1.1- Fotosfera.....	25
2.1.2- Cromosfera.....	30
2.1.3- Coroa.....	31
2.2- Atividade solar.....	31
2.2.1- Regiões ativas.....	31
2.2.2- As explosões solares.....	33
2.2.3- Ejeções de Massa Coronal.....	33
2.2.4- Vento solar.....	33
CAPÍTULO 3- RÁDIO EMISSÃO DO SOL.....	34
3.1- Mecanismos de emissão.....	34
3.1.1- Radiação de plasma.....	34

3.1.2- Bremsstrahlung.....	35
3.1.3- Emissão girossincrotronica ou magnetobremstrahlung.....	37
3.2- Emissão rádio do Sol.....	39
3.2.1- Emissão do Sol quieto.....	39
3.2.2- Emissão da componente S .....	40
3.2.3- Emissão das explosões solares.....	41
3.2.3.1- Eventos métricos.....	41
3.2.3.2- Eventos decimétricos.....	45
3.2.3.3- Eventos em microondas.....	46
CAPÍTULO 4- EFEITOS DE PROPAGAÇÃO.....	48
4.1- Propagação de ondas rádio na atmosfera solar.....	48
4.2- Ondas eletromagnéticas em um plasma homogêneo em equilíbrio.....	48
4.3- Modos ordinários e extraordinários de uma onda eletromagnética em um plasma magnetoativo.....	51
CAPÍTULO 5- ONDAS MAGNETOHIDRODINAMICAS.....	55
5.1- Ondas de Alfvén.....	55
5.2- Ondas Magnetoacusticas.....	56

5.3- Propagação perpendicular ao campo magnético.....	58
CAPÍTULO 6- PREVISÃO DE ATIVIDADE SOLAR.....	62
CAPÍTULO 7- DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE .....	65
7.1- Período de análise.....	66
7.2- Dados observacionais.....	66
7.3- Metodologia de análise dos dados.....	68
CAPÍTULO 8 – RESULTADOS OBSERVACIONAIS.....	75
8.1-Análise do dia 06 de outubro de 2003.....	75
8.1.1- Discussões.....	82
8.2- Análise do dia 22 de outubro de 2003.....	83
8.2.1- Discussões.....	95
8.3- Análise do dia 23 de outubro de 2003.....	98
8.3.1- Discussões.....	110
8.4- Análise do dia 24 de outubro de 2003.....	112
8.4.1- Discussões.....	120
8.5- Análise do dia 25 de outubro de 2003.....	121
8.6- Análise do dia 26 de outubro de 2003.....	124

8.6.1- Discussões.....	132
8.7- Análise do dia 27 de outubro de 2003.....	134
<b>CAPÍTULO 9 – DISCUSSÕES GERAIS.....</b>	<b>143</b>
9.1- Conclusões finais.....	151
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>153</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O estudo da atividade solar é necessário para melhor entender e caracterizar as relações solares-terrestres (Clima Espacial). Há mais de um século tem-se discutido os possíveis efeitos nas diferentes camadas da atmosfera terrestre.

Existe o consenso de que os sistemas climáticos complexos surgem e são governados não somente por características intrínsecas à troposfera, mas também por fatores naturais externos, que incluem principalmente vários eventos produzidos pela atividade solar (Harries, 1990). Smirnov & Kononovich (1993;1994 e 1995), entre outros, identificaram relações entre as mudanças cíclicas das correntes de ar na troposfera e a atividade solar. Além disso, vários estudos têm identificado correlação entre o ciclo solar de 11 anos, do número de manchas, e as flutuações na temperatura média da superfície e da atmosfera terrestre (North & Short 1983, Van Loon 1993).

Em escalas de tempo mais curtas, associadas aos transientes rápidos solares (minutos a horas), outros efeitos são produzidos na atmosfera terrestre principalmente pelas radiações na faixa do ultravioleta e raios-X (8 minutos depois), pelas partículas do vento solar e pelas ejeções de massa da coroa (EMCs- horas a dias depois) (fig 1.1). Por exemplo, as regiões troposféricas apresentam variações na pressão e na velocidade dos ventos associadas à intensidade das tempestades geomagnéticas (Smirnov 1974, 1984). É durante as tempestades geomagnéticas que geralmente ocorrem as belas auroras nas regiões polares (fig 1.2), mas durante as tempestade também são geradas correntes elétricas (fig 1.3) na atmosfera terrestre, que podem afetar os equipamentos elétricos e eletrônicos. Por

exemplo, durante a tempestade geomagnética de março de 1989, os monitoramentos feitos pela força aérea foram temporariamente interrompidos. Durante a mesma tempestade, correntes induzidas em um circuito da Hidroelétrica de Quebec no Canadá (fig 1.4) destruíram o transformador e causaram um colapso de mais de oito horas no sistema elétrico.

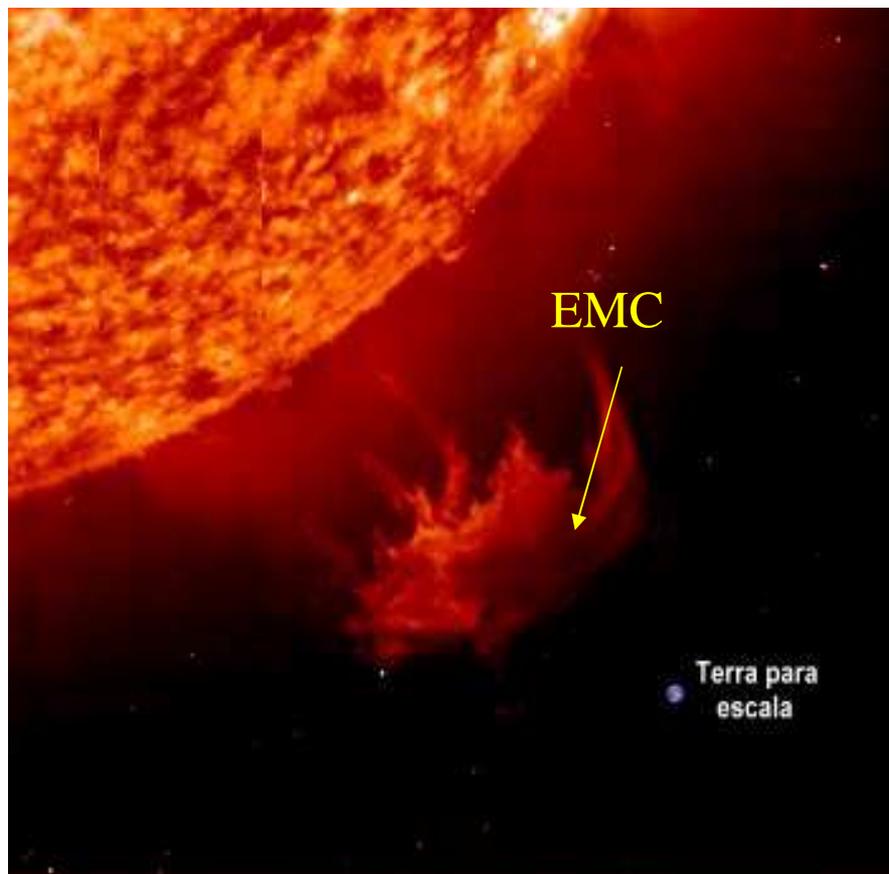


Figura 1.1- Imagem de uma EMC e a escala de tamanho da Terra



Figura 1.2- Exemplo de aurora

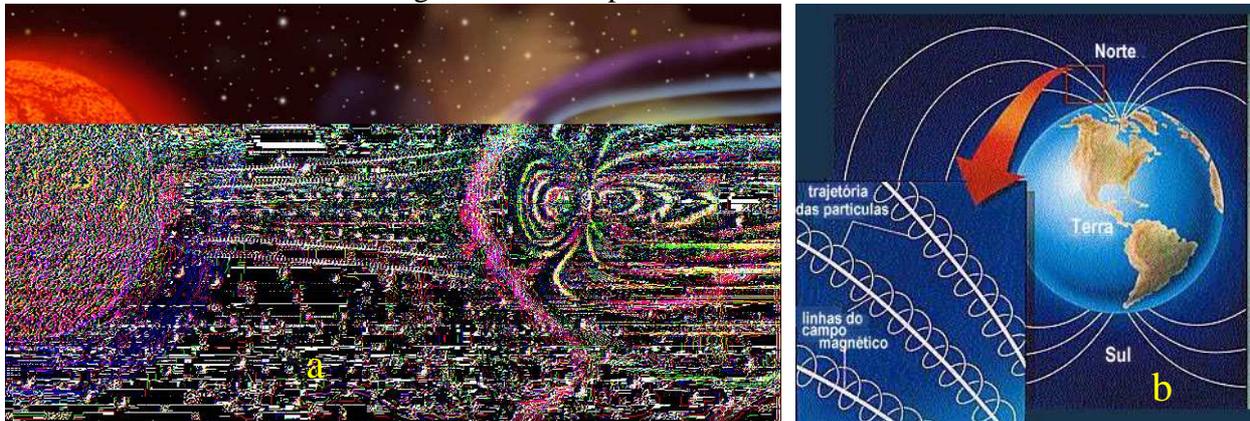


Figura 1.3- a) Esquema artístico mostrando o choque das partículas do Sol com a magnetosfera terrestre. b) esquema artístico mostrando a precipitação das partículas pelas linhas de campo da Terra gerando corrente elétrica.

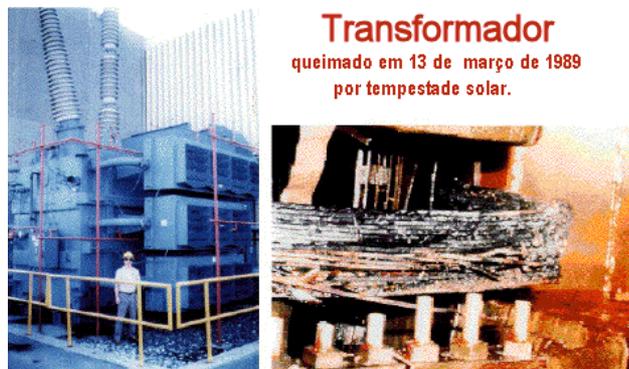


Figura 1.4- Transformador da hidroelétrica de Quebec no Canadá queimado na tempestade solar de março de 1989

As tempestades geomagnéticas intensas são produzidas frequentemente por fenômenos solares em associação a ocorrência de grandes explosões acompanhadas por EMCs. Portanto, a previsão de eventos solares de grande proporção, particularmente as explosões solares e os EMCs, é importante para estimar antecipadamente seus prováveis efeitos no meio interplanetário, na atmosfera terrestre e, se possível, minimizar seus impactos nos satélites artificiais.

As explosões solares (flares) e os EMCs são eventos altamente energéticos ( $\sim 10^{32}$  ergs), produzidos nas chamadas regiões ativas (RAs), atribuídas às reconexões e rupturas dos campos magnéticos. Os campos magnéticos solares, são gerados pelo dínamo, provavelmente próximo da zona de convexão, atravessam o plasma da fotosfera (vide cap.2) e emergem dentro da coroa solar. Sobre as regiões ativas o fluxo magnético emergente é comprimido e tensionado por um período de tempo, provocando reconexões magnéticas e então produzindo catastroficamente os eventos solares de grande proporção.

Precedendo as explosões solares, Schrijver (2007) observou que a tensão magnética sobre as RAs era maior do que a tensão acumulada durante um dia inteiro. Outros autores têm mostrado diferentes características magnéticas a nível fotosférico desde dias até minutos antes de eventos solares (por exemplo Wang, 1992; Kosovichev e Zharkova, 1999, Surdol e Harvey, 2005). Mandrini et al (2006) observaram mudanças na polaridade das manchas solares e o aparecimento de novos fluxos magnéticos  $\sim 3$  dias antes do evento em raios-X X17.2 de 28 de outubro de 2003. Sudol e Harvey (2004) estudaram as variações do campo magnético solar de 15 eventos solares intensos (de intensidade X segundo a classificação do Geostationary Operational Environmental Satellites - GOES), e observaram que as variações nos campos magnéticos persistiram por mais de duas horas depois dos

eventos e que a magnitude das mudanças não estava (aparentemente) correlacionada com a intensidade, duração, ou posição no disco solar. Na coroa solar, as informações do campo magnético sobre as regiões ativas são muito pobres, contudo, observações indiretas feitas por Zharkova et al (2006) mostraram variações no fluxo magnético associadas a diminuições na intensidade da emissão em  $H\alpha$ , que começaram de ~10 à ~20 minutos antes do início de 4 eventos solares classificados como M e X segundo GOES.

Neste trabalho analisamos as características da componente de variação lenta do Sol (componente *S*) detectada em 7 GHz durante os meses de outubro de 2003, quando atividade solar evoluiu de uma fase calma, quase quiescente, para uma altamente ativa. Neste período houve o registro de mais de 50 eventos intensos em raios X pelo satélite GOES, sendo que 11 alcançaram fluxo superior a  $10^{-04}$  W/m<sup>2</sup> e uma saturou os receptores do GOES. As EMCs associadas aos eventos solares mais intensos foram as responsáveis pelas maiores tempestades geomagnéticas que ocorreram no período. As tempestades geomagnéticas geraram vários problemas para os satélites (Advanced Composition Explorer (ACE), Aqua, Chandra, Chips, Cluster, GOES 9,10,11e 12, etc.) e para as estações espaciais (Mars Explorer Rover e Microwave Anisotropy Probe). Devido a previsão das grandes perturbações geomagnéticas, o satélite japonês (ADEOS 2) para monitoramento do clima terrestre foi desativado antes da chegada do violento choque interplanetário das partículas da super explosão de 28/10/03. Durante este período, os astronautas precisaram se esconder em locais especiais blindados contra a intensa radiação solar.

O objetivo deste estudo é tentar contribuir para o melhor entendimento e caracterização da atividade solar, para a criação de um método para previsões a curto e médio prazo (horas a dias) da ocorrência de explosões de grande porte e de EMCs.

## Capítulo 2

### O Sol

Aqui apresentamos uma breve descrição das camadas da atmosfera solar e algumas manifestações da atividade solar.

#### 2.1- Atmosfera solar

A figura 2.1 mostra um esboço da atmosfera solar com a variação da temperatura (linha contínua) e densidade (linha tracejada) em função da altura e como estão distribuídas as três camadas da atmosfera solar: fotosfera, cromosfera e coroa.

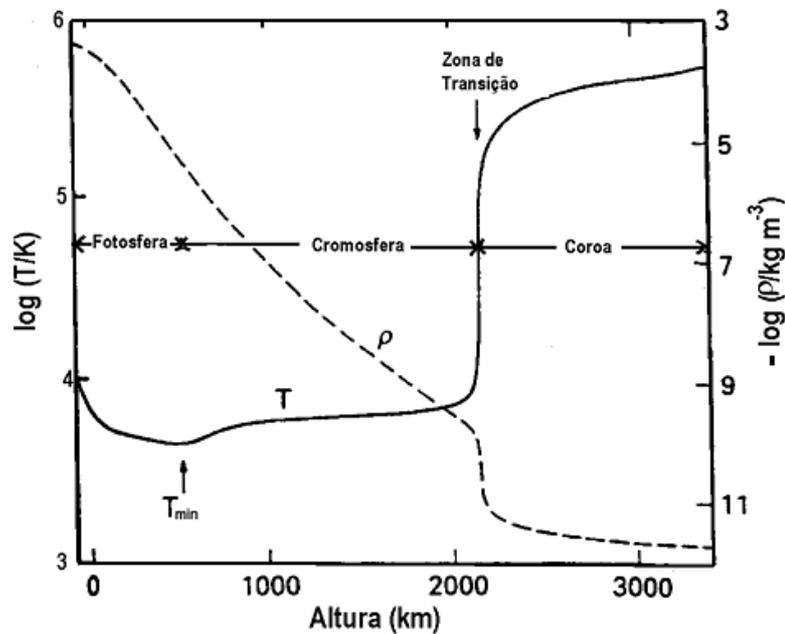


Figura 2.1- Distribuição de temperatura e densidade na atmosfera solar.

Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm> (09/04/08)

### 2.1.1- Fotosfera

A fotosfera, também conhecida como superfície solar, é a camada mais profunda da atmosfera. Esta camada tem ~600 km de espessura e temperatura média de ~5800 K.

Das estruturas que aparecem na atmosfera solar, algumas se destacam por sua relação com fenômenos importantes sob e sobre a atmosfera como os ventos e as explosões solares (itens 2.2.2 e 2.2.4). Por exemplo, as células convectivas são locais na fotosfera por onde é dissipada a energia produzida na região subfotosférica, chamada de zona convectiva. As células convectivas são compostas por grânulos brilhantes rodeados por regiões relativamente mais frias. Outras estruturas características da fotosfera são as manchas solares. As manchas solares são formadas pelo aprisionamento do plasma por estruturas magnéticas com campos intensos oriundos de camadas subfotosférica. Elas podem alcançar diâmetros de 50000 km (fig 2.2 e 2.3) e são escuras, pois são locais de alta concentração de campo magnético o que inibe o transporte de energia da região convectiva para a superfície solar e, portanto, são regiões mais frias do que as suas vizinhanças. As manchas solares tendem a formar grupos e podem ser de curto tempo de vida ou durar mais de uma rotação solar, ou seja, mais de um mês.

Os grupos de manchas solares são classificados, em função da sua complexidade magnética, conforme mostra a tabela 1 obtida do observatório de Monte Wilson. A figura 2.4 mostra um exemplo de manchas solares complexas.

Classificação Magnética	Características dos grupos
$\alpha$ (alfa)	Manchas com apenas uma polaridade magnética
$\beta$ (Beta)	Grupo de manchas que apresenta com uma divisão simples e distinta as polaridades magnéticas positiva e negativa (bipolar).
$\gamma$ (gama)	Uma região ativa complexa na qual as polaridades positivas e negativas são tão irregularmente distribuídas que não podem ser classificadas como um grupo bipolar.
$\beta\gamma$ (beta-gama)	Um grupo de manchas que é bipolar e apresenta alta complexidade magnética. Pode-se traçar curvas entre as polaridades opostas das manchas.
$\delta$ (delta)	Um qualificador da classificação magnética para indicar que a umbra (parte da mancha) se separou sem uma penumbra (parte da mancha) com polaridade oposta.
$\beta\delta$ (beta-delta)	Um grupo de manchas com classificação magnética $\beta$ , mas que contém uma ou mais manchas $\delta$ .
$\beta\gamma\delta$ (beta-gama-delta)	Um grupo de manchas com classificação magnética $\beta\delta$ , mas que contém uma ou mais manchas $\delta$ .
$\gamma\delta$ (gama-delta)	Um grupo de manchas com classificação magnética $\gamma$ , mas que contém uma ou mais manchas $\delta$ .

Tabela 1- Classificação magnética das manchas solares segundo o observatório de Monte Wilson

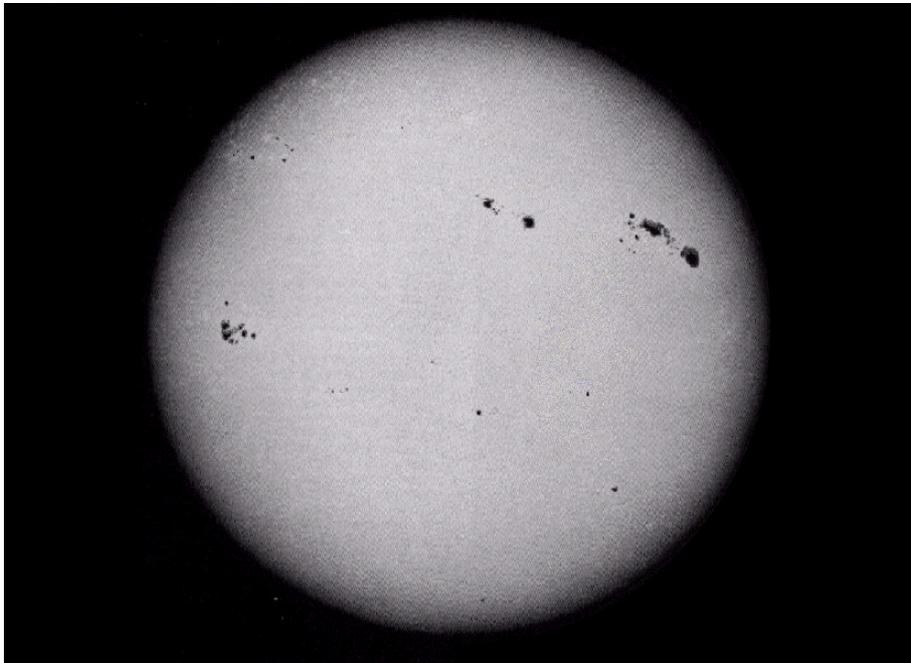


Figura 2.2- Manchas solares vistas o H $\alpha$

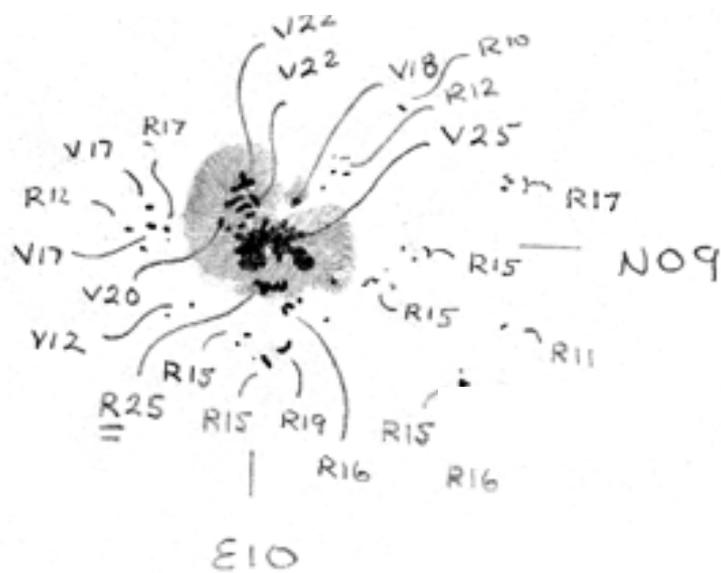


Figura 2.3- Exemplo de um grupo de manchas complexas com várias polaridades

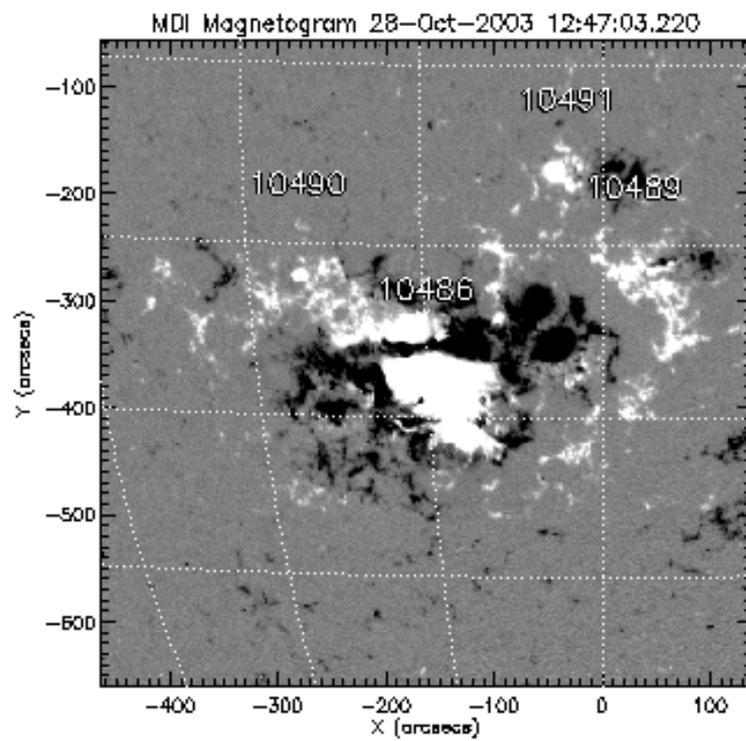
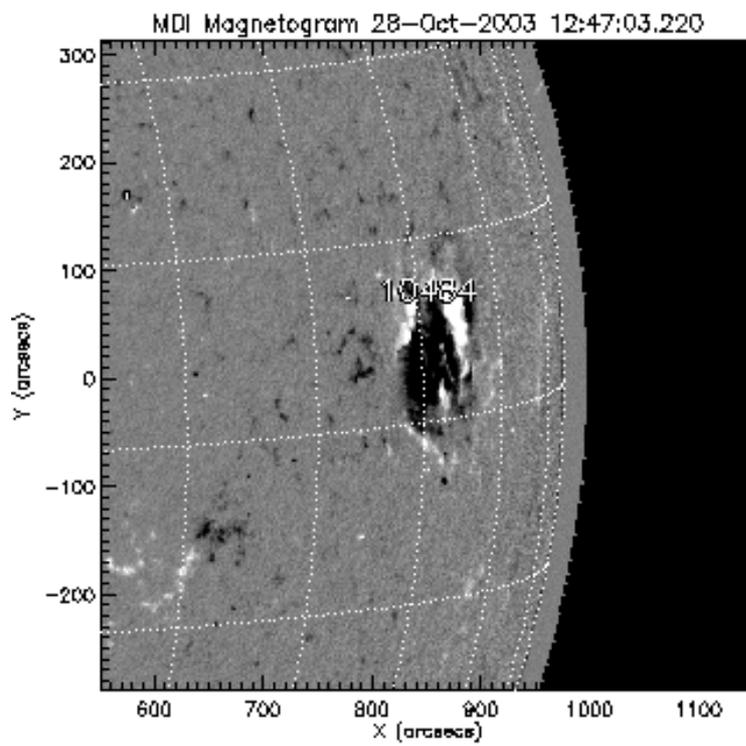


Figura 2.4- Magnetograma da mancha solar complexa 10486 com classificação magnética beta-gama-delta ( $\beta \gamma \delta$ )

### 2.1.2- Cromosfera

A cromosfera é a região localizada entre a fotosfera e a coroa solar, e tem este nome por causa de sua cor avermelhada, observada nas imagens feitas na linha 6563 Å do hidrogênio (série de Balmer -  $H\alpha$ ) e na linha 3934 Å do potássio (K). Sua espessura é de ~1500 km, e cerca de ~2100 km de altura encontra-se uma região de transição para a coroa, onde os gradientes de temperatura aumentam bruscamente e a densidade cai rapidamente.

Na cromosfera podem ser observados jatos tênues e brilhantes chamados de espículas, que são melhor observados durante os eclipses naturais, quando a Lua cobre completamente a fotosfera, ou durante eclipses artificiais provocados por objetos chamados coronógrafos.

### 2.1.3- A coroa

A coroa é a camada mais externa e extensa da atmosfera do Sol. Sua temperatura e densidade apresentam valores médios da ordem de  $\sim 10^6$  K e  $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , mas variam bastante em função do ciclo solar, bem como sua forma.

Na coroa solar são observadas as chamadas proeminências ou filamentos – que estruturas magnéticas preenchidas com plasma, que emergem do interior do Sol nas manchas solares. Proeminência é o nome dado às estruturas magnéticas quando são observadas no limbo solar. Nestes casos os arcos magnéticos aparecem brilhantes nas imagens porque a temperatura de brilho da matéria contida nos arcos magnéticos é maior do que a temperatura média do fundo (fig 2.6). Por outro lado, as mesmas estruturas magnéticas aparecem como filamentos escuros quando observadas sobre o disco solar porque, neste caso, o plasma contido nos arcos magnéticos é mais denso e mais frio, e inibe a radiação da fotosfera.

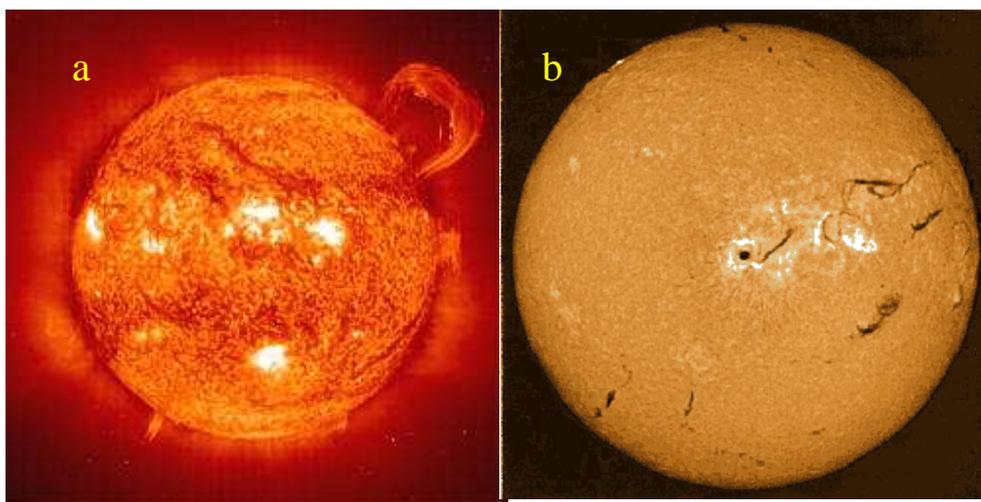


Figura 2.5- a) Imagem no ultravioleta de uma proeminência no limbo solar; b) imagem em  $H\alpha$  de filamentos próximo do centro do disco solar

## 2.2-Atividade solar

### 2.2.1- Regiões Ativas

As regiões da atmosfera solar compostas por estruturas magnéticas cujos pés estão nas manchas solares são chamadas de regiões ativas (RA). Estas regiões podem ocupar áreas extensas e, normalmente, estão associadas a intensos campos magnéticos bipolares, que são gerados por tubos de fluxos emergentes (Zwaan, 1987; Harvey e Zwaan, 1993; vanDriel-Gesztelyi, 2002 e suas referências). Durante seu tempo de vida as RAs podem produzir eventos solares, normalmente associados a mudanças ou reconexões na configuração magnética das regiões ativas (Priest, 1984; Priest e Forbes, 2000). Estas mudanças no campo magnético podem ocorrer em pequena ou grande escala associadas à escalas de fluxos emergentes, causando os eventos solares (Schmieder et al. 2002). Portanto, o entendimento da dinâmica das estruturas magnéticas das RAs nas diferentes camadas da atmosfera solar pode ser uma importante ferramenta para se fazer previsões seguras das principais manifestações da atividade solar tais como: as explosões solares, as EMCs, as erupções de filamentos etc.

### 2.2.2- As explosões solares

As explosões solares, também chamadas em alguns casos de “Flares”, são súbitas liberações de energia, que podem ser da ordem de  $10^{32}$  ergs e ocorrem nas regiões ativas. Durante a explosão, a energia armazenada nos campos magnéticos intensos é rapidamente transferida para as partículas do plasma, acelerando-os a altas velocidades, ou aquecendo o plasma local

Durante as explosões solares pode ocorrer aumento de emissão em toda a faixa do espectro eletromagnético. As explosões solares são normalmente classificadas segundo sua intensidade na faixa dos raios X moles detectada pelo satélite GOES (tabela 2)

Classe	Intensidade (Watts/ m <sup>2</sup> )	Classificação
B	$I < 10^{-06}$	Fracos
C	$10^{-05} < I < 10^{-06}$	Pequenos
M	$10^{-04} < I < 10^{-05}$	Médios
X	$I > 10^{-04}$	Grandes

Tabela 2- Classificação dos eventos solares segundo sua emissão na faixa dos raios X moles (GOES)

### 2.2.3 - Ejeções de Massa da Coroa

As EMCs são grandes bolhas de plasma observadas em luz branca por coronógrafos produzida devido ao espalhamento Thompson da radiação fotosférica pelo plasma ejetado da atmosfera solar para o meio interestelar.

Estes transientes apresentam, tipicamente, massas da ordem de  $10^{5-6}$  g e carregam altas energias mecânicas ( $\sim 10^{31-32}$  ergs). As EMCs saem da atmosfera solar com velocidades que vão de algumas dezenas a milhares de km/s e arrastam grandes estruturas magnéticas através do meio interestelar.

Desde sua descoberta por Tousey em 1973, milhares de observações tem sido feitas por instrumentos como Skylab (1974), Solwind spacecraft (1979-1985), Solar Maximum Mission (SSM, 1980, e 1984-1989), e Yohkoh, entre outros, e desde 1995 pelo Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO - instrumento abordo do satélite SOHO).

O estudo comparativo feito por St. Cyr et al (2000), com dados obtidos do LASCO, concluíram que as várias EMCs apresentavam basicamente, as mesmas características. Contudo, elas ocorrem aleatoriamente associadas ao vento solar, às explosões, ou isoladamente sobre as regiões ativas.

### 2.2.4.- Vento solar

O vento solar é constituído por um fluxo quase contínuo de milhões de toneladas de partículas carregadas com velocidades de  $\sim 300$  km/s quando se originam nas regiões ativas e  $\sim 800$  km/s quando se originam em regiões onde as linhas de campo magnético são abertas os chamados de buracos coronais.

## Capítulo 3

### Rádio Emissão do Sol

#### 3.1 Mecanismos de emissão

A rádio emissão do Sol pode ser classificada como incoerente e coerente. A radiação incoerente resulta de processos contínuos como, por exemplo no caso dos flares, a emissão livre-livre (bremsstrahlung) decorrente das colisões coulombianas das partículas térmicas do plasma ou da emissão giroressonante/girossincrônica decorrente do movimento rotatório dos elétrons, ligeiramente relativísticos, em torno das linhas de campo magnético. A emissão coerente ocorre durante processos de instabilidade cinética das partículas do plasma, principalmente associado às explosões solares. Entretanto, este tipo de emissão também pode acontecer durante alguns tipos de turbulências de Langmuir (vide 3.1.1), geralmente associadas a feixes de partículas (por exemplo, tipo III). As turbulências podem ser convertidas em ondas eletromagnéticas em frequências próximas da frequência de plasma e escapar da atmosfera solar.

##### 3.1.1- Radiação do plasma

O plasma solar é macroscopicamente neutro e os elétrons e os íons livres estão sempre em movimento. Um desequilíbrio eletrostático do plasma, produzido por um excesso de cargas positivas ou negativas, ou a presença de campos elétricos, gera oscilações longitudinais. Durante este processo, a energia das ondas longitudinais do plasma é convertida em ondas eletromagnéticas transversais, na frequência fundamental

$\nu_e$  do plasma local ou no seu harmônico  $2\nu_e$ . A equação 3.1 define a frequência do plasma local:

$$\nu_e \approx \left( \frac{N_e e^2}{m_e c} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 9 \times 10^{-3} \sqrt{N_e [cm^{-3}]} \quad \text{MHz} \quad (3.1)$$

onde  $N_e$  é a densidade eletrônica do plasma local,  $e$  é a carga do elétron,  $m$  é a sua massa e  $c$  a velocidade da luz.

As ondas geradas através deste processo são eletrostáticas e na teoria de ondas em um plasma frio são chamadas de ondas de Langmuir.

### 3.1.2. ‘Bremsstrahlung’

No plasma ocorrem ‘colisões’ entre íons e elétrons, que são individualmente defletidos por campos coulombianos. Neste processo é emitida a radiação chamada ‘free-free’ ou ‘Bremsstrahlung’, que pode, em função da energia da partícula, cobrir uma banda larga do espectro eletromagnético.

Quando a partícula emissora é parte de uma distribuição de partículas térmicas chamamos a emissão de bremsstrahlung térmico. Por outro lado, se as partículas tiverem altas energias e fizerem parte de uma distribuição não térmica a emissão será chamada bremsstrahlung não térmica. Em raios X, a emissão bremsstrahlung não térmica é explicada segundo dois modelos: alvo espesso e alvo fino. Os modelos bremsstrahlung de alvo espesso consideram que as partículas energéticas precipitam através das linhas de campo

magnético e são instantaneamente freadas ao baterem em regiões de altas densidades, que podem estar mais próximas dos pés dos campos magnéticos. Um processo semelhante aconteceria nos modelos bremsstrahlung de alvo fino, onde as partículas também precipitariam nas linhas de campo, mas começariam a emitir já próximo do topo dos campos magnéticos em regiões onde a densidade não seria suficientemente grande para freá-las instantaneamente.

O processo inverso, absorção ‘free-free’, também pode ocorrer quando os elétrons começam a oscilar em ressonância com o campo elétrico da onda eletromagnética, absorvendo a energia da onda, ganhando energia térmica e aquecendo o plasma. A equação 3.2 define de forma simplificada o coeficiente de absorção para elétrons térmicos,

$$\kappa_{\nu} \approx 9.78 \times 10^{-3} \frac{n_e}{\nu^2 T^{3/2}} \sum_i Z_i^2 n_i \times \left\{ \begin{array}{ll} 18.2 + \ln T^{3/2} - \ln \nu & (T < 2 \times 10^5 \text{ K}) \\ 24.5 + \ln T - \ln \nu & (T > 2 \times 10^5 \text{ K}) \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

onde  $\nu$  é a frequência da onda eletromagnética,  $n_i$  e  $n_e$  são a densidade de íons e elétrons, respectivamente,  $T$  a temperatura e  $Z_i$  é a carga do íon.

Outro parâmetro utilizado para o estudo fontes radiativas é a emissividade ( $\eta_{\nu}$ ), que, nos casos onde se tem emissão térmica, é a razão entre a emissão observada e um fator de normalização chamado emissão do corpo negro. Nos casos não térmicos, a normalização não é necessária. A emissividade está relacionada com o coeficiente de absorção ( $\kappa_{\nu}$ )

através da lei de Kirchoff que diz: - *em equilíbrio térmico a emissividade de um corpo ou superfície é igual a sua absorvância.*

$$\eta_\nu = \frac{\kappa_\nu k T \nu^2}{c^2} \quad \text{erg} \quad \text{cm}^{-3} \quad \text{s}^{-1} \quad \text{Hz}^{-1} \quad \text{sr}^{-1}. \quad (3.3)$$

### 3.1.3. Emissão girossincrônica ou ‘magnetobremsstrahlung’

Quando as partículas interagem com os campos magnéticos da atmosfera solar, a força de Lorentz acelera os elétrons e íons, que espiralam ao redor das linhas de campo emitindo radiação girossincrônica (fig. 3.1). A emissão é classificada em função da energia das partículas definida através do fator  $\gamma$  de Lorentz. A emissão produzida por elétrons menos energéticos ( $\gamma < 1$ ), é chamada ciclotrônica ou giroressonante, a produzida por elétrons levemente relativísticos ( $\gamma \sim 1$ ) é denominada de girossincrotrônica e a emissão produzida por elétrons relativísticos ( $\gamma \gg 1$ ) é chamada sincrotrônica.

No caso da emissão e absorção giroressonante de uma distribuição de elétrons térmicos, a energia média dos elétrons é baixa, o que propicia as colisões. Sua distribuição de energia se aproxima do modelo Maxwelliano. Na emissão sincrotrônica, a colisão entre as partículas é rara e o modelo que melhor representa esta distribuição é uma lei de potência. No caso intermediário, a radiação girossincrotrônica, os dois modelos de distribuição, Maxwelliana (térmica) e a lei de potência (não térmica), são importantes para representar a distribuição de energia dos elétrons.

A emissão ou absorção giroressonante de partículas térmicas está concentrada em locais onde a girofrequência no harmônico fundamental ( $\omega = \Omega_e$ ) ou em harmônicos  $s \leq 10$ . A radiação na frequência fundamental ( $s=1$ ) é dirigida principalmente na direção das

linhas de campos magnéticos, e nos baixos harmônicos ( $<5$ ), a radiação é dirigida principalmente em ângulos moderados com relação às linhas de campo magnético.

A emissão sincrotrônica, de partículas muito energéticas não térmicas, acontece em uma banda larga de frequências em altos harmônicos próximos de  $s \approx (\gamma \sin \theta)^3$  e próximos da frequência  $\omega \approx \Omega_e \gamma^2 \sin \theta$ . Nestes casos, a emissão é observada na direção instantânea do movimento dos elétrons, que se aproxima de uma distribuição isotrópica com um pico de radiação perpendicular ao campo magnético.

A emissão girossincrotrônica, das partículas com energia intermediárias, é mais pronunciada nos harmônicos de  $\sim 10 < s < 100$ , aproximadamente isotrópica e tem uma banda máxima quando a emissão acontece perpendicular às linhas de campo.

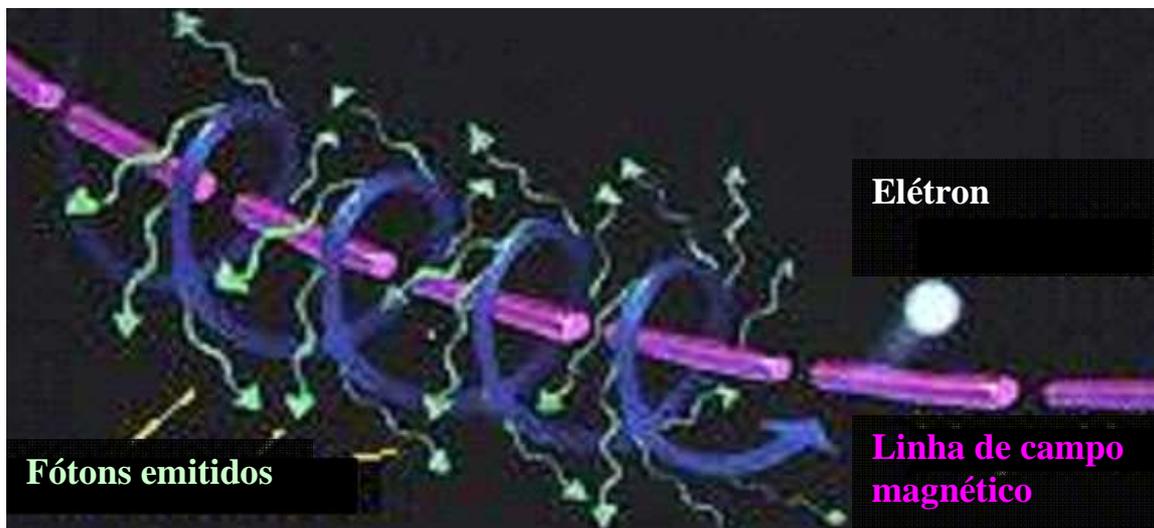


Figura 3.1- Esquema de emissão girossincrotrônica

## 3.2 Emissão rádio do Sol

A emissão rádio do Sol pode ser dividida em três componentes distintas, uma emitida pelo Sol quieto, outra de variações lentas, de horas a dias, produzida pelas regiões ativas (sol quiescente), e a terceira, de variações rápidas (poucos minutos a horas) associadas à ocorrência das explosões.

### 3.2.1. Emissão do Sol quieto

A componente de emissão quieta do Sol ocorre na ausência de fontes localizadas no disco solar (as manchas solares) e, quando observada na faixa rádio, sua origem é atribuída à emissão térmica do plasma (free-free bremsstrahlung).

Na faixa microondas, a emissão do Sol quieto tem origem na cromosfera e na coroa (Zirin, 1988). Em ondas métricas ( $f < 300$  MHz) a emissão tem origem apenas na alta coroa. Para as frequências mais altas, por exemplo 100 GHz, a emissão rádio se origina a partir da baixa cromosfera (Vernazza et al. 1981).

Associado às diferentes frequências, a emissão do Sol quieto apresenta diferentes temperaturas de brilho, que determinam a sua aparência e trazem informações sobre a física do aquecimento na cromosfera, região de transição e coroa. Em frequências  $\geq 10$  GHz, o Sol apresenta uma temperatura ( $T_b$ ) basicamente uniforme  $T_b \leq 1,5 \cdot 10^4$  K e as regiões ativas aparecem sobrepostas e mais brilhantes. Por outro lado, em frequências mais baixas o brilho do Sol aumenta lentamente, mas sobre as regiões ativas este aumento é muito mais rápido. Por exemplo, em  $f \sim 1$  GHz a temperatura média do disco é  $T_b \sim 5 \cdot 10^4$  K, e nas regiões ativas é  $T_b \sim 1-2 \cdot 10^6$  K. Na alta coroa onde as frequências observadas são ainda

menores ( $f < 100$  MHz) e as  $T_b \sim 1 \cdot 10^6$  K, a temperatura média do disco solar se torna apenas ligeiramente maior do que nas regiões ativas (Dulk, 1985). Contudo, observações recentes têm colocado em dúvida estas quantidades.

### 3.2.2. Emissão da componente *S*

A componente *S* (slowly varying component) é a componente de variação lenta da radiação solar associada à emissão das regiões ativas. Inicialmente, Zheleznyakov (1962), Kakinuma e Swarup (1962) sugeriram que a componente *S* seria produzida pela emissão térmica proveniente da absorção giroressonante. Esta hipótese foi sustentada por vários autores durante décadas (por exemplo: Zlotnik 1968a,b; Lantos 1968; Gelfreikh & Lubyshev 1979; Lee et al. 1995; Gopalswamy et al. 1996), mas algumas observações têm mostrado altas temperaturas de brilho ( $T_b \gg 10^6$  K) de fontes não associadas a grandes manchas solares ou ao aumento da emissão em raios X mole (Webb et al. 1983; Shibasaki et al. 1983), sugerindo então uma possível origem não térmica da emissão (Chiuderi Drago & Mellozzi, 1984; Akhmedov et al. 1986; Chiuderi Drago et al. 1987; Bogod et al. 1992; Sych et al. 1993).

### 3.2.3. Emissão das explosões solares

A terceira componente é proveniente das explosões solares, cuja emissão pode cobrir todo espectro eletromagnético.

#### 3.2.3.1- Eventos Métricos

Os eventos na faixa métrica ( $f < 300$  MHz) são produzidos na alta coroa solar e são caracterizados por grande complexidade. Nesta faixa, as explosões têm sido classificadas em vários tipos de acordo com suas características temporais e espectrais:

##### Tipo I

São eventos altamente polarizados (>90%), e com altíssimas temperaturas de brilho (>10<sup>10</sup> K). Associados às regiões ativas também são chamados de tempestades tipo I e podem durar de horas a dias ou até semanas (fig. 3.2). Estes eventos são compostos pela superposição de outros eventos, que ocorrem conjuntamente no mesmo intervalo. Isto torna as tempestades tipo I muito complexas. Os mecanismos de emissão dos eventos tipo I ainda não são bem conhecidos. Takakura (1963), entre outros, sugeriam que estes eventos seriam originados pela conversão das ondas de plasma, chamadas de ondas de Langmuir, em ondas eletromagnéticas em regiões de linhas de campo magnético estáticas e fechadas. Kattenberg et al (1980), Melrose (1980), entre outros, também têm apresentado modelos baseados na teoria das ondas de plasma. Sabe-se apenas que as elevadas temperaturas dos eventos não podem ser obtidas por mecanismos de emissão térmica (bremsstrahlung)(Dulk, 1985).

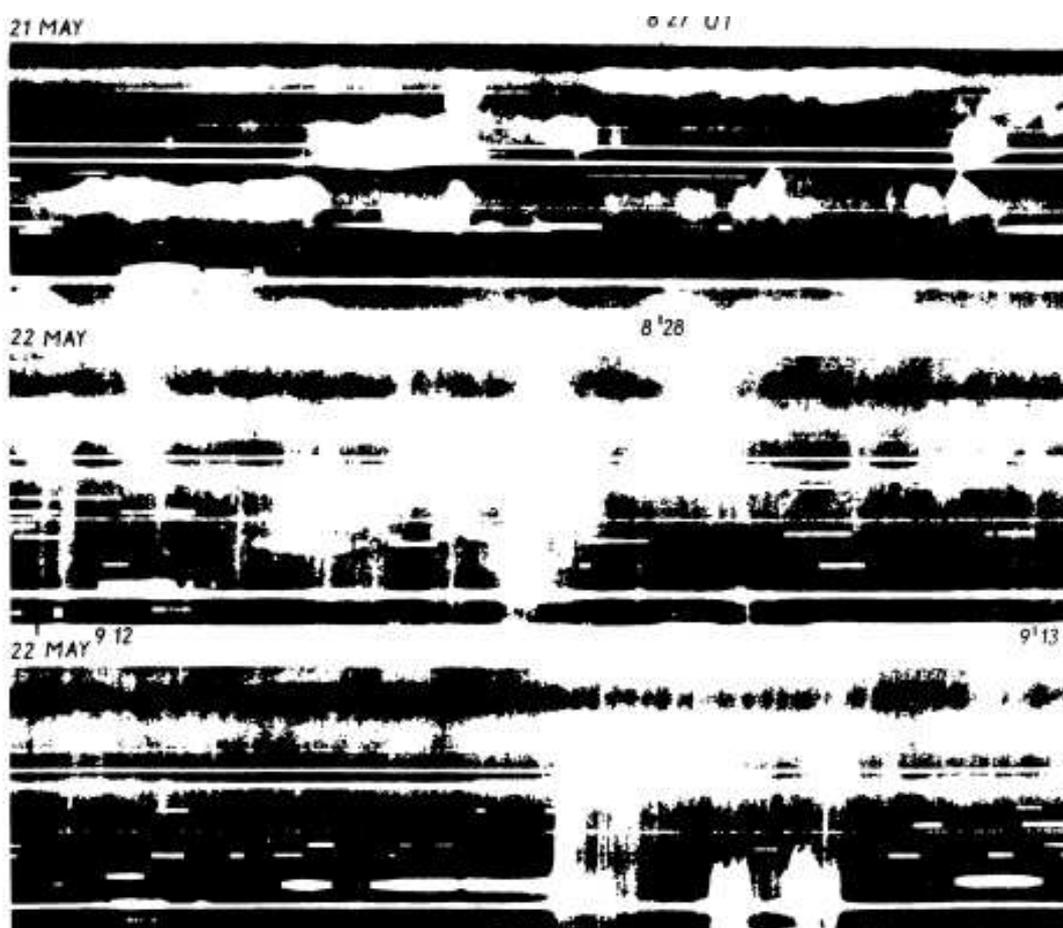


Figura 3.2 - Exemplo do evento tipo I na faixa de 100-300 MHz (Tlamicha et al, 1981)

## Tipo II

Estes eventos têm duração de alguns minutos e seu espectro dinâmico típico desloca-se na direção das frequências mais baixas. Estes eventos são produzidos por oscilações do plasma na alta coroa geradas pelo deslocamento ascendente de ondas de choque (MHD) do plasma cromosférico (Borugeret 1985, Melrose e Nelson 1985). A rádio emissão deste tipo de evento é gerada na frequência fundamental do plasma local e seus harmônicos (por exemplo Dulk, 1985).

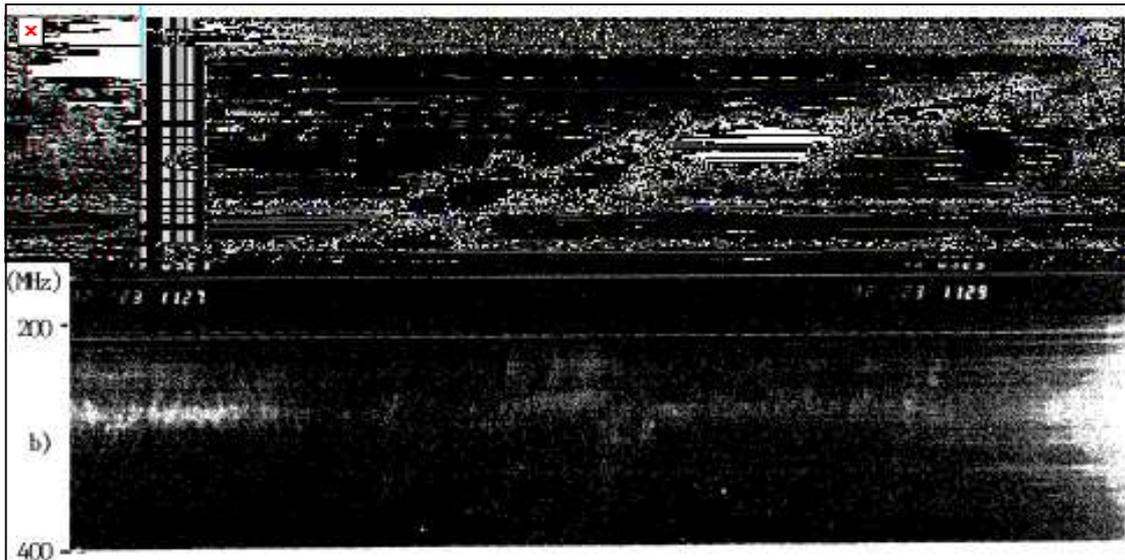


Figura 3.3- Exemplo do evento tipo II na faixa de 100-165 MHz e 200-400 MHz (Aurass et al 1994)

### Tipo III

Depois dos eventos tipo I, os eventos tipo III são os mais comuns no período de atividades solar. Eles ocorrem nas regiões ativas e nem sempre estão associados a flares ou subflares (~90% sem tipo III) ou aos eventos em raios-X (~70% sem tipo III). Os tipo III clássicos começam a ser observados em frequências acima de algumas centenas de MHz e se deslocam rapidamente para baixas frequências de ~30 KHz ou menos. Estes eventos são produzidos por feixes de elétrons relativísticos, que atravessam a atmosfera solar com velocidades de  $0,1c$  a  $0,5c$ , perturbam o plasma e produzem ondas de Langmuir. Parte das ondas de Langmuir é convertida em ondas eletromagnética na faixa rádio, e em alguns casos há emissão ciclotrônica (Zaitsev, 1974). Entretanto, não há precisão na determinação dos mecanismos de emissão dos eventos tipo III, e provavelmente tenham sido desenvolvidos mais teorias de plasma para o entendimento deste evento do que para qualquer outro problema em astrofísica (Goldman, 1983).

O tipo U é uma variação do tipo III, e é caracterizado por um deslocamento em frequência inverso ao deslocamento do tipo III, onde a emissão se desloca das frequências mais baixas para frequências mais altas dentro das estruturas magnéticas fechadas.

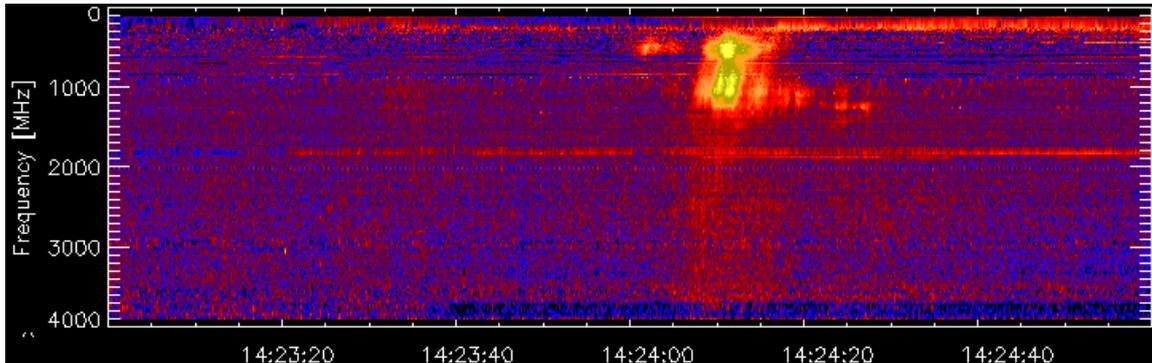


Figura 3.4- Exemplo do evento tipo III na faixa de 0-4000 MHz obtido do espectrógrafo Phenix III do rádio observatório de Zurich em 22/10/03

#### Tipo IV

Os eventos tipo IV compõem uma variedade de eventos caracterizados pela radiação de fontes estacionárias, não estacionárias e por tempestades contínuas (do tipo IV), que ocorrem associadas a intensas explosões.

A caracterização dos eventos tipo IV de fontes não estacionárias é muito difícil, pois requer mais do que um espectrógrafo, um interferômetro ou um radioheliógrafo. Além disto, eles são raros, apenas três dúzias deste tipo de evento foram observados pelo radioheliógrafo Culgoora durante um ciclo solar (Dulk, 1985). Stewart (1985) sugeriu que a emissão destes eventos seria proveniente da emissão de elétrons aprisionados em estruturas magnéticas através de mecanismos de plasma e radiação girosincrotrônica. A hipótese da emissão do plasma é sustentada pelas altas temperaturas de brilho observadas ( $T > 10^{10}$  K),

pela baixa polarização próxima das fontes emissoras e sua associação com altas densidade e volumes de matéria ejetada sem transientes coronais. A emissão girosincrotrônica é o mecanismo de emissão sugerido para este tipo de evento por causa dos altos graus de polarização circular observados antes do seu início (Dulk, 1985).

Os eventos tipo IV caracterizados pela emissão contínua de fontes estacionárias são mais frequentes (Robinson 1985), e sua radiação tem origem na alta coroa (Tabela 3.1). Em muitos casos este evento tipo IV começa em tempos e frequências muito próximas dos eventos tipo II ou na fase impulsiva da explosão. Eles provavelmente são produzidos pela emissão térmica de elétrons aprisionados em grandes estruturas magnéticas (Dulk, 1985).

As tempestades contínuas do tipo IV são eventos observados minutos depois (~10 min) das explosões médias e grandes (Kai et al. 1985). Eles começam em locais onde a frequência é ~300 MHz e se deslocam durante horas ou mais para locais de frequências mais baixas (~50 MHz). O que diferencia a tempestade contínua tipo IV dos eventos contínuos tipo IV é o seu alto grau de polarização circular (>50%). Sua duração pode se estender por até dias associando-se a tempestades de ruído do tipo I. Os mecanismos de emissão atribuídos a estes eventos são os mesmos mecanismos atribuídos aos eventos tipo I (tabela 3.1).

#### 3.2.3.2- Eventos Decimétricos

Os eventos decimétricos ocorrem na faixa de ~0,2 a ~3 GHz são produzidos na chamada região de transição. Em muitos casos, a origem dos eventos nesta faixa é um mistério. Aqui apresentamos um breve resumo das suas características e prováveis

mecanismos de emissão de eventos mais freqüentes (tipo III-like e tipo IV) nesta faixa do espectro rádio:

- os eventos Tipo III – like são gerados por feixes de elétrons relativísticos, que atravessam pequenas distâncias (comparadas com as distâncias percorridas pelos tipo III - métricos) em curto intervalo de tempo ( $\leq 0,3s$ ). Acredita-se que eles são gerados por mecanismos de plasma em pequenas estruturas magnéticas sobre as regiões ativas. Em detalhe, entretanto, os mecanismos de emissão dos eventos tipo III-like podem ser diferentes daqueles observados normalmente nos eventos tipo-III, e diferentes mecanismos de excitação podem estar envolvidos neste evento (Kundu, 1985).

Os eventos tipo IV decimétricos são caracterizados por uma emissão contínua, que cobre a faixa de  $\sim 0,2$  a 1 GHz. Aqui, diferente da faixa métrica, a emissão é irregular e o sentido da polarização observada é oposta ao observado na faixa milimétrica. Além disso, uma variedade de estruturas finas pode ser observada sobreposta ao espectro contínuo decimétrico (Slotje, 1981). A interpretação dos eventos decimétricos tipo IV contínuo é incerta. Provavelmente eles são uma forma de radiação térmica, com moderada polarização circular ( $\sim 50\%$ ).

### 3.2.3.3- Eventos em microondas

São observados em  $f > 3$  GHz ( $< 10$  cm), têm origem na baixa coroa em linhas de campos magnético fechadas nas regiões ativas e apresentam boa correlação com os eventos em raios-X duro. O mecanismo de emissão rádio predominante dos eventos nesta faixa é a girosincrotrônica de elétrons com energia de  $\sim 0,1$  a  $\sim 1$  MeV, espiralando em linhas de campos magnéticos de  $B \sim 100$  a  $\sim 500$  G. emitindo em harmônicos de  $\sim 10$  a  $\sim 50$  vezes a

girofrequência fundamental (Dulk 1985). Não é tão claro como se dá a distribuição de energia dos elétrons rápidos nestes eventos, o que se observa são aproximações do modelo de distribuição Maxwelliana ( $T \sim 10^8$  a  $10^9$  K), da lei de potência (índice espectral de 3 a 7), ou uma combinação de distribuições de energia em diferentes temperaturas (Dulk, 1985).

Tipo de Explosão	Duração	Banda de frequências	Mecanismos de emissão
I <i>Tempestade de ruído tipo I</i>	$\sim < 1s$ <i>de dias a semanas</i>	50-300 MHz/	Plasma
Tipo II	$\geq 10$ minutos	1-200 MHz	Plasma/ fundamental ou harmônico
Tipo III	Frações de segundo	1-200 MHz	Plasma/ fundamental ou harmônico
Tipo IV	de $\sim 30$ minutos a algumas horas	10-200 MHz	Girosincrotrônica e/ou Plasma
Explosões em microondas	poucos minutos	3-30 GHz	Girosincrotrônica
Submilimétrica	xxxx	100 GHz	????????
Explosões do tipo Spikes em microondas	$\sim 10$ ms (explosão) $\sim 10$ minutos (grupos)	$\sim 0.5-5$ GHz	Ciclotron e Maser

Tabela 3- Resumo de algumas características dos vários tipos de explosões (fonte: tabela 1 – Dulk, 1985, pág 204)

## Capítulo 4

### Efeitos de propagação

#### 4.1- Propagação de ondas rádio na atmosfera solar

Qualquer inferência sobre a natureza da emissão rádio do Sol requer um estudo dos efeitos de propagação da radiação associados às alterações dos índices de refração, que dependem da densidade do plasma e intensidade do campo magnético.

O campo elétrico das ondas eletromagnéticas pode fazer os elétrons e os íons do plasma realizarem oscilações forçadas na frequência denominada de plasma ( $\nu_p$ ) que, de acordo com a lei de Snell, podem atenuar, absorver ou alterar a direção de propagação das ondas eletromagnéticas (Kundu, 1965). Por conseqüência, para que uma onda eletromagnética se propague através do plasma é necessário que a frequência da onda ( $\nu$ ) seja maior do que a frequência do plasma ( $\nu_p$ ).

#### 4.2 Ondas eletromagnéticas em um plasma homogêneo em equilíbrio

Existem dois modos de propagação distintos em um plasma isotrópico: propagação transversal das ondas de Alfvén (veja seção 5.1), ondas eletromagnéticas, e a propagação longitudinal das ondas mecânicas ou de plasma. Os vetores **E** (campo elétrico) e **B** (campo magnético) das ondas eletromagnéticas são perpendiculares ao vetor de onda  $k$  e sua polarização pode ser arbitrária. A frequência ( $\nu$ ) e o vetor de onda  $k$  de uma onda eletromagnética ( $\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}-i\nu t)$ ), que apresenta variações no tempo ( $t$ ) e no espaço ( $\mathbf{r}$ ), são relacionados através da equação de dispersão (eq. 4.1),

$$(k^2 - \frac{v^2}{c^2} \epsilon_{\perp})^2 \epsilon_{\parallel} = 0$$

4.1

onde  $\epsilon_{\perp}$  e  $\epsilon_{\parallel}$  são permissividade dielétrica transversal e longitudinal, respectivamente, de um plasma isotrópico. A partir da equação 4.1 obtém-se a relação de dispersão mais geral de uma onda eletromagnética em um plasma isotrópico dada na equação 4.2.

$$v^2 = v_p^2 + k^2 c^2$$

4.2

As equações de dispersão consideradas neste capítulo relacionam valores complexos de uma frequência ( $v$ ) com vetores de onda  $k$ , que também podem ser complexos. Se  $k$  e  $v$  são reais o meio é chamado transparente para um certo modo de propagação em uma dada frequência. Se  $v$  é real e  $k$  é um complexo, na forma:  $k = k' + ik''$ , onde os vetores  $k'$  e  $k''$  são reais, uma onda  $\exp(ikr - i\omega t) = \exp(-k''r + ik'r - i\omega t)$  que tem  $k' \parallel k''$  é chamada homogênea e no caso contrário ( $k'$  não paralelo a  $k''$ ) é chamada heterogênea. O vetor  $k$  de uma onda homogênea pode ser escrito na forma  $k = ks$  é o versor de  $k$  e

$$k = k' + ik'' = \frac{v}{c}(n + i\eta)$$

4.3

onde  $k'$  e  $k''$  são vetores reais, que compõem um vetor complexo,  $n$  e  $\eta$  são os índices de refração e absorção, respectivamente. O valor de  $k$  obtido em uma direção  $s$

pode ser encontrado da direção de dispersão que pode ser tratada como uma função da frequência real  $\nu$ .

A partir das equações 4.2 e 4.3 define-se o índice de refração de uma onda eletromagnética:

$$n^2 = 1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2} = 1 - x$$

4.4

onde  $x$  é a razão entre os quadrados da frequência do plasma ( $\nu_p$ ) e da frequência da onda ( $\nu$ ).

No caso das ondas mecânicas, a equação de dispersão (4.2) se aproxima do modelo quase hidrodinâmico:

$$\nu^2 = \nu_p^2 + k^2 \nu_T^2$$

4.5

onde  $\nu_T^2 = \frac{k_b T}{m_e}$ ,  $m_e$  é a massa do elétron,  $k_b$  é a constante Boltzmann ( $\sim 1,4 \times 10^{-23}$  J/K)

A equação 4.5 falha nas regiões onde  $\nu \sim (2k\nu_T)^{0,5}$  e a velocidade de fase  $\nu_f = \frac{\nu}{k}$  torna-se comparável à velocidade térmica dos elétrons  $\nu_T$ . Ao mesmo tempo, um forte amortecimento, chamado amortecimento de Landau, ocorre nestas regiões. Isto produz a absorção de uma onda num intervalo de  $\sim \nu^{-1}$ ,  $\sim \nu_T^{-1}$ , que pode ser explicada pelas seguintes considerações: - Seja uma onda mecânica longitudinal com comprimento de

$1/k \sim v_T / v_L \sim v_T / v$  (com velocidade de fase  $v_f = v$ ) presente em um plasma num instante inicial, e o deslocamento dos elétrons térmicos a uma distância de  $\sim 1/k$  em um tempo de  $\sim 1/v$ . Por este movimento, a velocidade regular obtida através da ação do campo da onda de fase  $vt - kr$  é transferida para região onde a fase da onda é essencialmente diferente. Isto resulta em um forte amortecimento do campo  $E$  sobre um tempo  $t \sim 1/v$ .

#### 4.3- Modos ordinários e extraordinários de uma onda eletromagnética em um plasma magnetoativo.

Na presença de um campo magnético estático as propriedades eletromagnéticas de uma onda são radicalmente alteradas. O campo magnético torna o plasma magnetoativo, em outras palavras, torna o meio girotrópico ou anisotrópico. No plasma girotrópico a onda normal aparece com polarização elíptica, enquanto no meio anisotrópico os modos de propagação dependem da direção de propagação.

Num plasma magnetoativo “frio”, onde os efeitos de colisões entre as partículas são ignorados e a absorção do plasma é ausente, a equação do índice de refração  $n_j^2 (j=1,2)$ , que corresponde a um acoplamento dos chamados modos magnetoionico, é definida na equação de Appleton-Hartree (4.6).

$$n_j^2 = 1 - \frac{2x(1-x)^2}{2(1-x) - u \operatorname{sen} \alpha \mp \sqrt{u^2 \operatorname{sen}^4 \alpha + 4u(1-x)^2 \cos^2 \alpha}}$$

4.6

Onde  $u = \frac{v_B^2}{v^2}$  ( $v_B = 2.8B_0$  (gauss) é a girofrequência),  $\alpha$  é o ângulo formado pelo vetor  $k$  e o campo magnético  $B_0$ , assim  $\alpha = 0$  corresponde a propagação longitudinal e  $\alpha =$

$\pi/2$  à propagação transversal. O valor de  $\eta_j^2$  está associado a dois diferentes modos de propagação, que são definidos em função do sentido da polarização circular: para  $j=1$  ao modo de propagação é chamado extraordinário, e para  $j=2$  o modo de propagação é chamado ordinário. A equação 4.6 é reduzida para a equação 4.4, quando  $y = \frac{v_B}{v} \ll 1$  ( $v_B = 2.8B_0$ ) (Gauss MHz) é a girofrequência

A equação 4.6 mostra o índice de refração na forma complexa, que pode ser simplificada, sobre algumas condições, em dois casos limites chamados de propagação quase longitudinal e quase transversal. Nestes casos o índice de refração obtido é :

$$n_{1,2}^2 = 1 - \frac{x}{1 \mp \sqrt{y} \cos \alpha} ,$$

4.7

no caso quase longitudinal e

$$n_1^2 = 1 - \frac{x(1-x)}{1-x-y \sin^2 \alpha}, \quad n_2^2 = 1-x ,$$

4.8

no caso quase transversal.

Além disso, em regiões de baixas frequências onde  $x \cos^2 \alpha \gg y \cos^2 \alpha \gg 1$ ,

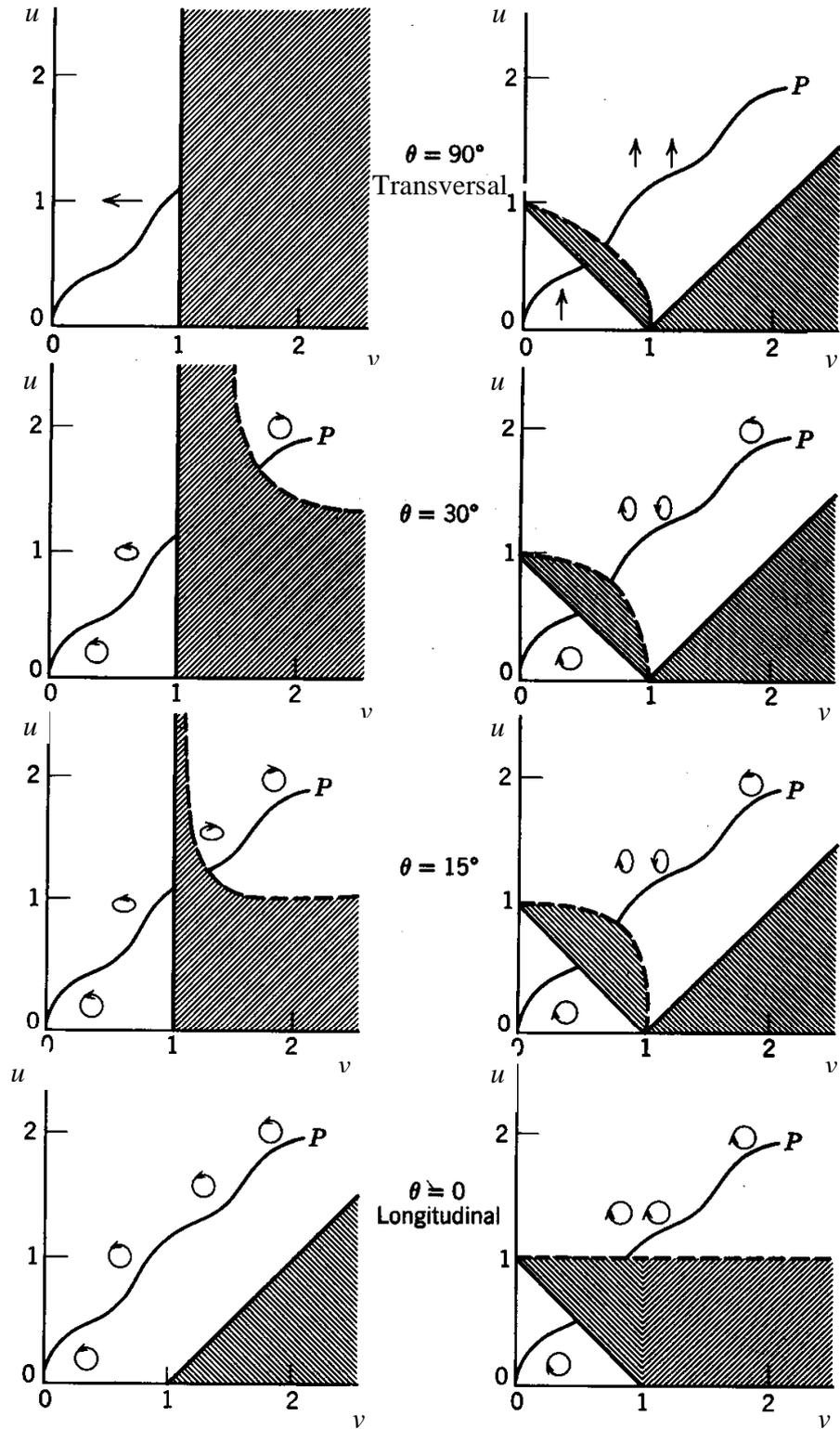
$$n_1^2 \approx - \frac{x}{\sqrt{y} \cos \alpha} , \quad n_2^2 \approx \frac{x}{\sqrt{y} \cos \alpha} .$$

4.9

Portanto, a onda extraordinária não se propaga em  $n_1^2 < 0$  e  $k = 0$ , enquanto a onda ordinária, ao contrário, se propaga pois  $n_1^2 > 0$ . Em outras palavras, o modo extraordinário da girofrequência é fortemente atenuado nas regiões em que a densidade de elétrons é relativamente pequena e, por outro lado, o modo ordinário não sofre absorções pronunciadas nestas mesmas regiões (vide figura 4.1).

Os modos de propagação ordinário e extraordinário são particularmente estudados por causa das importantes informações do plasma e dos campos magnéticos, que podem ser obtidas indiretamente através deles.

No caso da atividade solar, onde a polarização linear não é relativamente importante, para quantificar os modos de propagação ordinários e extraordinários são freqüentemente usados os parâmetros de Stokes I, que representa o total da radiação circularmente polarizada e o parâmetro V, que representa a diferença entre as intensidades das polarizações circularmente polarizada a esquerda (modo-X) ou a direita (modo-O).  
Pois,



Modo ordinário

Modo Extraordinário

Figura 4.1- Esquema para os modos de propagação na coroa solar. Fonte: Solar Radio Astronomy, Kundu 1965, pg 31.

## Capítulo 5

### Ondas Magnetohidrodinamicas

Os campos magnéticos presentes em toda atmosfera solar envolvem o plasma local e o tornam elástico e compressivo e nestas condições são produzidos vários tipos de ondas. Uma parte destas ondas, aquelas cujo comprimento de onda são grandes, comparados com o raio de Larmour ( $<1$  m para quase todas as combinações dos parâmetros físicos da coroa solar) e o giroperíodo ( $<10^{-4}$ s), respectivamente, podem ser descritas através da teoria das ondas magnetohidrodinamica (MHD). A aproximação MHD é um modelo simplificado, de um fenômeno muito mais complexo, e é obtida da simplificação das equações de Maxwell-Boltzmann para o estudo macroscópico de processos de frequências na faixa rádio.

As ondas de plasma geradas em meios onde é válida a teoria MHD podem se propagar longitudinalmente ou transversalmente ao campo magnético, e obedecem a equação da energia adiabática (sem troca de calor com o ambiente), comumente usada na termodinâmica clássica,  $p\rho_m^{-c} = C$ , onde  $p$  é a pressão  $\rho_m$  é a densidade e  $c$  denota a relação dos calores específicos considerando pressão e volume constantes.

#### 5.1 Ondas de Alfvén

Em um campo magnético de intensidade  $\vec{B}_0$  as pressões magnéticas são equivalentes à tensão  $\frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$  e à uma pressão hidrostática isotrópica  $\frac{B_0}{2\mu_0}$ . Isto sugere que as linhas de campo magnético se comportam como cordas sob uma tensão  $\frac{B_0^2}{\mu_0}$ . Além disso,

em um fluido perfeitamente condutor as partículas do plasma comportam-se como se estivessem amarradas às linhas de campo magnético, de tal forma que as linhas de força agem como se fossem cordas carregadas sob tensão. Assim, por analogia com a vibração de cordas transversais, se espera que sempre que um fluido condutor for ligeiramente perturbado, as linhas de campo magnético devem vibrar transversalmente, e a velocidade de propagação destas vibrações transversais poderia ser obtida da equação:

$$V_A = \sqrt{\frac{\textit{tens\~ao}}{\textit{densidade}}} = \sqrt{\frac{B_0^2}{\mu_0 \rho_m}},$$

5.1

onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left( \frac{N}{A^2} \right)$  é a permeabilidade magnética do espaço livre (v\u00e1cuo). Esta velocidade \u00e9 conhecida como velocidade de Alfv\u00e9n. Uma importante propriedade destas ondas transversais \u00e9 a aus\u00eancia de perturba\u00e7\u00f5es na densidade ( $\rho_m$ ) ou press\u00e3o do fluido (p).

## 5.2 Ondas magnetoacusticas

Oscila\u00e7\u00f5es longitudinais de ondas de plasma freq\u00fcentemente ocorrem em fluidos compressivos e condutores em campos magn\u00e9ticos. N\u00e3o h\u00e1 perturba\u00e7\u00f5es magn\u00e9ticas quando as part\u00edculas do plasma se propagam livremente na dire\u00e7\u00e3o das linhas de campo. Neste caso as oscila\u00e7\u00f5es s\u00e3o chamadas de ondas sonoras ordin\u00e1rias longitudinais e se propagam ao longo das linhas de campo com velocidade  $V_s$ . Por outro lado, quando o movimento das part\u00edculas \u00e9 perpendicular \u00e0 dire\u00e7\u00e3o do campo magn\u00e9tico, surge a possibilidade de outro tipo de onda. Neste caso, a press\u00e3o total \u00e9 a soma da press\u00e3o do

fluido ( $p$ ) com a pressão magnética  $\left( \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right)$ , e a velocidade ( $V_M$ ) de propagação desta

onda, chamada de magnetosônica ou magnetoacústicas, é definida como:

$$V_M^2 = \frac{d}{d\rho_M} \left( p + \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right)_{\rho_{M0}} = V_S^2 + \frac{d}{d\rho_M} \left( \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right)_{\rho_{M0}}$$

5.2

onde o índice zero, em  $\rho_M$ , se refere ao estado em que não há distúrbios magnéticos, e  $V_S$  é a velocidade do som, que no gás tem suas propriedades particulares e é chamada de velocidade adiabática (sem alteração térmica do sistema).

Considerando que as linhas de campo magnético são estáticas (congeladas), o fluxo magnético  $BdS$  através de um elemento de superfície  $d\vec{S}$  (cuja normal é orientada ao longo das linhas de campo magnético), e a massa  $\rho_M dS$  são conservadas durante as oscilações, temos que  $\frac{B}{\rho_M} = \frac{B_0}{\rho_{M0}}$ . Conseqüentemente, a equação 5.2 torna-se

$$V_M^2 = V_S^2 + \frac{d}{d\rho_M} \left( \frac{B_0^2 \rho_M^2}{2\mu_0 \rho_{M0}^2} \right)_{\rho_{M0}} = V_S^2 + V_A^2$$

6.4

onde  $V_A$  é a velocidade de Alfvén definida em 6.1.

### 5.3- Propagação Perpendicular ao Campo Magnético

Quando vetor  $\vec{k}$  da direção de propagação da onda MHD é perpendicular a indução magnética  $\vec{B}_0$  temos que  $\vec{k} \cdot \vec{V}_A = 0$  e a equação da velocidade média do fluido ( $\vec{u}_1$ ) pode ser escrita na forma simplificada

$$\vec{u}_1 = (V_s^2 + V_A^2) \left( \vec{k} \cdot \vec{u}_1 \right) \frac{\vec{k}}{\omega^2}$$

5.5

Portanto,  $\vec{u}_1$  é paralelo a  $\vec{k}$ , tal que  $\vec{k} \cdot \vec{u}_1 = k u_1$ , e a solução para  $\vec{u}_1$  é uma onda longitudinal com velocidade de fase

$$\frac{\omega}{k} = \sqrt{V_s^2 + V_A^2}$$

5.6

O campo magnético associado a esta onda longitudinal pode ser obtido através da composição das equações fundamentais MHD, começando da equação 5.7, que afirma que a colisão entre as partículas deve ser ignorada quando somada sobre todos os tipos de partículas do plasma por causa da conservação total da massa do sistema, e as equações de Maxwell 5.8 (toda variação do campo magnético gera um campo elétrico) e 5.9, sendo que a equação 5.9 é a lei de Ohm quando a densidade de corrente elétrica é nula.

Para se obter o campo magnético associado a esta onda longitudinal (equação 5.6) é necessário algumas considerações:

1- Considerando que a massa total do sistema se conserva, na soma total, pode-se desprezar a colisão entre as partículas (equação 5.7)

$$\frac{\partial \rho_M}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho_M \vec{u} \right) = 0$$

5.7

2- Toda variação do campo magnético gera um campo elétrico (equações 5.8 e 5.9)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

5.8

$$\vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B}$$

5.9,

sendo  $\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 + \vec{B}_1(\vec{r}, t)$ ,  $\rho_m(\vec{r}, t) = \rho_{m0} + \rho_{m1}(\vec{r}, t)$  e  $\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{u}_1(\vec{r}, t)$ ,

onde  $\vec{B}_0$  é a indução magnética uniforme e constante,  $\rho_{m0}$  é a densidade constante e  $\vec{B}_1$  é o campo magnético associado às ondas MHDs longitudinais.

$$\frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t} - \nabla \times \left( \vec{u}_1 \times \vec{B}_0 \right) = 0$$

5.10

Combinando as equações 5.7, 5.8 e 5.9 tem-se a equação 5.10, que associa o campo magnético a uma onda de plasma longitudinal.

Propondo a solução de 5.10 como:

$$\vec{B}_1(\vec{r}, t) = \vec{B}_1 \exp(i \vec{k} \cdot \vec{r} - i \omega t) \quad 5.11$$

se obtém

$$-\omega \vec{B}_1 - \vec{k} \times \left( \vec{u}_1 \times \vec{B}_0 \right) = 0 \quad 5.12$$

Usando o vetor identidade (eq 5.13), e notando que  $\vec{k} \cdot \vec{B}_0 = 0$ , nós encontramos:

$$\vec{A} \times \left( \vec{B} \times \vec{C} \right) = \left( \vec{A} \cdot \vec{C} \right) \vec{B} - \left( \vec{A} \cdot \vec{B} \right) \vec{C} \quad 5.13$$

e notando que

$$\vec{B}_1 = \frac{u_1}{\left( \frac{\omega}{k} \right)} \vec{B}_0 \quad 5.14$$

O campo elétrico associado a esta onda é dado por

$$\vec{E} = u_1 \times \vec{B}_0 \quad 5.15$$

Esta onda MHD (5.15) é similar a uma onda eletromagnética, desde que o campo magnético seja perpendicular à direção de propagação da onda, mas paralelo ao campo magnetostático, ela é uma onda longitudinal. Entretanto, a velocidade do fluxo de massa e a densidade de massa flutuante associadas são ambas na direção de propagação da onda. Por esta razão, esta onda é chamada de onda magnetosônica. A velocidade de fase desta onda é independente da frequência, e ela é, portanto, uma onda não dispersiva. A onda magnetosônica produz, por consequência, compressão e rarefação nas linhas de campo magnético sem mudar sua direção. Desde que o fluxo é perfeitamente condutor, as linhas de força e o fluxo se movem juntas.

## Capítulo 6

### Previsão de atividade solar

O objetivo principal deste estudo é caracterizar a atividade solar a partir do comportamento da emissão em 7 GHz e definir um método de previsão a curto e médio prazo de explosões solares e de EMCs.

Vários métodos classificados como teóricos, empíricos e estatísticos têm sido aplicados para a previsão dos eventos solares. Os modelos teóricos são geralmente baseados em bancos de dados reais ou em bancos de dados simulados devido à complexidade dos eventos. Os métodos empíricos como redes neurais, árvores de decisão, redes bayesianas, e modelos de Markov Hidden, podem prever o próximo valor de uma variável baseada em pequenos termos condicionais de várias variáveis, mas eles não podem prever o intervalo de tempo para o evento seguinte (Núñez et al 2005). Os métodos estatísticos (Boffeta, 1999; Wheatland 2001; Moon et al., 2001) são usados extensivamente para a previsão de explosões solares no dia seguinte. A probabilidade de ocorrência de uma explosão é baseada no número de eventos produzidos pelas regiões ativas classificadas de acordo com o esquema de classificação McIntosh (McIntosh 1990), que não leva em consideração variações de minutos ou horas nos campos magnéticos, e é a base do sistema de previsão de explosões da NASA Goddard Space Flight Center (<http://www.solarmonitor.org/forecast.php>).

Existe o consenso de que as reconexões magnéticas estão associadas ao aparecimento de fluxos magnéticos emergentes, que atravessam a atmosfera solar, interagem entre si e, em alguns casos, criam tensões ou estresses magnéticos, que podem acumular energia por um período de tempo e, então, relaxar catastróficamente produzindo as explosões solares e/ou as EMCs (Krall et al., 1982; Sakurai, 1987; Kalman, 1997).

As reconexões magnéticas também estão associadas a processos de cancelamento magnéticos na superfície solar (Zwaan, 1987 e Priest, 1987; Wang, 1992), que têm sido observados no período de acúmulo de energia, que precede os eventos solares. Martin, Livi, e Wang (1985) observaram 22 explosões no período de 2 a 8 de agosto de 1984 e concluíram que todos os eventos iniciaram em locais onde os campos fotosféricos se cancelaram (aqui cancelar se refere a aparente perda mútua de fluxos magnéticos em locais de polaridade oposta). Subramanian e Dere (2001) estudaram 32 EMCs e também encontraram cancelamento de fluxo magnético e fluxo emergente associados aos EMCs. Martin (1986) descreveu 2 observações em que ocorreram cancelamentos dos campos magnéticos fotosféricos horas antes da erupção de um filamento, mesmo sem a ocorrência de explosão. Entretanto, freqüentemente as EMCs e as explosões solares são observadas associadas a erupção de filamentos (Webb et al 1976). Mais recentemente, Muglach e Dere (2005) mostraram que 87% dos 32 eventos estudados, apresentaram pequenas escalas de mudanças, fluxo emergente ou desaparecimento de fluxo, antes dos eventos, mas em 13% dos casos eles não encontraram mudanças no fluxo fotosférico.

Tsuneta et al (1992a) e Tsuneta (1996) com base na análise de 21 explosões que ocorreram em 1992, sugeriram que as reconexões magnéticas responsáveis pelos eventos solares começariam na alta coroa.

Há décadas são somados esforços para caracterizar a emissão rádio associada a ocorrência dos eventos solares. Tanaka e Énomé (1975), por exemplo, observaram aumentos no fluxo microondas associado a mudanças no campo magnético em nível fotosférico, antes das explosões. No entanto, este resultado nem sempre é confirmado pelas observações. Existem observações de quedas (absorção) no fluxo rádio dezenas de minutos antes dos eventos (veja, por exemplo, Covington, 1969, em 2.8 GHz). Outras observações

feitas com alta resolução espacial em 17 GHz com o Rádio Heliógrafo de Nobeyama também mostraram diminuição e/ou aumentos da emissão rádio na pré fase da explosão (Fujiki e Nakajima, 2000). Bogod et al (1999a) observaram uma diminuição pronunciada no fluxo rádio antes de uma explosão fraca detectada pelo telescópio RATAN-600. Tokhchukova e Bodog (2002) começaram a observar quedas no fluxo rádio 4 dias antes de eventos em raios X mole que foi atribuída a uma absorção térmica do plasma, devido ao aparecimento de um filamento. Por outro lado, Webb (1980) observou aumento na temperatura de brilho ~30 minutos antes do início de uma explosão, enquanto Kahler (1979) havia identificado aumentos ~20 minutos antes do início de um evento. Este trabalho tem com objetivo estudar o comportamento da componente *S* observada em 7GHz e, se possível, estabelecer padrões que sirvam para prever a curto e médio prazo as explosões e/ou EMCs.

## Capítulo 7

### Dados e metodologia de análise dos dados

#### 7.1- Período de análise

Foi feito o estudo da emissão rádio do Sol em 7 GHz para o período de outubro de 2003, quando o Sol evoluiu de um estado quiescente para um muito ativo. Neste período, houve o registro de mais de 50 eventos intensos em raios X, sendo que 11 alcançaram fluxos superiores a  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>(classificados como X pelo Goes). Vários deles tiveram EMCs associadas e, particularmente, o evento gigante do dia 28/10/03 saturou os receptores do GOES e foi acompanhado por EMCs que resultaram em tempestades geomagnéticas violentas.

Analizamos primeiramente o dia 06/10/03 usado o como referência por apresentar a menor atividade deste período. Neste dia, o Sol apresentou manchas solares simples e produziu apenas alguns eventos fracos (<B6.0 segundo a classificação Goes) sem contrapartida significativa em rádio e sem EMCs associados. Depois, analisamos o período super ativo de 22 a 27 de outubro, quando ocorreram ~ 40 eventos com fluxo rádio entre ~30 ufs e ~6000 sfu, dos quais ~30 tiveram eventos em raio X classificados pelo Goes e cerca de 10 EMCs.

## 7.2- Dados Observacionais

Para este estudo foram utilizadas observações solares contínuas feitas em 7 GHz, no período das 10:00 às 20:00 UT, com alta sensibilidade (0,5 ufs) e resolução temporal (10 ms). A densidade do fluxo solar, observada pelo o Rádio Polarímetro Solar em operação no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI) (fig 7.1), foi obtida nos dois modos de polarização circular [à direita (R) e à esquerda (L)].

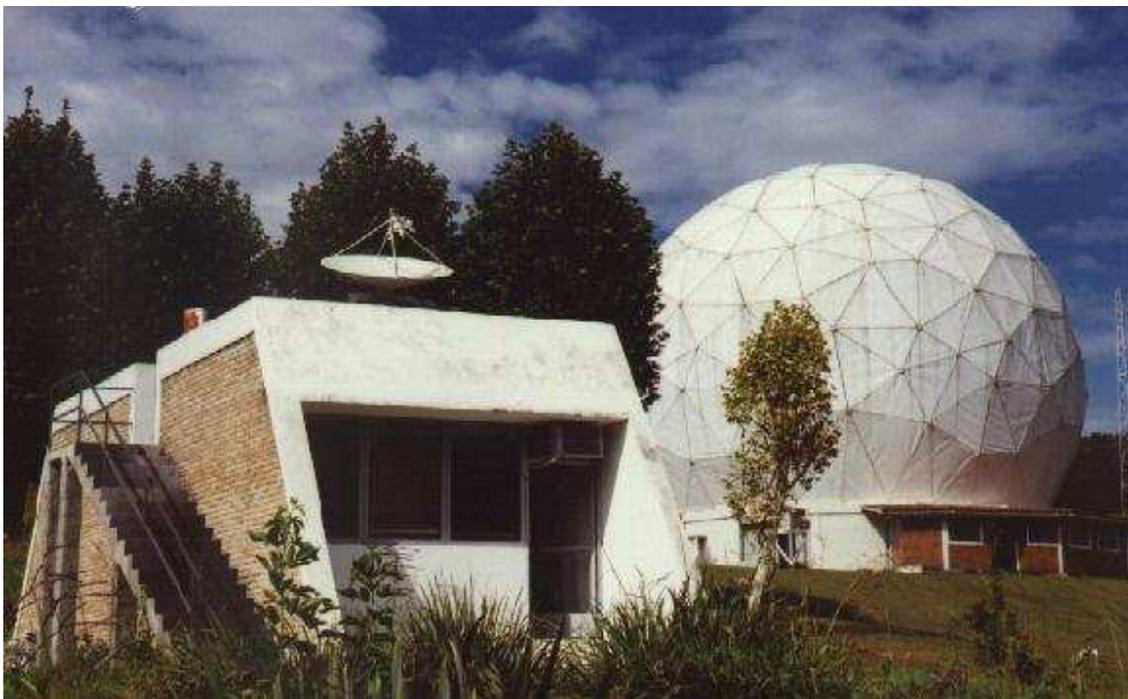


Figura 7.1- Rádio telescópio em 7GHz no Rádio Observatório do Itapetinga

A densidade de fluxo solar (eq.7.1) é função do brilho da fonte observada ( $B(\vartheta, \varphi)$ , em coordenadas esféricas), que por sua vez depende parametricamente da sua temperatura (eq 7.2, lei de Stefan-Boltzmann). Assim, o rádio telescópio pode ser entendido como um termômetro, capaz de medir temperaturas equivalentes (eq. 7.3) à de um corpo negro, que emitirá uma quantidade igual de energia, em uma banda passante,

através de um ângulo sólido cujo elemento é definido na equação 7.4 (para mais detalhes, veja Kaufmann, 1975).

$$S = \iint_{\Omega_{\text{fonte}}} B(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad \left(\frac{W}{m^2 Hz}\right) \quad 7.1$$

$$B_{\sigma} = \int_0^{\infty} B_f df = \sigma T^4 \quad 7.2$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan.

$$S = \frac{2k}{\lambda^2} \iint_{\Omega_{\text{fonte}}} T(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad \left(\frac{W}{m^2 Hz}\right) \quad 7.3$$

$$d\Omega = \frac{dA \cos\vartheta}{r^2} \quad (\text{strd}) \quad 7.4$$

onde  $dA$  é o elemento de área da superfície emissora. Estabelecendo-se uma reta  $r_1$  normal aos elementos de área das superfícies emissoras e receptoras,  $\vartheta$  é o ângulo formado entre  $r_1$  e um ponto da superfície emissora.

Uma unidade de fluxo solar (ufs) é  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ , mas na XV assembleia geral da IAU (união astronômica internacional) em 1973 foi criada a unidade Jansky  $Jy = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  (dados expressos em  $\text{strd}^{-1}$ ).

O fluxo solar também pode ser expresso em função da resposta ‘P’ da antena na direção  $(\vartheta, \varphi)$ . Sua resposta normalizada ( $0 \leq P_n \leq 1$ ) é dada na equação 7.5, o ângulo sólido total  $\Omega$ , função da resposta da antena, é dado na equação 7.6, e, por fim, a densidade de fluxo solar em função do brilho da fonte ( $B(\vartheta, \varphi)$ ) e da resposta da antena é apresentado na equação 7.7.

$$P_n(\vartheta, \varphi) = \frac{P(\vartheta, \varphi)}{P(\vartheta, \varphi)_{\max}}$$

7.5

$$\Omega = \iint_{4\pi} P_n(\vartheta, \varphi) d\Omega$$

7.6

Onde  $4\pi$  srtd é o ângulo sólido de uma esfera.

$$S = \iint_{\text{fonte}} B(\vartheta, \varphi) P_n(\vartheta, \varphi) d\Omega$$

7.7

Pode-se expressar a resposta da antena a partir do seu ganho ‘G’ nas diferentes direções  $(\vartheta, \varphi)$  (eq 7.8). Consideremos agora simplificada, a antena apenas como um dispositivo intermediário entre a potência  $W_{\text{entrada}}$  recebida da onda rádio incidente e a

potência  $W_{saída}$  real, que chega amplificada nos receptores. O ganho será definido de acordo com a teoria das antenas, bem explicada pelos pioneiros Kraus (1950) e Thoreul (1956).

$$G(\vartheta, \varphi) = \frac{W_{saída}}{W_{entrada(\vartheta, \varphi)}} = \frac{4\pi A_e(\vartheta, \varphi)}{\lambda^2}$$

7.8

Onde  $A_e(\vartheta, \varphi)$  a uma área efetiva do coletor da antena, sendo que a forma mais simples da função  $A_e(\vartheta, \varphi)$  é a lei de Lambert (eq 7.9), e que as antenas podem apresentar respostas mais complexas. A área efetiva será, portanto, relacionada com área física  $A_f$  da antena através da chamada eficiência de abertura da antena  $\eta_a$  (eq 7.10).

$$dW_e = I \cos\vartheta_e d\Omega_e dTA_e \quad \frac{W}{Hz}$$

7.9

Onde  $I$  é a intensidade específica ( $Wm^{-2} Hz^{-1} strd^{-1}$ ), que sofre uma dependência cossenoidal de Lambert ( $\cos\vartheta_e d\Omega_e$ ).

$$A_e \approx \eta_a A_f$$

7.10

Todos os parâmetros vistos dependem do comprimento de onda e da dimensão física das aberturas, medidas de acordo com os comprimentos. Assim, podemos considerar  $G(\vartheta, \varphi) \propto P(\vartheta, \varphi)$ , e a distribuição de brilho uniforme da equação 7.11.

$$S = B \iint_{4\pi} P_n(\vartheta, \varphi) d\Omega_A = B\Omega_A = \frac{B\lambda^2}{A_e} = \frac{2k_b T}{A_e}$$

7.11

A calibração dos sinais em 7 GHz, ou seja, a determinação da escala Kelvin/Volt (K/V), é obtida a partir da técnica LOAD-CÉU, que se baseia na diferença do sinal medido quando a antena está apontada para o céu e depois com o Load na frente da corneta. O load é um corpo a temperatura ambiente (~300 K, vide fig 7.2).

Com as calibrações foram obtidas as temperaturas do disco solar nos dois modos de polarização circular R e L. O dado calibrado foi transformado em unidades de fluxo solar (ufs), conforme mostram a equação 7.12. A componente  $S$  é definida pela diferença entre o fluxo obtido no nível do Sol e no nível do Céu (fig 7.2). Os parâmetros de Stokes da componente  $S$  utilizados neste trabalho são a intensidade  $I = R+L$  e o fluxo polarizado  $V = R-L$ .

$$L = \frac{l - C_l}{ld_l} \times 300 \times 0,38$$

$$R = \frac{r - C_r}{ld_r} \times 300 \times 0,38$$

7.12

onde 0,38 é o fator de conversão da temperatura para *ufs* para o sistema 7 GHz (eq 7.11),  $l$  é o nível do Sol,  $C_l$  é o nível do Céu e  $ld_l$  é o nível do load para os dados calibrados do canal L. E  $r$ ,  $C_r$  e  $ld_r$  são definidos analogamente para os dados calibrados do canal R.

### 7.3- Metodologia de análise dos dados

A primeira etapa da análise considera a inspeção dos fluxos em raios X e em 7 GHz para identificação dos eventos ocorridos em cada dia. São considerados os eventos em raios X identificados e classificados pelo Goes, mas também se levam em conta os eventos mais fracos em raios X, que não foram classificados.

A análise da emissão rádio em 7 GHz se baseia na variação da amplitude do ruído do sinal (*DQM* fig 7.2), que é o desvio quadrático médio calculado a cada trecho de 5 segundos e normalizado com relação a diferença entre o nível do Sol e do nível do Céu (fig 7.2). O sinal em 7 GHz é analisado através da técnica ‘ondeletas’ para identificar e caracterizar as diferentes componentes de período presentes na emissão rádio. A técnica se baseia no algoritmo desenvolvido por *Bendjoya et al.* (1993), que é uma implementação da análise de multi-resolução feita por Mallat (1989). Esta análise tem sido utilizada para caracterizar os mecanismos de liberação de energia durante os processos explosivos (Schwarz et al 1998, Achwanden et al 1998, Gimenez de Castro et al 2001, Makhmutov et al 2003, Kaufmann et al 2003, entre outros). Os vários autores basicamente utilizaram os escalogramas (representação período X tempo) obtidos da decomposição dos períodos das ondeletas e os espectros de potência, também chamados de escalegramas (potência X período), para identificar e caracterizar diferentes componentes de período do sinal durante as explosões. Neste trabalho nós utilizamos a rotina criada por Gimenez de Castro et al 2001 para identificar e estudar a dinâmica temporal da potência das componentes de período presentes no sinal em 7 GHz, na faixa entre 0,8s e 409s, antes das explosões solares, durante todo o período de observações em 7 GHz.

Na última etapa, comparamos as variações na amplitude do ruído e a evolução temporal da potência das componentes de períodos presentes no fluxo em 7 GHz, com as variações do fluxo em raios X mole, com os dados obtidos, em frequências rádio mais baixas, pelo telescópio de Nancay na faixa de 20-70 MHz e pelo rádio telescópio de Zurich na faixa de 112-3942 MHz. Os resultados também foram comparados com a evolução dos fluxos magnéticos das regiões obtidas de magnetogramas do experimento MDI a bordo do satélite SOHO onde ocorreram as grandes explosões. As informações dos fluxos magnéticos foram fornecidas pela Dra. Cristina Mandrini do Instituto de Astronomia e Física del Espacio, em Buenos Aires na Argentina, que os obteve a partir de uma análise detalhada das imagens do MDI.

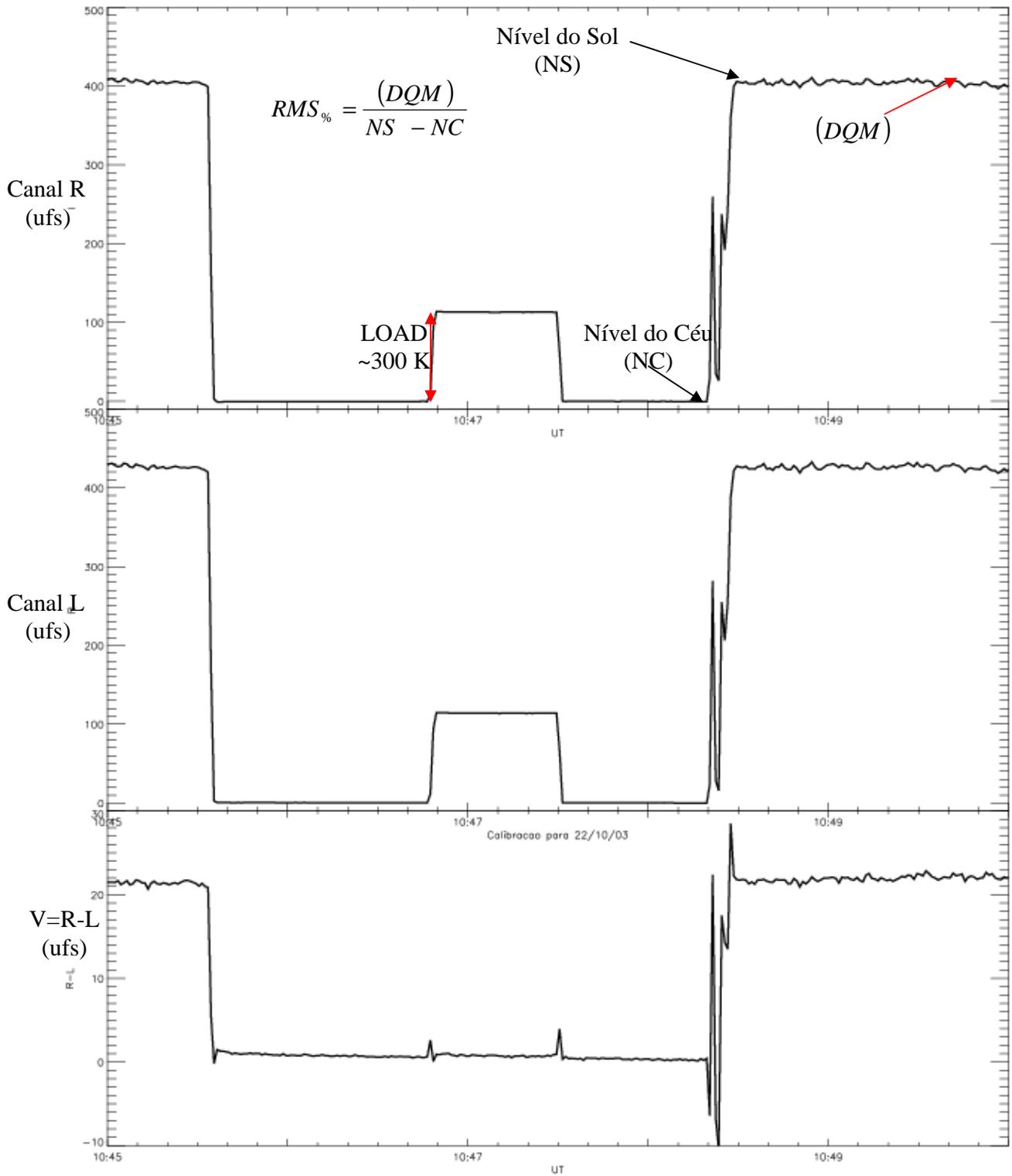


Figura 7.2- Exemplo de calibração do sinal em 7 GHz e normalização da amplitude do ruído.

## Capítulo 8

### Resultados Observacionais

Analizamos a componente S no mês de outubro de 2003 durante diferentes níveis de atividade solar, associados à evolução de regiões ativas complexas.

#### 8.1- Análise do dia 06 de Outubro de 2003

##### Aspectos gerais

O dia 06 de outubro de 2003 apresentou o menor nível de atividade solar do período de análise. O fluxo global do Sol observado em 3 GHz era ~112 ufs e a componente S em 7 GHz ficou em torno de ~210 ufs.

Durante as observações com o Rádio Polarímetro em 7 GHz (entre 10:00 UT e 20:00 UT), foram relatados dois eventos pequenos em raios X mole classificados pelo Goes como B5.8 com fluxo no pico de  $\sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$  (início às ~18:35 UT, pico às ~18:40 UT, e término às ~18:45 UT 6 ) e B4.6 com fluxo no pico de  $\sim 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$  (início às ~19:41 UT, pico às ~19:48 UT e término às ~19:55 UT). Ambos ocorreram próximos do centro do disco solar na RA NOAA 10471 (S07W01) cuja classificação magnética era  $\beta\gamma$ . A figura 8.1 mostra as regiões ativas presentes no disco solar neste dia.

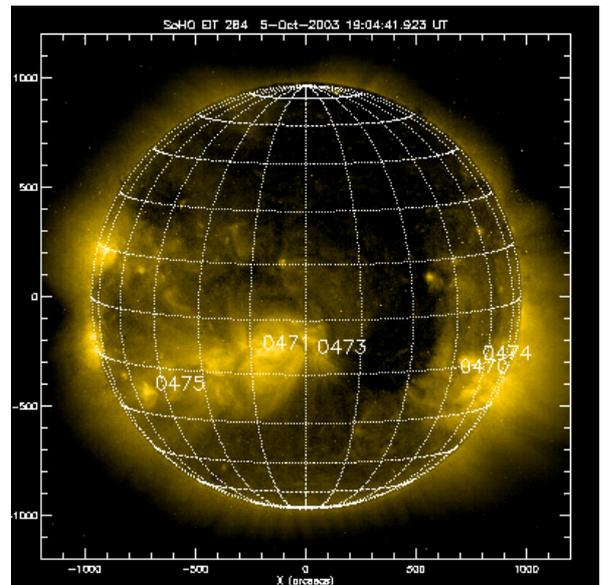


Figura 8.1 - Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 06/10/03

(fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031006\\_1004/index.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031006_1004/index.html))

Embora o satélite Goes tenha relatado apenas esses 2 eventos em raios X, a figura 8.2 mostra a ocorrência de vários eventos menores em raios X como por exemplo, o das ~14:10 UT com  $\sim 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ .

Durante todo este dia, não foram observados eventos em 7 GHz, mas associado à ocorrência de todos os eventos em raios X, o sinal apresentou aumentos na amplitude do ruído, que foram acompanhados por variações no fluxo polarizado, definido aqui como a diferença no fluxo entre os canais R e L (parâmetro Stokes  $V = R - L$ ). A figura 8.2 mostra que os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram maiores nos trechos em que o fluxo polarizado em 7GHz apresentou variações mais pronunciadas. Através da técnica de ondeletas foi possível identificar o aparecimento de componentes de períodos no sinal em 7 GHz nos trechos em que ocorreram os aumentos na sua amplitude do ruído, sendo que a banda das componentes de período (bcp) foi maior em quase todos trechos em que o fluxo polarizado apresentou as variações mais pronunciadas (vide por exemplo, as regiões destacadas em azul na figura 8.2).

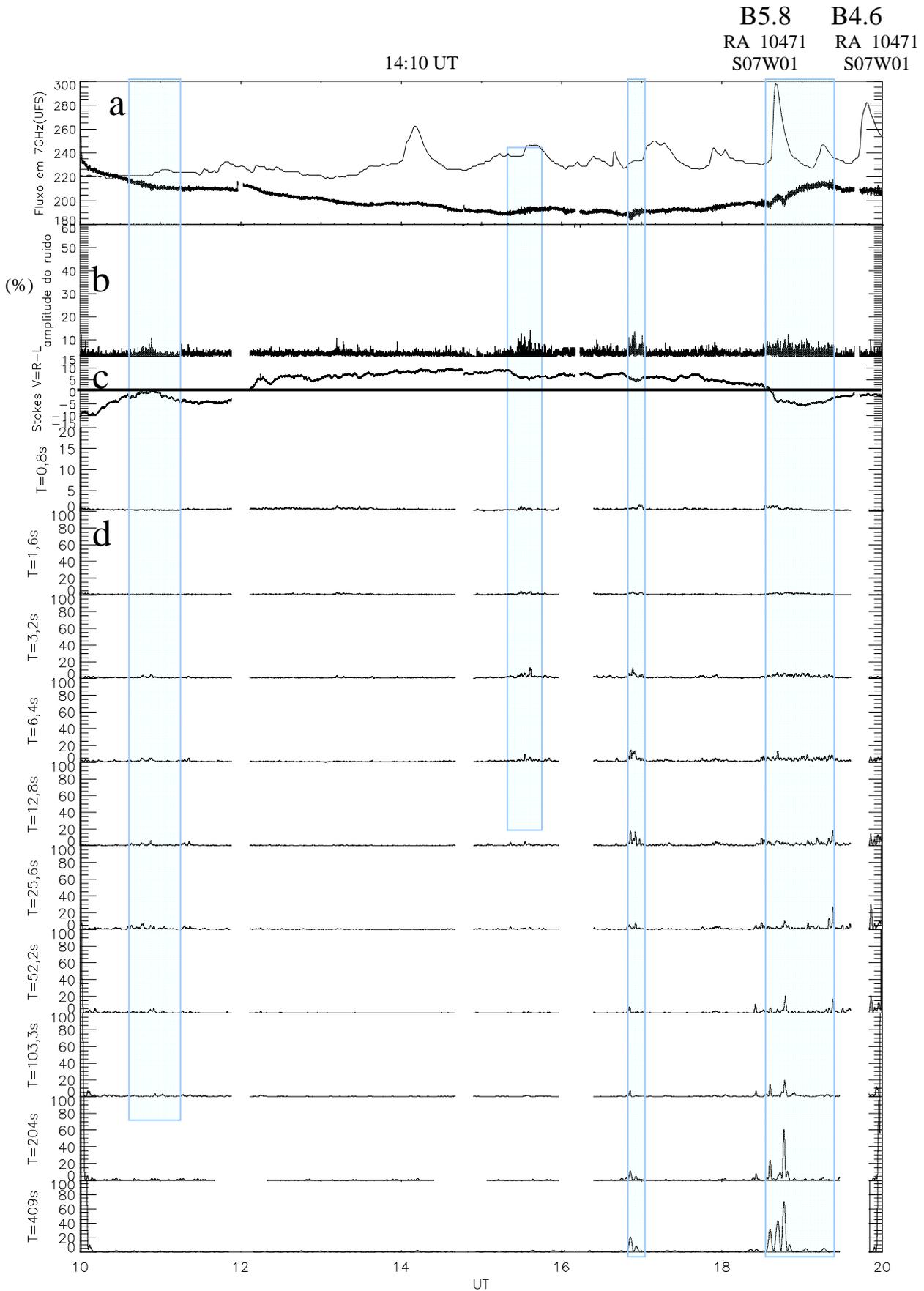


Figura 8.2- a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em raios X moles do GOES (traço fino), b )- amplitude percentual média do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação ao nível do Sol, c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L), d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s). Os quadriláteros azuis destacam os intervalos mais importantes da análise deste dia.

## Características do sinal associadas aos eventos mais fracos do dia

(trecho das 10:00 UT às 15:00 UT)

No trecho das 10:00 UT às ~15:00 UT (fig 8.2.1), o fluxo em 7 GHz apresentou componentes de períodos com potências significativas na faixa de 3,2 a 103 segundos associado à ocorrência dos eventos em raios-X mais fracos do dia (fluxo  $\leq 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ ). Neste trabalho, consideramos como potências significativas aquelas que excederam  $p \sim 3 \sigma_{pp}$ , onde  $\sigma_{pp}$  é o desvio padrão calculado pico a pico, fora dos trechos em que foram observadas as perturbações (eventos solares). Neste dia, tem-se que  $p > 2 \text{ ufs}^2$ . Associado ao início de uma série de eventos fracos em raios X às ~10:52 UT, tem-se que a amplitude do ruído em 7 GHz cresceu de ~5% para ~10% acompanhada por um aumento significativo na potência das componentes de período ( $p > 2 \text{ ufs}^2$ ) do fluxo em 7 GHz na faixa de ~3,2 e ~25,6 s às ~10:48 UT, e ampliou para faixa de ~3,2 a ~103 s às ~10:52 UT. No mesmo trecho, o fluxo polarizado (R-L) em 7 GHz diminuiu gradualmente se despolarizando às ~10:52 UT, quando a amplitude do ruído foi máxima.

Durante os eventos fracos das ~10:52 UT às ~13:00 UT tem-se que o fluxo polarizado em 7 GHz foi predominantemente circular à esquerda (L) até às ~12:05 UT e depois ficou polarizado a direita até o final deste trecho de análise, quando começaram os eventos em raios X relativamente mais fortes.

A componente *S* em 7 GHz apresentou outro aumento na amplitude do ruído às ~13:10 UT, que foi acompanhado pelo aparecimento de componentes de período com potências significativas apenas na faixa de ~1,6s e ~3,2s, coincidindo com o início de um evento fraco em raios X, que teve pico por volta de 14:10 UT.

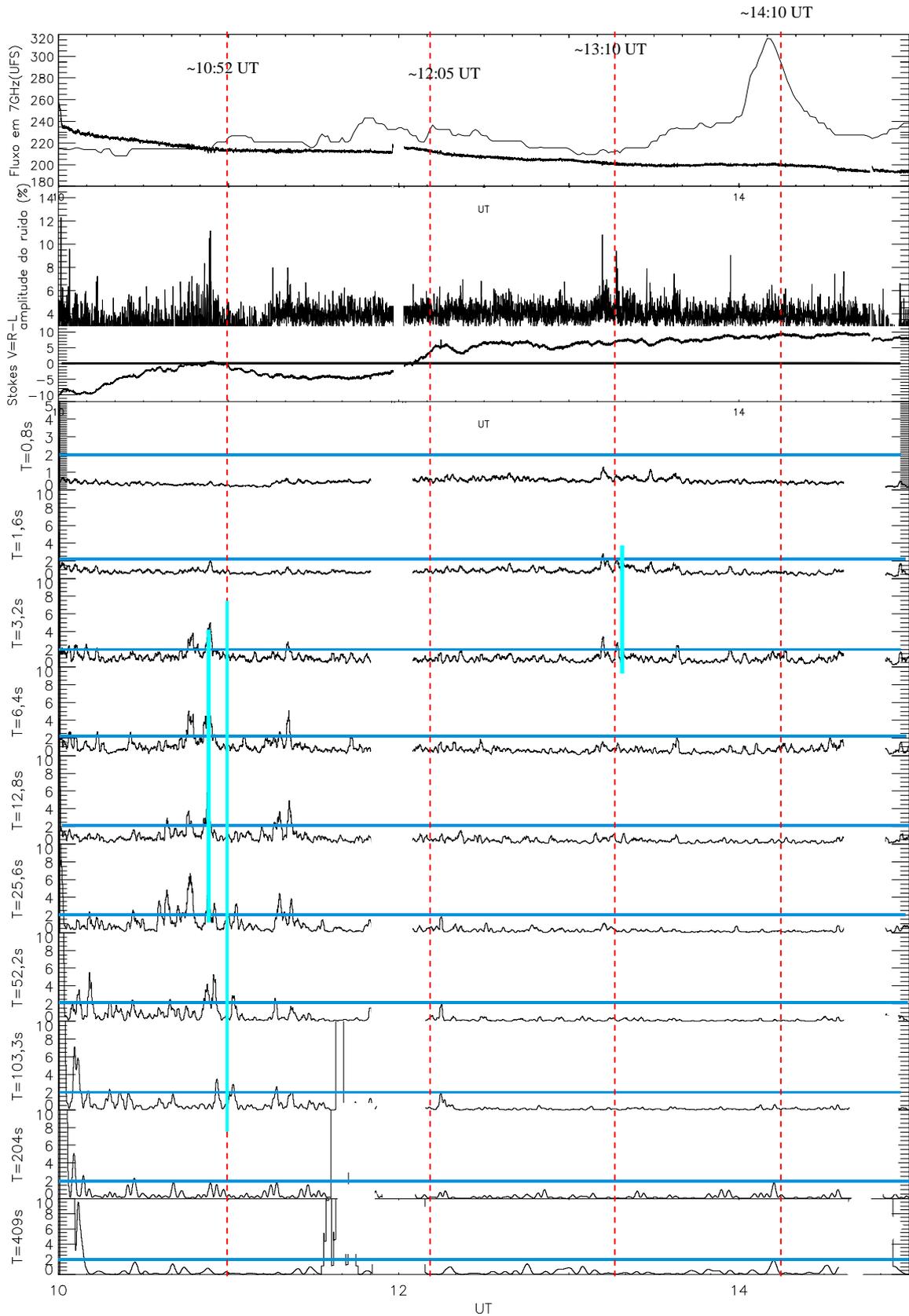


Figura 8.2.1- Ampliação da figura 8.2. As barras verticais pontilhadas destacam os instantes de interesse. Enquanto as barras verticais azuis mostram exemplos de faixas onde a potência das componentes de período foi considerada significativa. Os traços horizontais definem em ‘c’ o nível zero do fluxo polarizado e em ‘d’ o limite de significância.

## **Características do sinal associadas aos eventos relativamente mais fortes do dia**

**(trecho das 15:00 UT às 20:00 UT)**

No trecho das 15:00 UT às 20:00 UT (fig. 8.2.2) ocorreram os eventos em raios X relativamente mais fortes do dia acompanhados pelos os aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído do sinal em 7 GHz e na potência das componentes de período. Apesar de não se ter eventos em 7 GHz, o fluxo polarizado também apresentou variações mais pronunciadas durante os eventos em raios X .

A figura 8.2.2. mostra que, durante os eventos em raios X, os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram acompanhados pelo aparecimento das componentes de período especialmente na faixa entre 0,8s e 6,4s, mas a análise das ondeletas mostra que as componentes de período do sinal aparecem em praticamente toda a faixa de períodos analisada (1,6 a 409s) durante os eventos que tiveram variações mais pronunciadas do fluxo polarizado em 7 GHz, sendo a maior durante o evento em raios X B5.8. A evolução temporal do aparecimento das componentes de período do sinal mostra que estas aparecem primeiro na faixa entre 1,6 e 6,4 segundos e em seguida se expande chegando até os períodos de 409 segundos durante os eventos maiores em raios X (vide tabela 4). O fluxo polarizado em 7 GHz apresentou pequenas variações associadas aos maiores aumentos na amplitude do ruído durante os vários eventos em raios X, apresentou uma queda gradual a partir das ~17:30 UT, as permaneceu polarizado a direita (R) até as ~18:30 UT. Apenas próximo do pico do evento em raios X B5.8 às ~18:30 UT, o fluxo polarizado chegou a zero e se tornou polarizado a esquerda.

Neste dia não foram relatados eventos em ondas métricas nem EMCs.

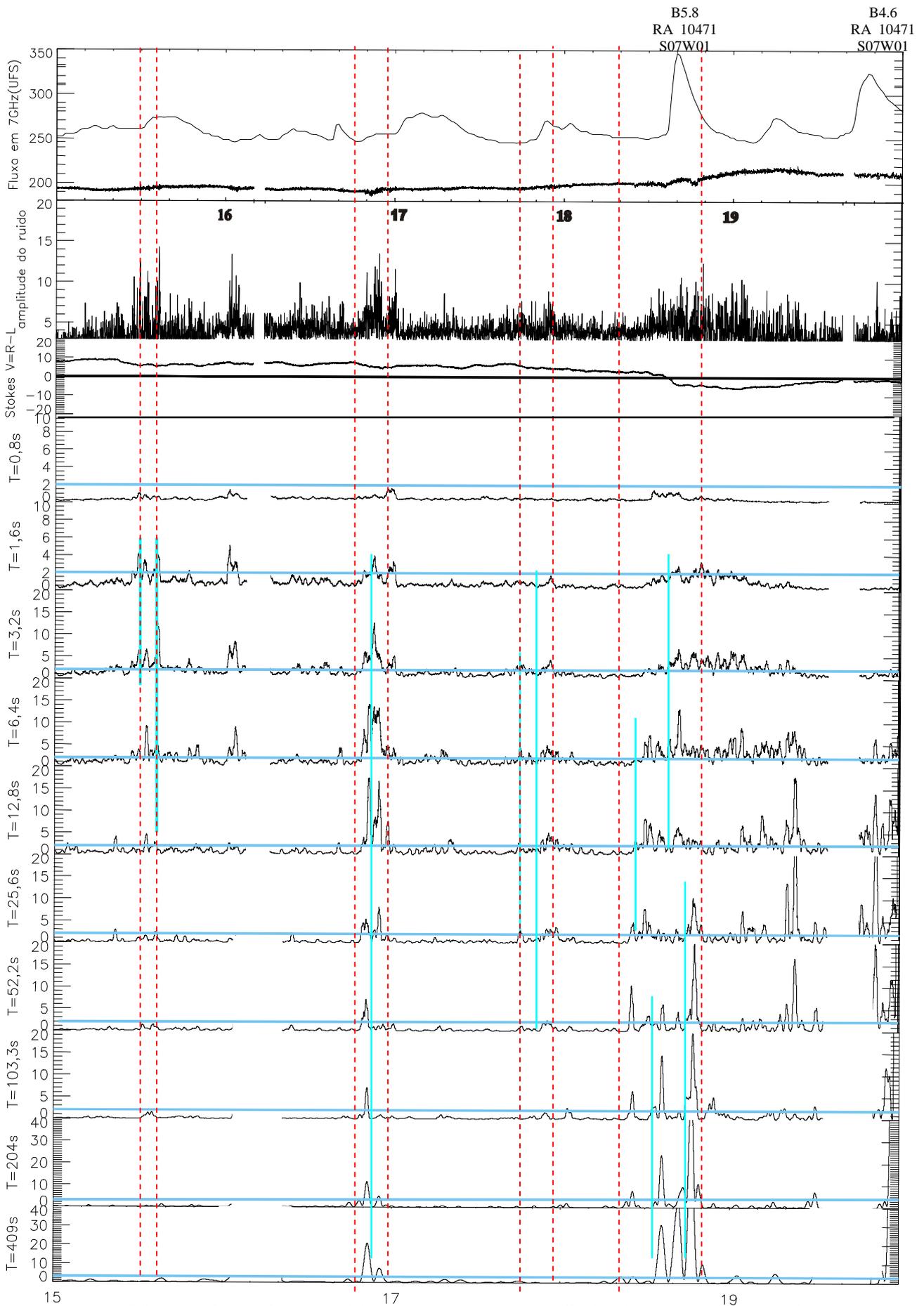


Figura 8.2.2- Ampliação da figura 8.2. As barras verticais pontilhadas destacam os instantes de interesse. Enquanto as barras verticais azuis mostram exemplos de faixas onde a potência das componentes de período foi considerada significativa. Os traços horizontais definem em 'c' o nível zero do fluxo polarizado e em 'd' o limite de significância.

Potência Onduleta das Componentes de período do sinal em 7GHz													
06/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz
10:48 UT	10	0,5	2,5	5	5	6	5	4	0,5	0,5	1	220	112
13:10UT	10	1	3	3	2	1	1	0	0	0	0	início em raios-X com $3,4 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> no pico às ~14:10UT	
15:38 UT	14	0,5	3,5	12	5	1	1	1	1	0	0	Pico em raios-X com $2,7 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup>	
16:55UT	14	0,5	3,5	12	14	17	5	6	7	11	21	Subida em raios X com $2,8 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> no pico às 17:10 UT	
18:25UT	5	0	0	0	0,5	1	4	10	6	7	5		
18:35UT	9	1	1	3	5	5	0,5	5	14	23	30	início em raios X do evento B5.8 com $6 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> no pico às ~18:40 UT, na posição S07W02, RA 10471	

Tabela 4- Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

### 8.1.1- Discussões

Dia de fraca atividade solar, com o relato de 4 eventos em raios X classificados pelo Goes como B, sendo 2 destes durante o período de observações em 7 GHz. Embora não tenham ocorrido eventos em 7 GHz neste dia, a emissão em 7 GHz apresentou aumentos na amplitude do ruído associados aos eventos em raios X. As componentes de períodos aparecem primeiro na faixa entre 1,6s e 6,4s antecedendo ou no início dos eventos em raios X, e depois se estende para até 409 s durante os mesmos. Os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram maiores quando ocorreram variações mais pronunciadas no fluxo polarizado em 7 GHz (Stokes V). A maior variação do fluxo polarizado em 7 GHz do dia ocorreu durante o evento B5.8, o mais intenso. As relações quantitativas destes parâmetros estão na tabela 8.1, que mostra que o aumento na potência das componentes de períodos mais longos na faixa de 52,2s a 409s do sinal foi mais pronunciado no maior evento do dia. A potência máxima foi 30 (409s) às 18:35 UT próximo do início e >40 durante o evento raios X B5.9 (~18:40 UT).

## 8.2- Análise do dia 22 de outubro de 2007

### Aspectos Gerais

No dia 22 de outubro de 2003, o fluxo global do Sol em 3 GHz foi ~160 ufs e a componente *S* em 7 GHz foi ~350 ufs. Neste dia foram relatados 6 eventos em raios X classificados como M pelo Goes, dos quais 3 ocorreram no período de observações do Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), o evento M1.4 às ~15:06 UT e o evento M1.2 às ~15:59 UT na RA 10484, e o evento M9.9 às ~19:47 UT na RA 10486. Associado a cada evento M do período de observações do ROI foi relatada uma EMC. A posição de cada uma das regiões ativas presentes no disco solar neste dia é apresentada na figura 8.3.

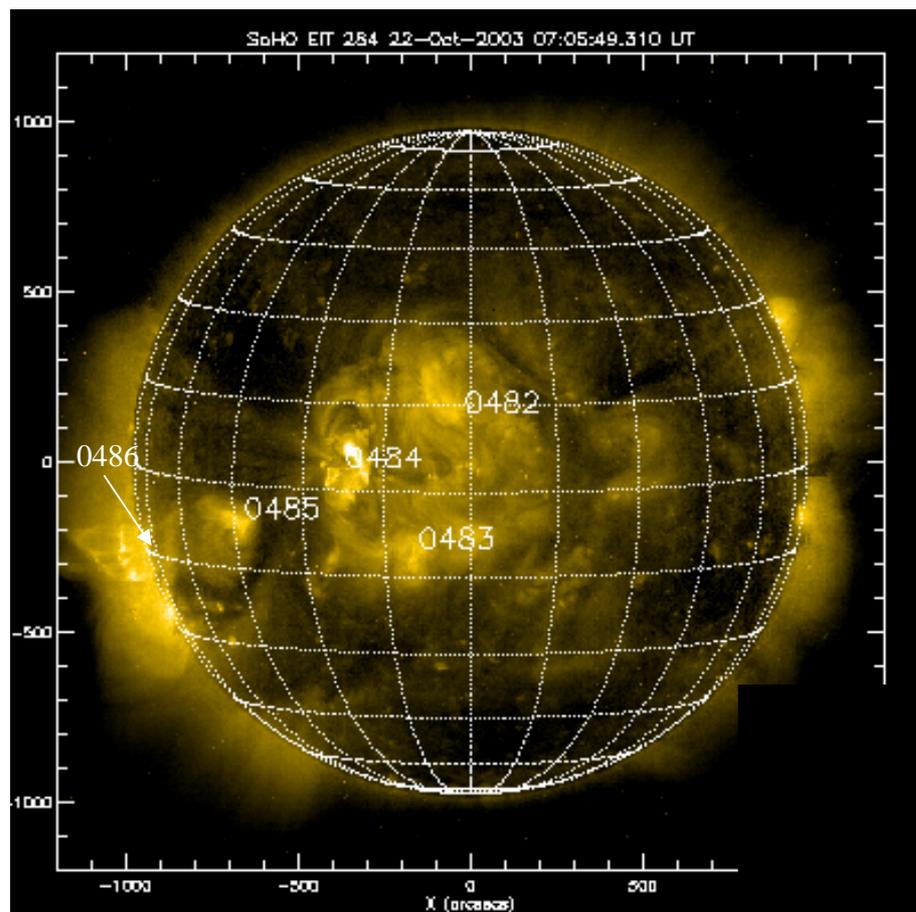


Figura 8.3 - Imagem em ultravioleta feita pelo satélite SOHO no dia 22/10/03

(fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031022\\_1013/index.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031022_1013/index.html))

A atividade solar observada em 7 GHz para este dia é mostrada no topo da figura 8.4. O início das observações em 7GHz se deu durante a queda de um evento gradual em raios X que terminou ~15:00 UT. Os 3 eventos em raios X do tipo M tiveram contrapartida em 7 GHz. Associado a todos os eventos em raios X, mesmo os mais fracos, a componente *S* em 7 GHz apresentou aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído. Os eventos em 7 GHz ocorreram às ~11:13 UT com ~20 ufs, às ~11:25 UT com ~40 ufs, às ~12:15 UT com ~65 ufs, às ~15:15 UT com ~120 ufs, às ~16:01 UT com ~215 ufs, às ~16:50 UT com ~15 ufs, às ~17:35 UT com ~45 ufs e às ~19:50 UT com ~1500 ufs. Associado ao aumento da atividade solar no decorrer do dia, o sinal em 7 GHz ficou mais ruidoso especialmente no trecho das ~11:55 UT às 15:00 UT, que antecedeu o evento M1.4 das ~15:06 UT relatado na RA10484.

Após o evento M1.2 das ~15:59 UT, que também ocorreu na RA 10484, a amplitude do ruído aumentou novamente em associação aos eventos em raios X de menor intensidade, e no final do dia antecedendo o evento M9.9 das ~19:40 UT, que ocorreu na RA 10486. O fluxo polarizado em 7 GHz iniciou o dia com excesso de fluxo polarizado a direita, apresentou uma queda gradual a partir de ~11:25 UT e se tornou polarizado a esquerda entre ~12:10 UT e ~18:00 UT. Depois das ~18:00 UT, ~1,6 horas antes do evento M9.9, se tornou polarizado a direita. A análise ondeleta mostra que os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram acompanhados por aumentos mais pronunciados na potência das componentes de período do sinal, desde minutos a horas antes dos eventos solares mais intensos.

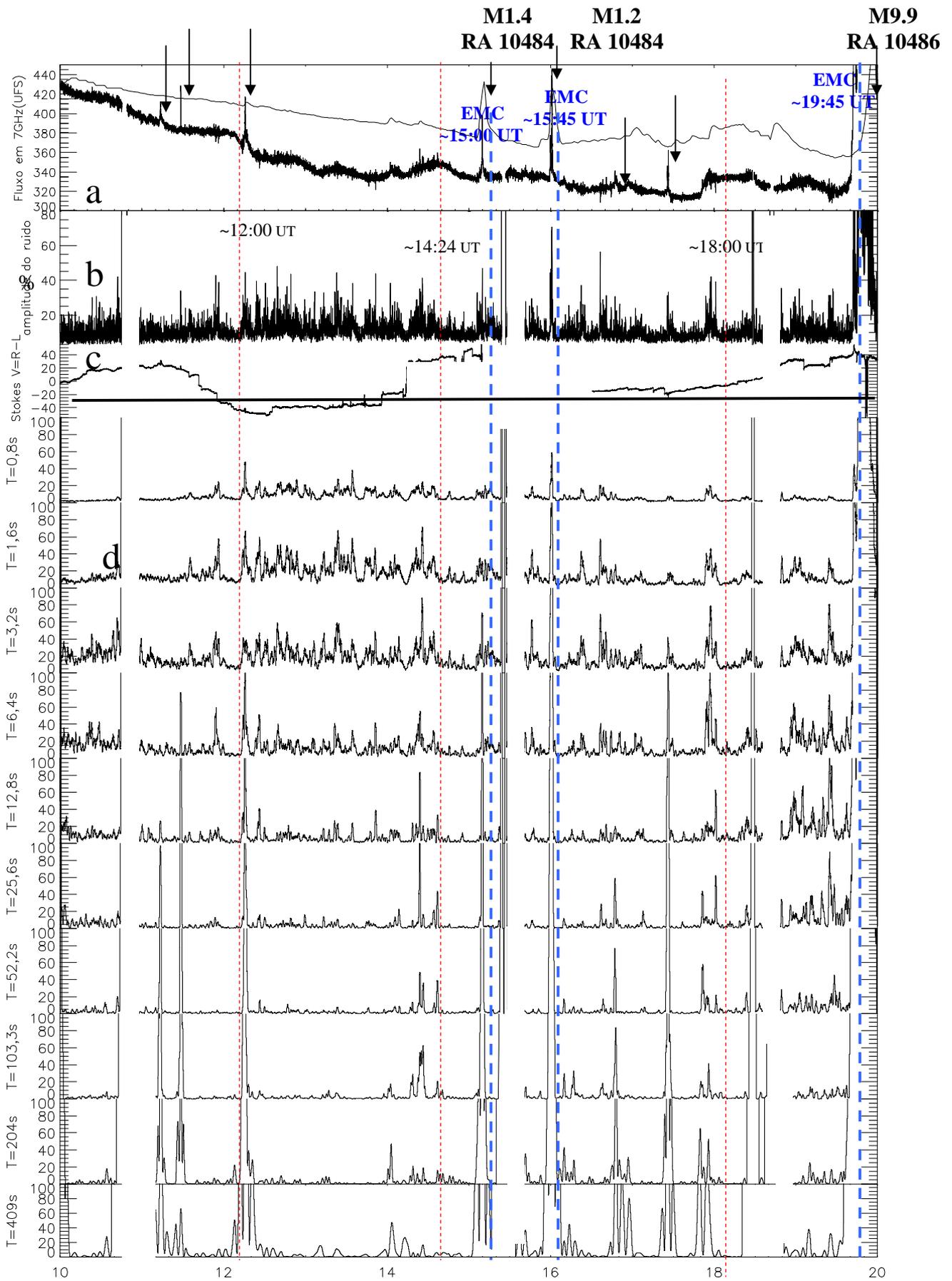


Figura 8.4 a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em Raios X mole do GOES (traço fino), b)- amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L), d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s). As setas pretas indicam os principais eventos em 7GHz do dia. Os trechos de calibração (~11UT, ~15UT e 19UT) foram subtraídos da figura.

### Características do sinal no trecho das 11:00 UT às 15:00 UT

O trecho das 11:00 UT às 15:00 UT engloba a fase de decaimento do evento em raios X M3.7 com pico às ~3:51 UT que ocorreu na RA10486. Neste período ocorreram vários eventos fracos em raios X, cujo fluxo se sobrepôs ao anterior. Durante os eventos fracos em raios X, foram observados aumentos de até ~40% na amplitude do ruído do sinal em 7 GHz (8 vezes o valor encontrado fora dos eventos). Na figura 8.4.1 pode-se observar que, os 4 primeiros eventos impulsivos em 7 GHz (setas na fig 8.4.1), bem como os aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído ocorreram próximo do início dos eventos fracos em raios X não classificados pelo Goes. Nestes casos, tem-se que as maiores amplitudes ocorreram em trechos de minutos a horas antes dos eventos em raios X, que tiveram contrapartida em 7 GHz. Por exemplo, a amplitude do ruído em 7 GHz começou a aumentar às ~11:35 UT, depois de um evento tipo III, e alcançou o máximo às ~11:55 UT, ~20 minutos antes do evento das ~12:15 UT que alcançou ~65 ufs em 7 GHz. O sinal em 7 GHz ficou mais ruidoso no trecho das ~12:25 UT às ~14:40 UT, antes do evento M1.4 das ~15:06 UT, que teve em contrapartida ~120 ufs em 7 GHz.

A análise ondeleta do fluxo em 7 GHz mostra o aparecimento de componentes de período com potências significativas ( $>3 \sigma_{pp} = 20$ , neste dia), na faixa de ~1,6s e 3,2s às ~11:35 UT, crescendo para faixa de ~0,8s a ~6,4s às ~11:55 UT, associado às amplitudes do ruído  $>20\%$ , que precederam o evento em 7 GHz das ~12:15 UT. No trecho das ~12:25 UT às ~15:00 UT, a amplitude do ruído foi  $>20$ , a potência das componentes de período do sinal foi  $>20$  na faixa de 0,8s a 12,8s até as ~14:00 UT, e se expandiu para 0,8s a 409s, entre 14:00 UT e ~14:40 UT, quando foram relatados eventos na alta coroa em vários

comprimentos de onda. Às ~15:00 UT foi relatado o início de uma EMC na atmosfera solar (fig 8.5a) e, em seguida, às ~15:08 UT ocorreu o evento M1.4 na RA 10484.

Entre ~15:30 UT e ~16:00 UT (fig 8.4.2), a análise ondeleta do sinal apresentou comportamento semelhante, expandindo a faixa de componentes de período até os períodos mais longos (409s), antes do início estimado para saída de outra EMC (fig 8.5a) às ~15:45 UT (fig 8.4.2).

EMC  
~15:00 UT

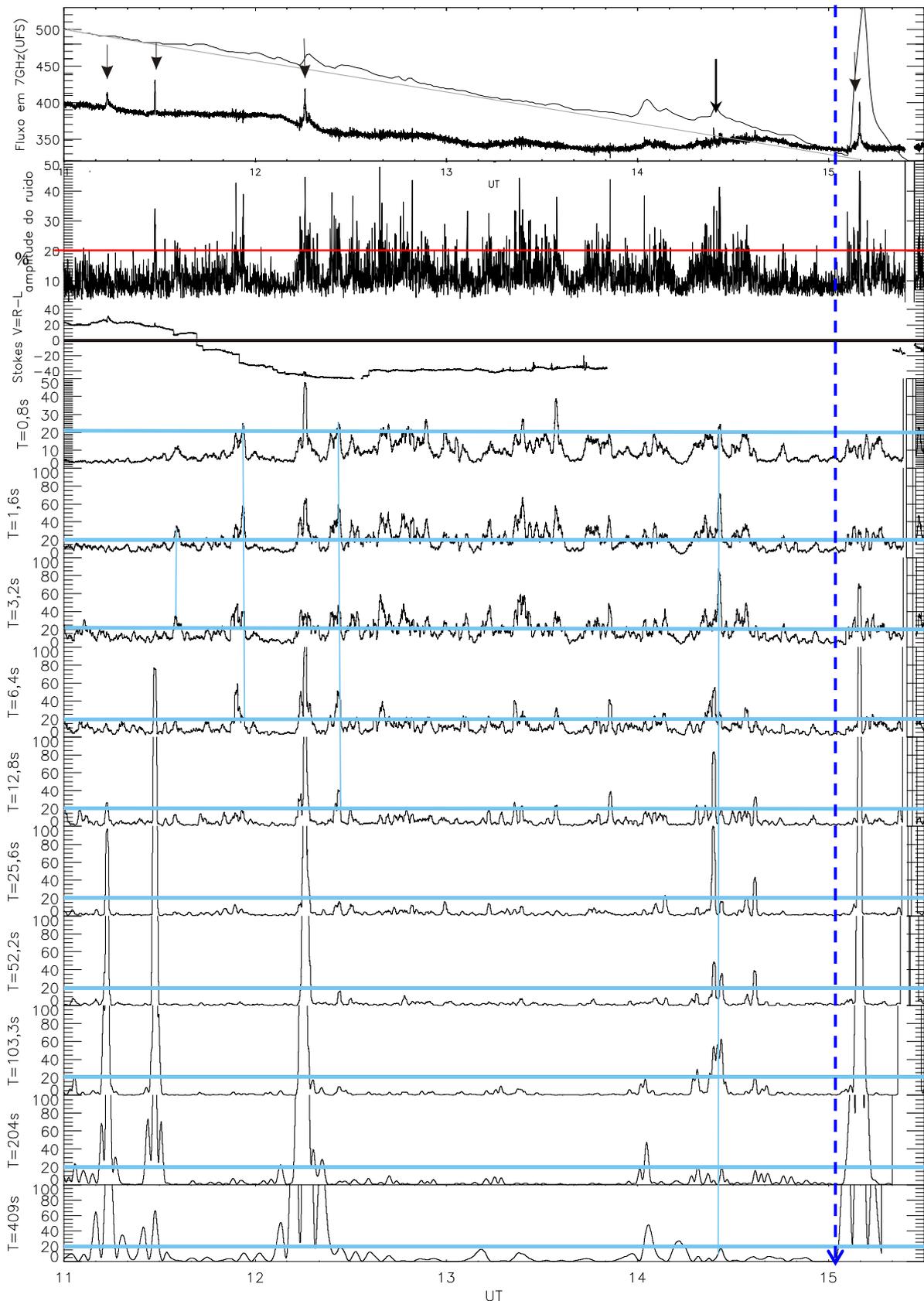


Figura 8.4.1- Ampliação da figura 8.4. A barra horizontal vermelha em b destaca o nível de 20% da amplitude do ruído. As barras verticais cheias destacam as bcp de interesse, enquanto as barras horizontais definem em 'c' o nível zero do fluxo polarizado e em 'd' o limite de significância. A seta tracejada aponta a estimativa do LASCO para o início de uma EMC na atmosfera solar.

EMC  
~15:45 UT

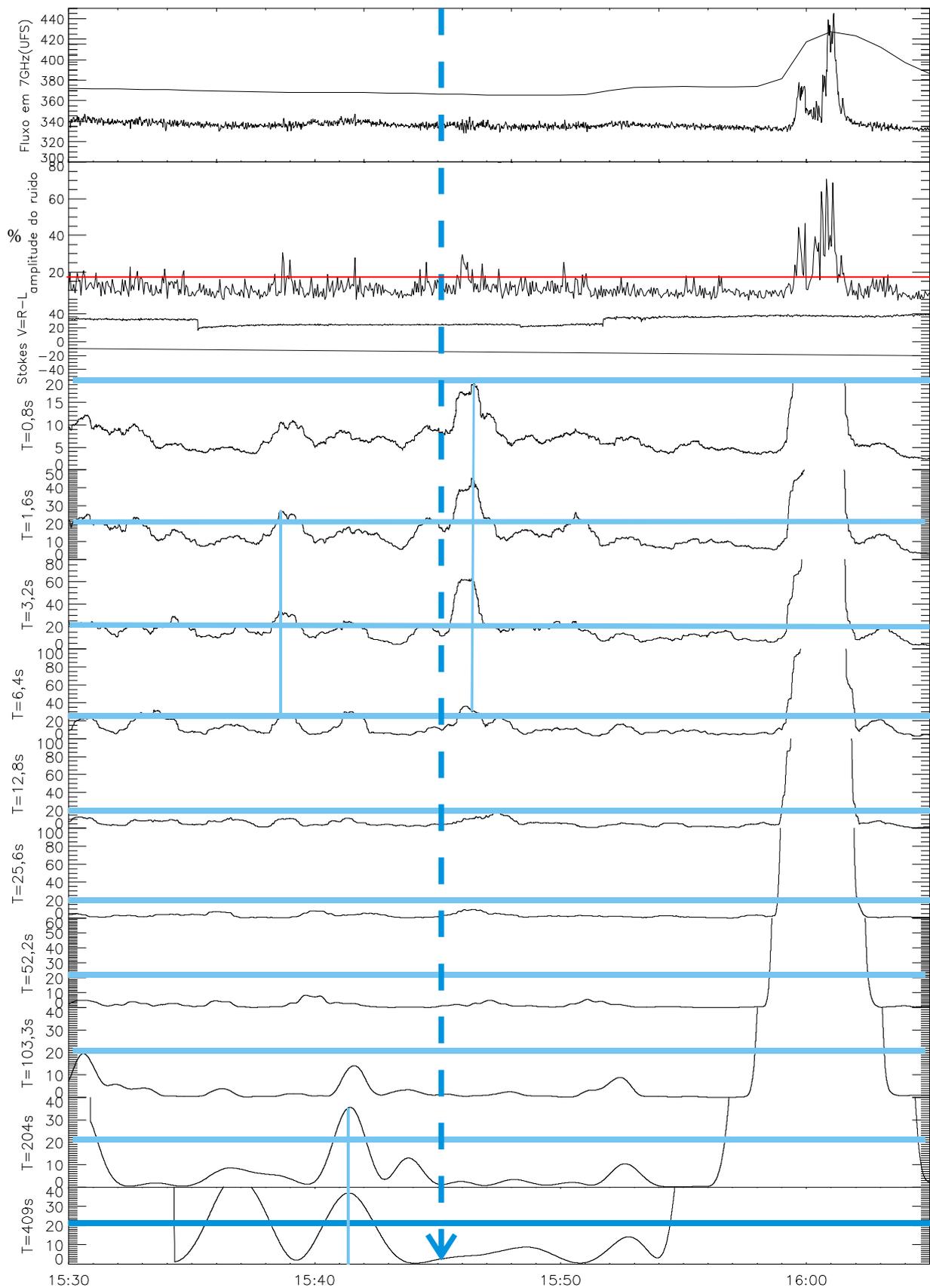


Figura 8.4.2- Ampliação da figura 8.4. A barra horizontal vermelha em b destaca o nível de 20% da amplitude do ruído. As barras verticais cheias destacam as bcp de interesse, enquanto as barras horizontais definem em 'c' o nível zero do fluxo polarizado e em 'd' o limite de significância. A seta tracejada aponta a estimativa do LASCO para o início de uma EMC na atmosfera solar.

### Características do sinal no trecho das 16:00 UT às 20:00 UT

Analisando-se o trecho das 16:00 UT às 20:00 UT, que precede o evento em raios X M9.9 das ~19:45 UT na RA 10486, o mais intenso do dia, observa-se que o sinal em 7 GHz também apresenta aumentos na amplitude do ruído associados aos eventos fracos em raios X. Os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram mais pronunciados (>20%) às ~16:25 UT, entre ~16:30 UT e ~16:50 UT, entre ~17:50 UT e ~18:00 UT, e entre ~18:55 UT e ~19:30 UT. De modo geral, estes aumentos na amplitude do ruído ocorreram próximo do início de eventos fracos em raios X sem classificação Goes. Exceto, no intervalo das ~18:55 UT às ~19:30 UT, que se deu durante a queda de um evento em raios X que teve início às ~18:40 UT, alcançou o pico com  $\sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$  às ~18:45 UT, e antecedendo o evento M9.9 que se iniciou às ~19:45 UT. Neste trecho o fluxo polarizado em 7 GHz se despolarizou e passou para polarizado à direita às ~18:20 UT.

A análise ondeleta mostra que nos trechos em que a amplitude do ruído foi >20% apareceram componentes de período (CP) principalmente na faixa de ~0,8s a ~25,6s se estendendo até 409s às ~18:00 UT, quando ocorreram um subflare e outros eventos em ondas métricas (setas na fig 8.4.3), e das ~18:50 UT às ~19:30 UT. A potência das componentes de período do sinal também apresentou aumentos mais pronunciados em todos os trechos em que a amplitude do ruído foi >20%, mas os maiores (~80) valores apareceram entre ~19:20 UT e ~19:30 UT, na faixa de ~1,6s a ~25,6s, justamente quando a bcp alcançou os períodos de 409s. Este comportamento antecedeu a ocorrência de 1 EMC com início reportado às ~19:33 UT (fig 8.5.2) e o evento em raios X, M9.9, com início reportado às 19:40 UT. A tabela 5 mostra a potência das componentes de período do sinal nos trechos que antecederam os eventos deste dia.

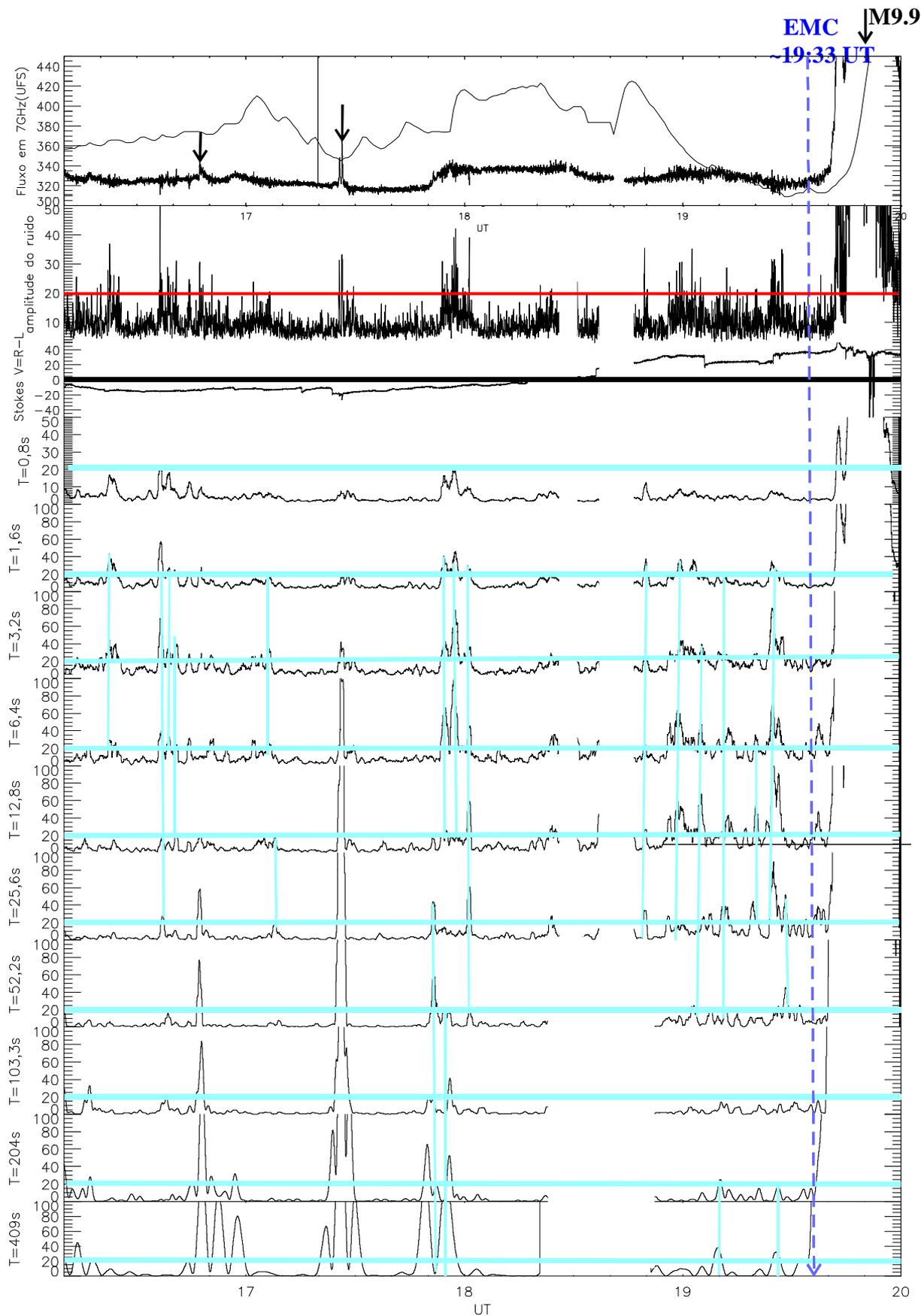


Figura 8.4.3- Ampliação da figura 8.4. As barras verticais destacam trechos e as bcps de interesse. As barras horizontais definem em 'c' o nível zero do fluxo polarizado (linha preta) e o limite de significância (linha azul). A seta tracejada aponta a estimativa do NOAA para o início de uma EMC na atmosfera solar.

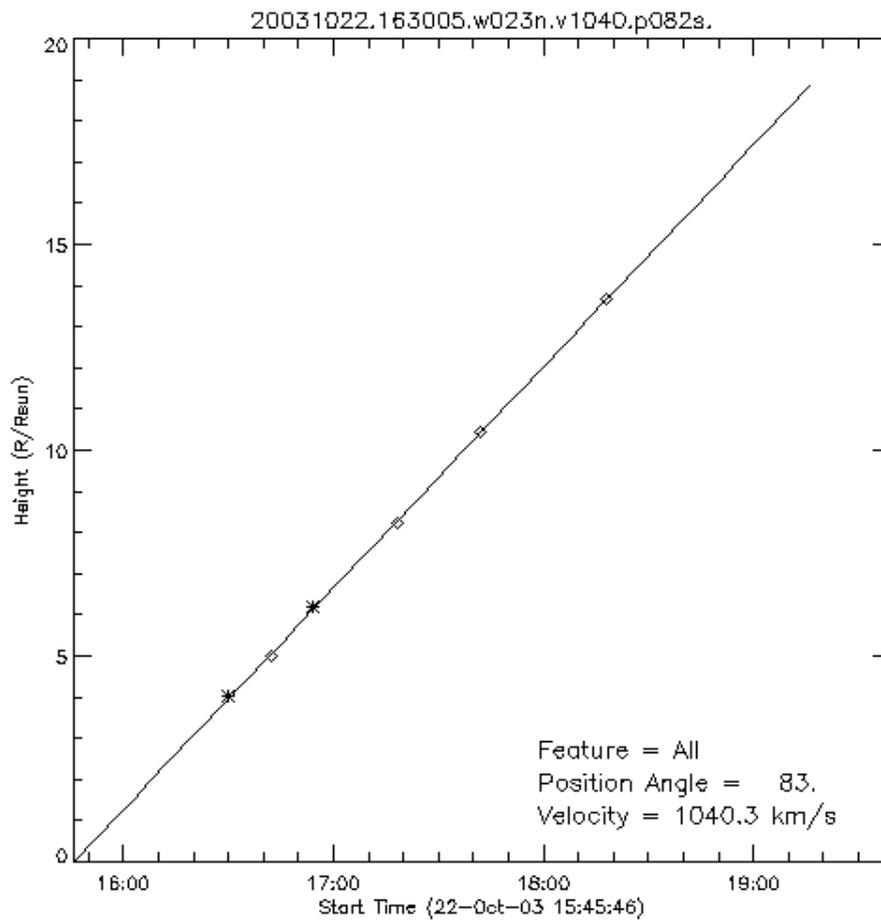
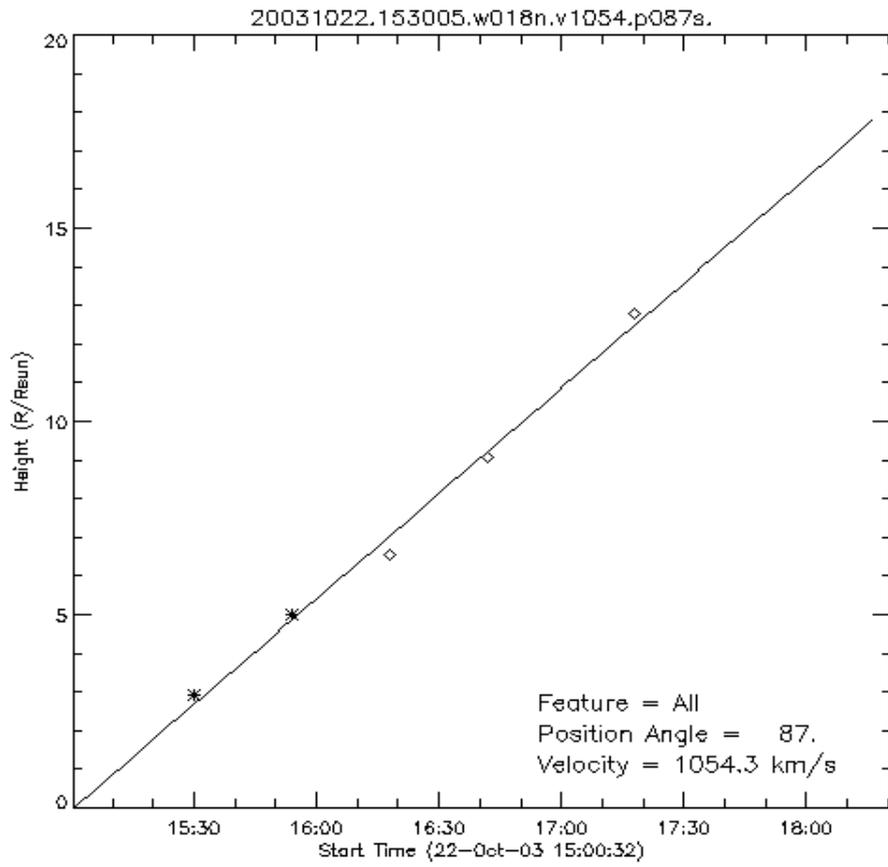


Fig 8.5a- Estimativa do início das EMCs na atmosfera solar feita pelo NOAA 92

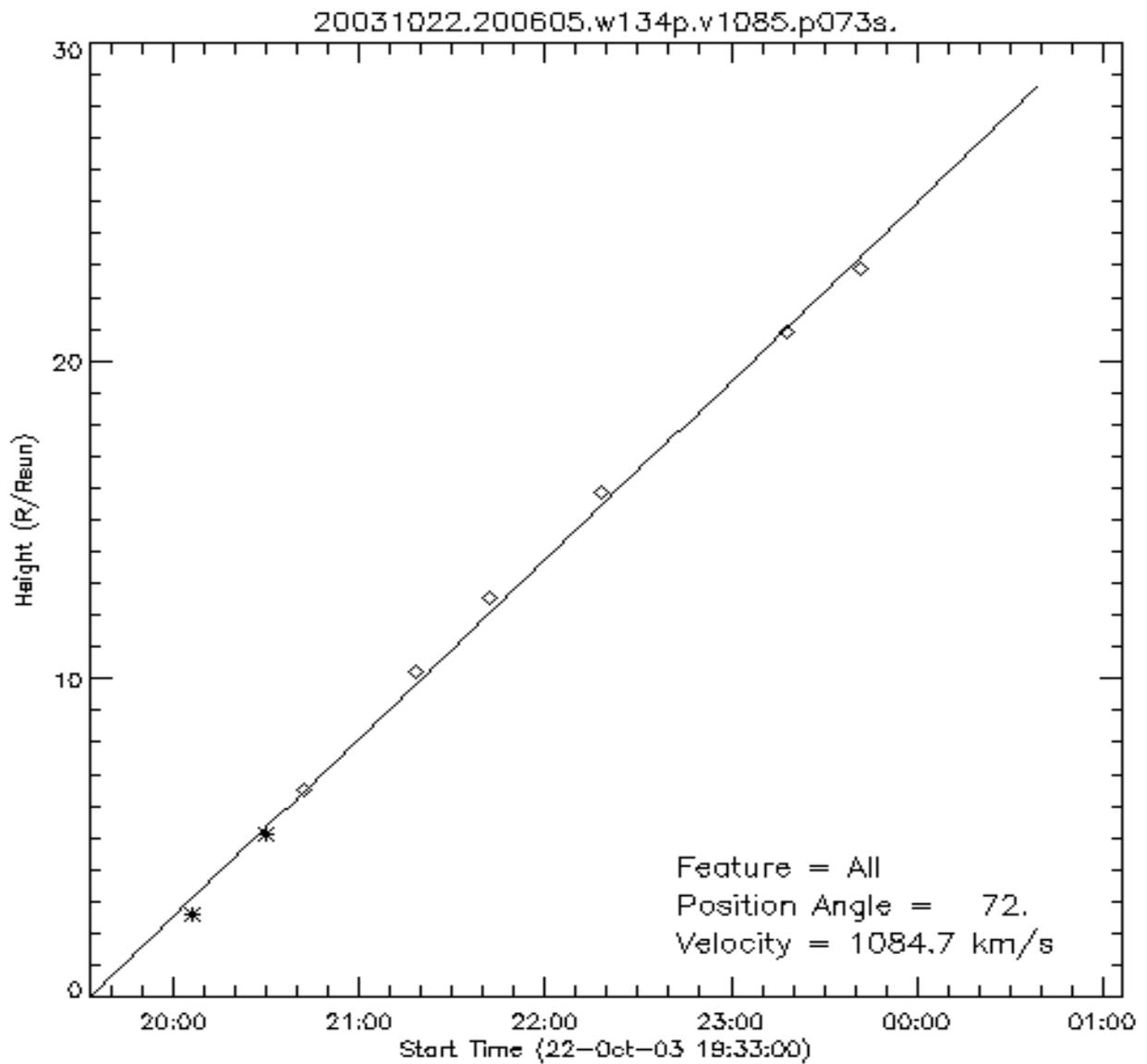


Fig 8.5b- Estimativa do início da EMC na atmosfera solar feita pelo NOAA

Potência Ondeleta das Componentes de período do sinal em 7GHz													
22/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz
11:35UT	22	10	30	30	15	15	2	0	0	0	0	300	153
11:55UT	42	23	55	40	60	40	10	0	0	10	10		
~12:13 UT início em raios X com $9 \cdot 10^{-5}$ W/m <sup>2</sup> no pico às 12:15 UT; início em 7 GHz com ~60 ufs às ~12:15 UT													
12:40UT	46	23	40	50	35	10	5	0	2	10	10		
13:25UT	46	25	61	60	35	25	10	5	5	1	1		
13:51UT	44	12	45	45	40	30	0	0	0	0	0		
~14:00 UT início em raios X com $6,7 \cdot 10^{-6}$ ufs no pico às ~14:03 UT e com ~5 ufs no pico em 7 GHz às ~14:06 UT													
14:25UT	40	23	62	70	25	20	15	50	60	15	15	Pico em raios X com $6,1 \cdot 10^{-6}$ W/m <sup>2</sup> e pico de um evento impulsivo em 7 GHz com ~10 ufs	Fluxo circularmente polarizado a esquerda
14:33UT	25	12	30	50	20	15	20	10	5	1	1		
14:38UT	15	5	10	25	30	30	45	35	20	14	10		
14:47UT	20	5	30	25	15	12	1	2	5	10	10		
14:57UT	20	3	25	20	15	10	0	0	0	0	0		
~15:00 UT CME (LASCO); ~15:06 UT início do evento M1.4 (N05E22), RA10484 com ~65 ufs em 7GHz													
16:12UT	25-35	15	40	40	30	15	5	5	5	5	5		
16:27UT	25-55	20	55	65	40	15	25	1	5	1	1		
~16:37 UT início de um evento em 7 GHz com ~20 ufs sem contrapartida significativa em raios X													
17:52UT	5	0	1	1	1	20	45	50	15	10	0		
17:53UT	23-28	15	39	40	60	25	5	15	1	0	0		Início em raios X
17:55UT	28-39	17	40	75	100	20	1	5	5	40	130		
18:01UT	20-38	9	20	35	65	60	65	15	5	0	0		
~17:52 UT, início do evento em raios X, que alcançou o pico de $\sim 5,8 \cdot 10^{-6}$ W/m <sup>2</sup> , sem excesso significativo em 7 GHz													
18:50UT	20-35	17	50	40	25	25	30	40	5	0	0	Fluxo circularmente polarizado a Direita	
19:00UT	20-30	8	50	50	65	60	15	10	5	0	5		
19:24UT	25-35	8	50	80	70	105	90	10	5	0	0		
19:26UT	25-35	8	20	30	70	90	50	50	14	15	35		
~19:33 UT CME (LASCO); ~19:47 UT início do evento em raios X M9.9, RA10486(S18E78) e ~19:43 UT início do evento em 7GHz													

Tabela 5- Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

### 8.2.1- Discussões

Neste primeiro dia de alta atividade solar ocorreram vários eventos M em raios X na RA 10484 e na RA 10486, sendo que 4 deles foram no período de observações com o 7 GHz, queda do M1.7 na RA 10486 às ~9:56 UT, o M1.4 na RA 10484 às ~15:08 UT, o M1.2 na RA 10484 às ~15:59 UT e o M9.9 na RA 10486 às ~19:45 UT. Os eventos em raios-X M1.4, M1.2 e M9.9, do período de análise, tiveram EMCs associadas. Antes dos eventos em raios X M1.4 e M1.2, a polarização predominante do fluxo em 7GHz era circular a esquerda (L), a amplitude do ruído aumentou no início e/ou durante os eventos em raios X e apareceram componentes de período na faixa de ~0,8s a ~12,8s, com potências máximas de ~30 a ~50 na faixa de 1,6 ou 6,4s (tabela 5) com pico em **3,2s** até ~14:00 UT. Pois, entre ~14:00 UT e ~14:40 UT, a bcp foi de 0,8s a 409s com potência máxima de ~100 na faixa de 25,6s. Entre 16:10 UT e 16:30 UT, antes do evento fraco em 7 GHz das ~16:37 UT com 20 ufs, a bcp foi de 0,8s a 12,8s com potência máxima de 40 em ~1,6s. Associado ao evento das 18:00 UT, a bcp foi de 0,8s a 409s com potência máxima  $\geq 100$  em 409s.

Cerca de ~1,5 hora antes do evento M9.9 na RA 10486, o fluxo em 7 GHz se despolarizou e depois passou a ser circularmente polarizado a direita até o evento. Minutos antes do evento, às ~19:25 UT, a amplitude do ruído foi >20%, e as potências máximas das componentes de período foram de ~ 50 a ~105 na faixa e 25,6s a 52,2s (tabela 5) com pico entre **12,8s e 25,6s**.

Os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz entre 11:30 UT e ~15:30 UT, ocorreram durante uma tempestade de ruído na alta coroa na faixa de 20 a 70 MHz (fig 8.6). Embora a tempestade tenha começado antes do início das observações do ROI, houve

um aumento visível na sua intensidade, principalmente no canal R, depois das ~11:10 UT conforme mostra a figura 8.6, justamente quando o sinal em 7 GHz ficou mais ruidoso. Os aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz foram acompanhados por aparecimentos de componentes de período no sinal, sendo que as componentes de período mais longos ( $>52,2s$ ) apareceram associadas a eventos em ondas métricas, como por exemplo, às ~14:05 UT e ~14:24 UT em ~600 MHz, às ~16:48 UT (tipo III) na faixa de 25-180 MHz. Próximo dos instantes estimados para a saída das três EMCs na atmosfera solar, as componentes de períodos apareceram em toda faixa entre 0,8s a 409s com potências mais intensas chegando a ~100 na faixa de 12,8s a 25,6s. As EMCs tiveram velocidades de 1000 a 1100 km/s.

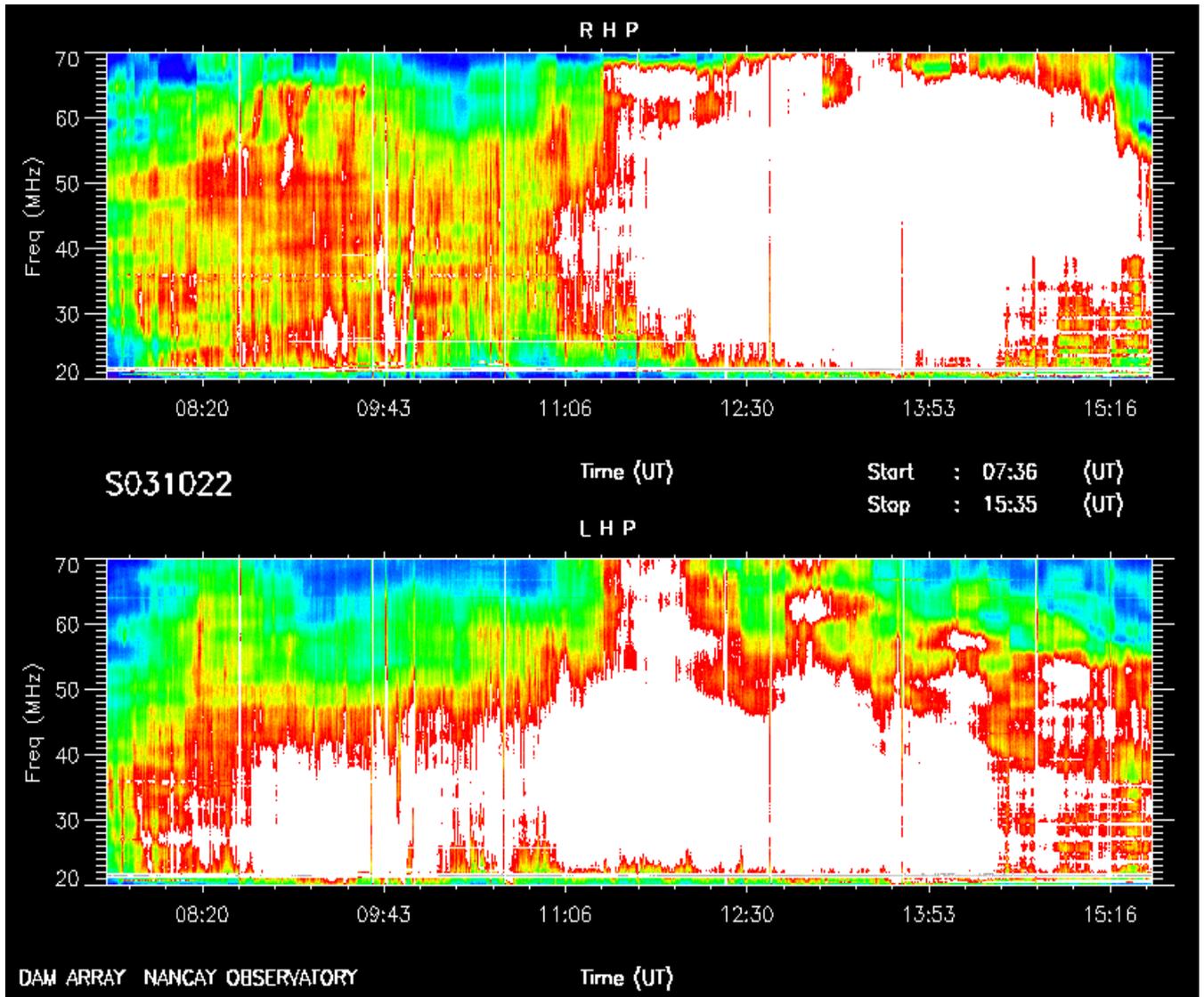


Fig 8.6- Espectro dinâmico do Radio Telescópio de Nançay na faixa de 20 a 70 MHz

### 8.3- Análise do dia 23 de outubro de 2003

#### Aspectos Gerais

Neste dia o fluxo global do Sol em 3 GHz foi ~180 ufs e a componente *S* em 7 GHz foi em média ~320 ufs. Foram reportados 6 eventos em raios X detectados pelo Goes, 4 classificados como M e 2 classificados como X. Durante as observações em 7 GHz, ocorreram os eventos em raios X, M2.7 na RA 10484 posição N05E00 às ~10:40 UT, M1.0 às ~16:20 UT, sem posição definida, e o evento X1.1 às ~20:00 UT na RA 10486, e 2 EMCs, uma às ~12:48 UT e outra às ~19:33 UT. A figura 8.7 mostra a posição da RAs do Sol neste dia.

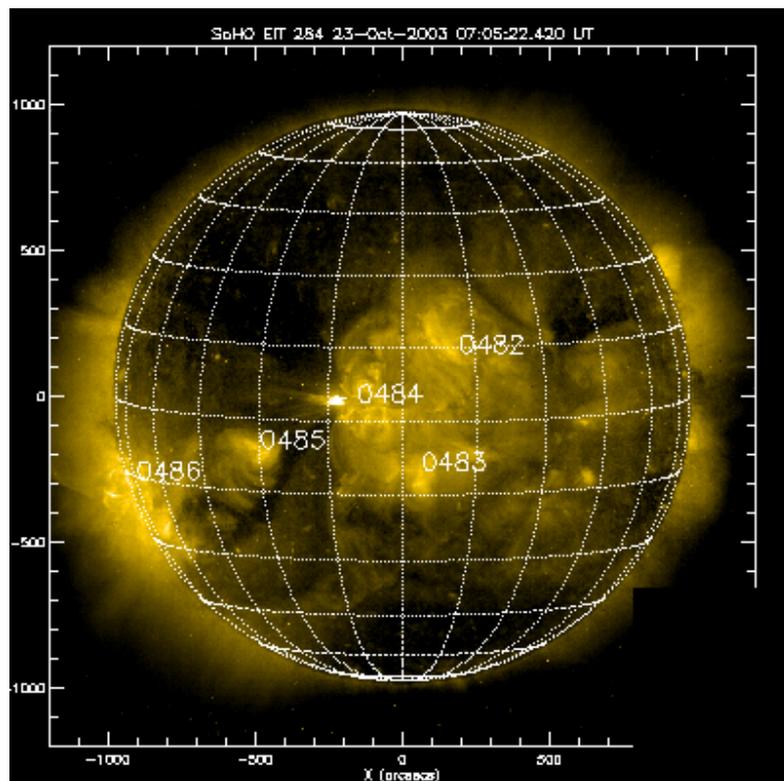


Figura 8.7 - Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 23/10/03

(Fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031023\\_1031/index.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031023_1031/index.html))

O início das observações em 7 GHz se deu durante a queda do evento X5.4 cujo pico foi às ~8:40 UT na RA10486, e se estendeu até ~16:00 UT (fig 8.8). Durante a queda deste evento, ocorreram vários eventos em raios X, sendo um M2.7 com pico às ~10:50 UT na RA 10484. Às ~19:40 UT, teve início o evento X1.1, que foi o mais intenso do período de análise, com pico às ~20:04 UT e ocorreu na RA 10486. Em 7 GHz foi detectado um evento gradual com pico às ~10:50 UT associado ao evento em raios X M2.7, 4 eventos fracos (<20 ufs) às ~11:50 UT, às ~12:40 UT, às ~12:52 UT e às 18:40 UT, associados a eventos fracos em raios X, não classificados pelo Goes, e o maior evento do período de observações com ~1500 ufs no pico em 7 GHz às ~19:55 UT, associado ao X1.1. Durante as observações em 7 GHz deste dia, foram reportados 2 EMCs com início estimado na superfície do Sol em ~12:48 UT e ~19:33 UT.

A figura 8.8 mostra que, o sinal em 7 GHz apresentou um aumento mais pronunciado na amplitude do ruído das ~10:10 UT até o final do evento em raios X M2.7, que teve início às ~10:50 UT e terminou ~11:10 UT. Aumentos pronunciados na amplitude do ruído ocorreram também no trecho das ~14:00 UT às ~16:00 UT, que antecedeu o evento M1.0 das ~16:00 UT, e depois das ~17:00 UT, sendo que este último tornou-se mais pronunciado às ~19:20 UT, minutos antes do evento X1.1. O fluxo em 7 GHz permaneceu polarizado a direita das 10:00 UT às ~12:00 UT, despolarizado ou polarizado a esquerda entre 12:00 UT e 16:00 UT, e novamente polarizado a direita depois das ~16:00 UT.

A análise ondeletas mostra que a potência das componentes de período do fluxo em 7 GHz aumentou associada aos aumentos da amplitude do ruído, sendo que minutos e horas

antes dos eventos mais fortes em raios X, o M2.7 e o X1.1, respectivamente, os aumentos foram mais pronunciados.

X5.4  
RA 10486  
S21E88

M2.7  
RA 10484  
N05E00

12:48 UT,  
início da EMC

X1.1  
RA 10486  
S17E84

19:33 UT  
início da EMC

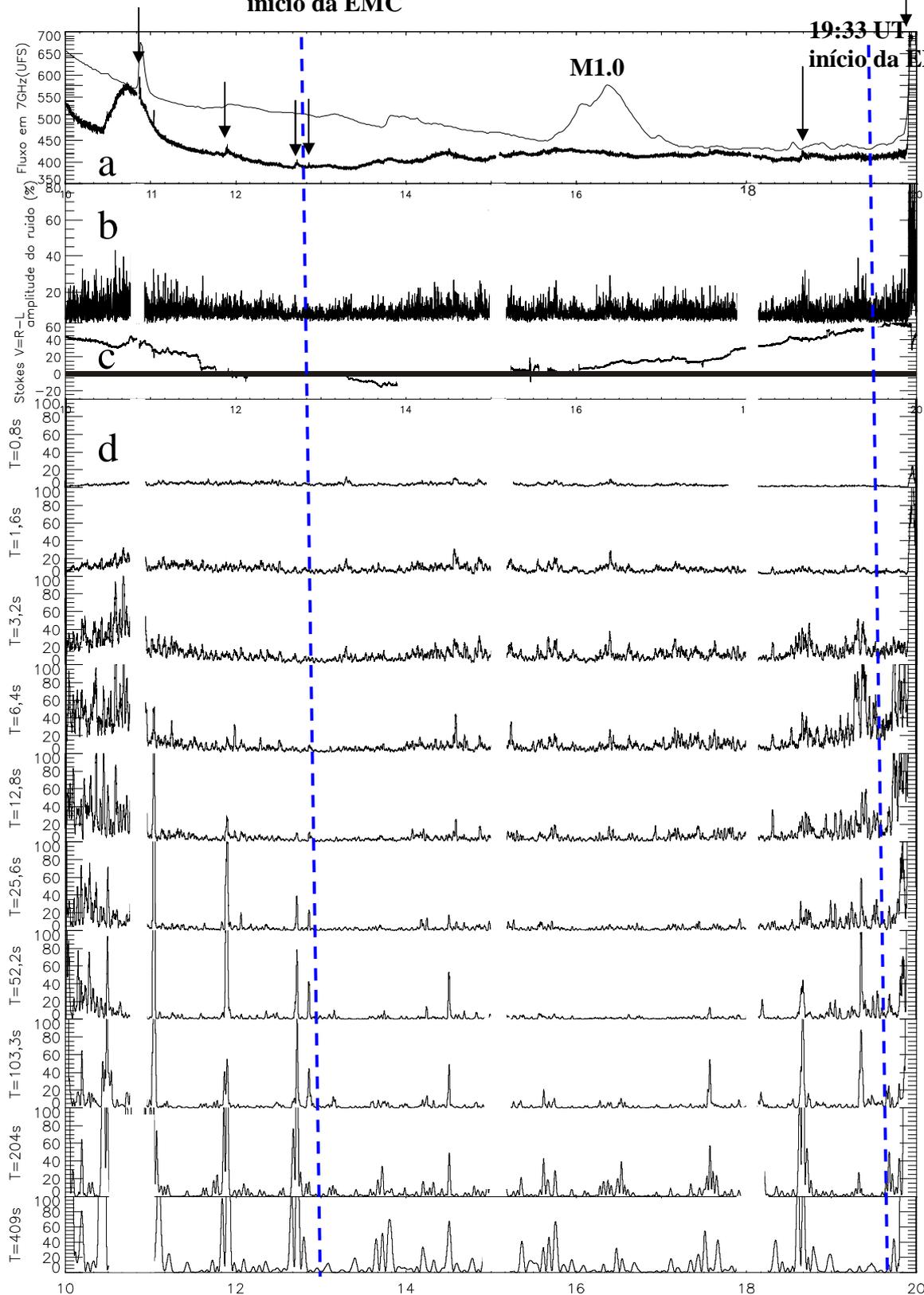


Figura 8.8 a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em raios X mole do GOES (traço fino), b) - amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L). A barra horizontal destaca o nível zero do fluxo polarizado. As barras verticais tracejadas marcam o início estimado para a saída das EMCs da atmosfera solar. d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s).

### **Características do sinal no trecho das 10:00 UT às 11:30 UT**

Neste intervalo ocorreu o evento gradual em 7GHz das ~10:25 UT às ~11:20UT, e que nesta expansão mostra um evento impulsivo fraco em 7 GHz associado ao evento M2.7 das ~10:50 UT, que ocorreu na RA 10484 (fig 8.8.1). O sinal em 7 GHz esteve ruidoso desde o início das observações, mas a partir das ~10:12 UT, a amplitude do ruído começou a apresentar aumentos de até ~30% antes do evento gradual e atingindo ~40 % durante mesmo. Este comportamento se estendeu até o início do evento impulsivo em 7 GHz que foi associado ao evento M2.7. O fluxo polarizado em 7 GHz diminuiu gradativamente desde o início das observações, mas apresentou uma queda maior durante o evento gradual em 7 GHz (fig 8.8.1). A análise ondeleta mostra que as componentes de período com potência significativa ( $>20$ ), que aparecem antes do evento gradual em 7 GHz estão predominantemente na faixa de 3,2s a 52,2s, enquanto que durante o evento as componentes de período aparecem na faixa de 1,6s a 12,8s.

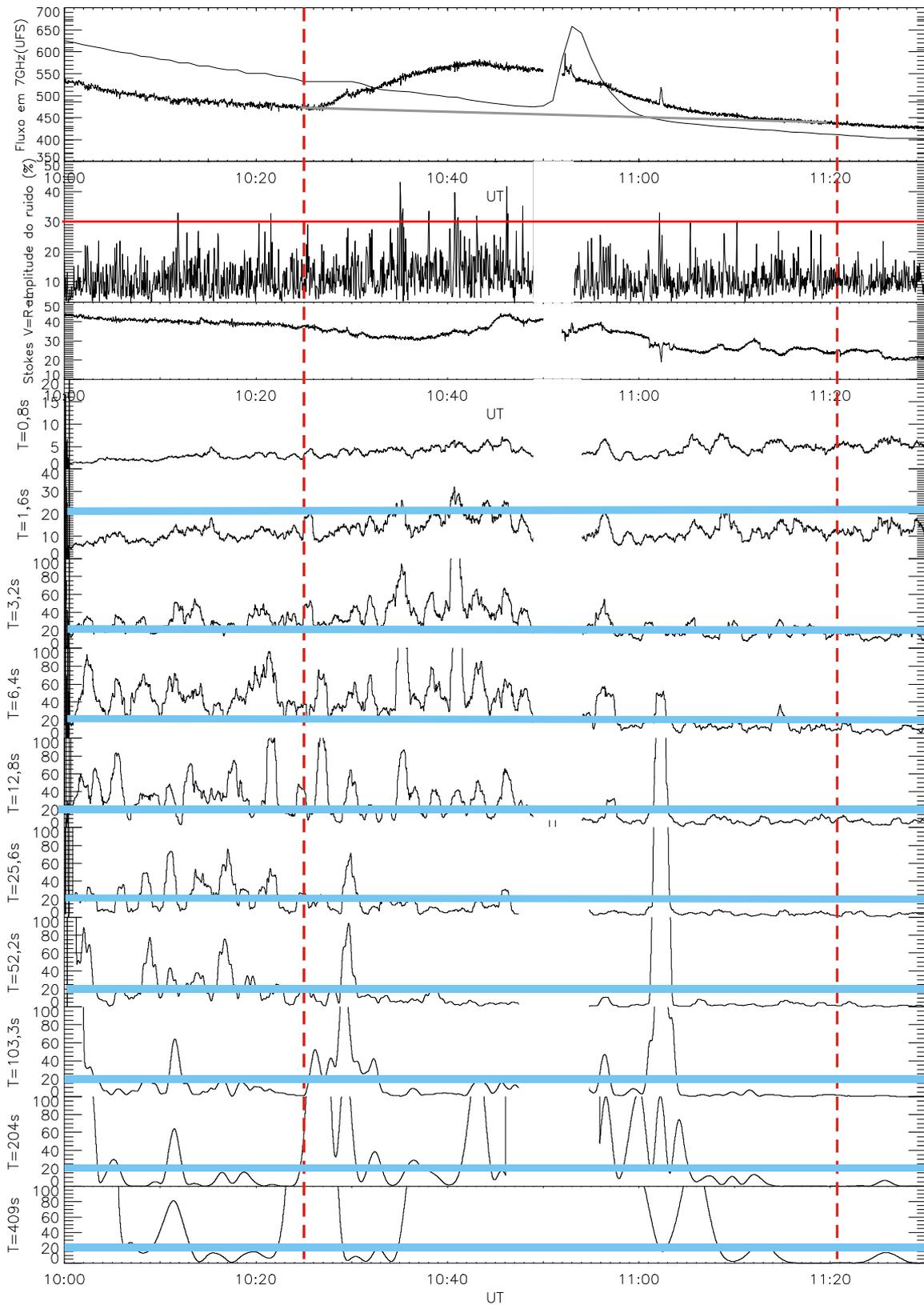


Figura 8.8.1. Ampliação da figura 8.8. As barras verticais tracejadas marcam o início e o fim do evento gradual em 7GHz. As barras horizontais azuis marcam o limite de significância estabelecido para a potência das componentes de período do sinal e a vermelha realça a marca de 30% na amplitude.

### **Características do sinal no trecho das 11:30 UT às 17:00 UT**

No trecho das ~11:30 UT às ~17:00 UT (fig 8.8.2), foram observados vários eventos fracos em raios X e o evento médio M1.0 com pico às 16:20 UT, sem posição determinada. Em 7 GHz foram observados eventos fracos ( $f \sim 20$  ufs) às ~11:55 UT e ~12:40 UT e ~12:55 UT associados aos eventos fracos em raios X, mas não teve evento em 7 GHz associado ao evento M1.0. A amplitude do ruído em 7 GHz apresentou aumentos  $>20\%$ , durante os eventos fracos em raios X, que ocorreram entre ~14:00 UT e ~15:20 UT, e entre ~15:40 UT e ~16:20 UT, durante o evento M1.0. A análise ondeleta mostra componentes de período do sinal em 7 GHz com potência  $\geq 20$  ufs<sup>2</sup>, predominantemente na faixa de 1,6s a 12,8s, nos trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$ , e também na faixa de ~204s a 409s às ~13:20 UT e ~15:30 UT, próximo do início de eventos em raios X relativamente mais intensos, sendo o ultimo associado ao início do evento M1.0 e a ocorrência de um evento tipo III. Foi relatado a ocorrência de 1 EMC com início estimado às ~12:48 UT na atmosfera solar (fig 8.9).

12:48 UT,  
início da EMC

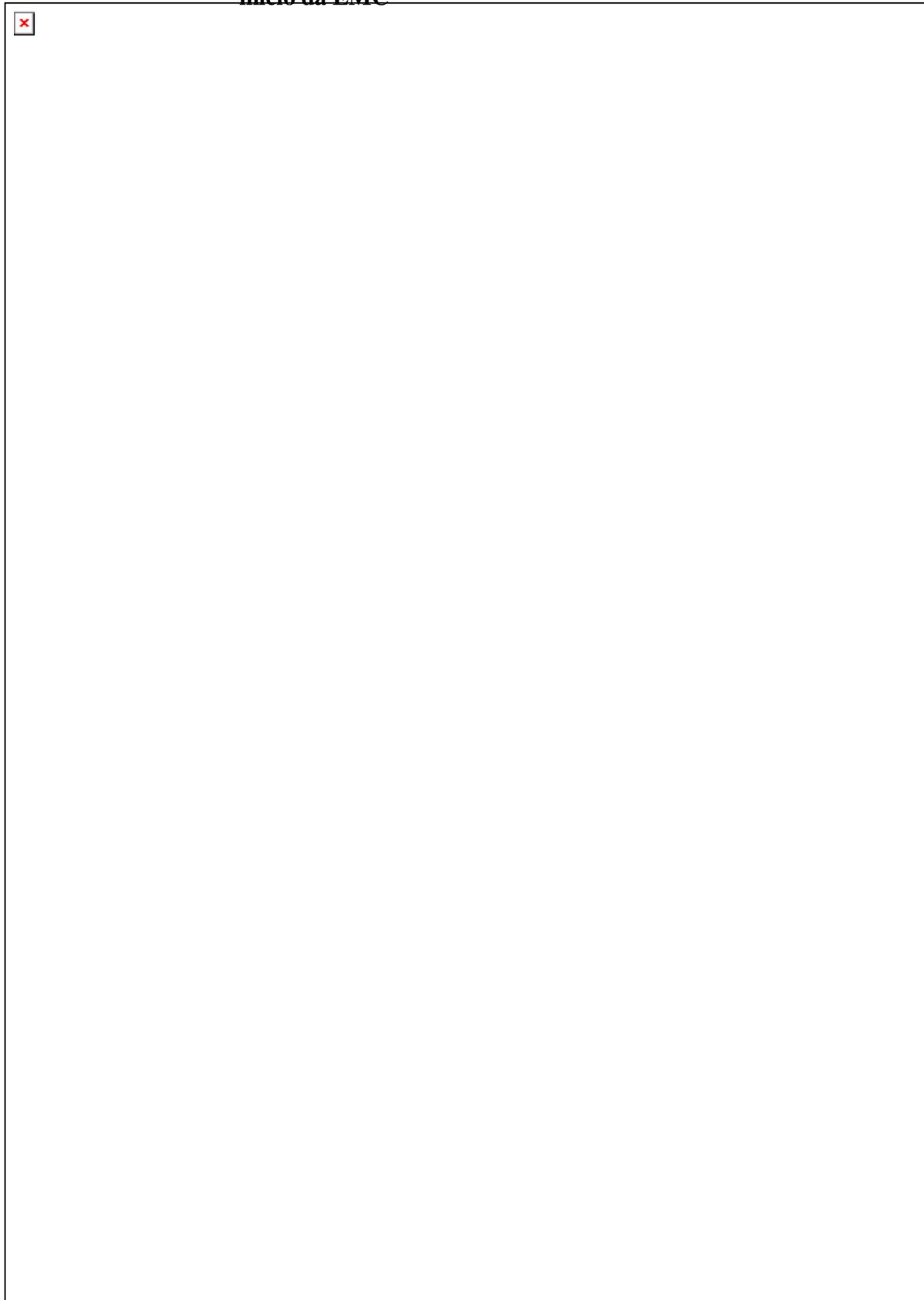


Figura 8.8.2- Ampliação da figura 8.8. As barras verticais azuis marcam destacam as bcps nos trechos de maior interesse. As setas indicam os eventos em 7 GHz ou a estimativa de início da EMC na atmosfera solar

### **Características do sinal no trecho das 17:00 UT às 20:00 UT**

No trecho das 17:00 UT às 19:40 UT, que antecede o evento X1.1, observa-se a ocorrência de vários eventos fracos em raios X associados a eventos pequenos ( $<10\text{ufs}$ ) em 7 GHz (~17:30 UT às ~18:40 UT) ou a aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído em 7 GHz (fig. 8.8.3). Os aumentos na amplitude do ruído  $\geq 20\%$  ocorreram entre ~17:10 UT e ~18:00 UT, e entre ~19:00 UT e ~19:25 UT. O fluxo em 7 GHz foi polarizado a direita e cresceu gradativamente, durante todo o intervalo.

A análise ondeleta mostra que as componentes de período do sinal apareceram durante os eventos fracos em raios X, que foram associados aos aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído em 7 GHz ( $>20\%$ ). No trecho das ~17:10 UT às ~18:00 UT, as componentes apareceram na faixa de 3,2s a 12,8s, enquanto que no trecho das ~18:15 UT às 19:25 UT, apareceram na faixa de 3,2s a 52,2s, e se estendendo até 3,2s a 204s, nos trechos de ~19:15 UT às ~19:30 UT e ~19:40 UT às ~19:50 UT. Nestes intervalos, que antecederam em minutos o evento X1.1, as componentes de período do sinal apresentaram as maiores potências, sendo que às ~19:25 UT a potência das componentes de período na faixa de 25,6s a 204s chegaram a  $\sim 100\text{ ufs}^2$  em 52,2s (tabela 6). Às ~19:32 UT teve início uma EMC (fig.8.9) na atmosfera solar e às ~19:50 UT teve início o evento X1.1 na posição S17E84 da RA10486.

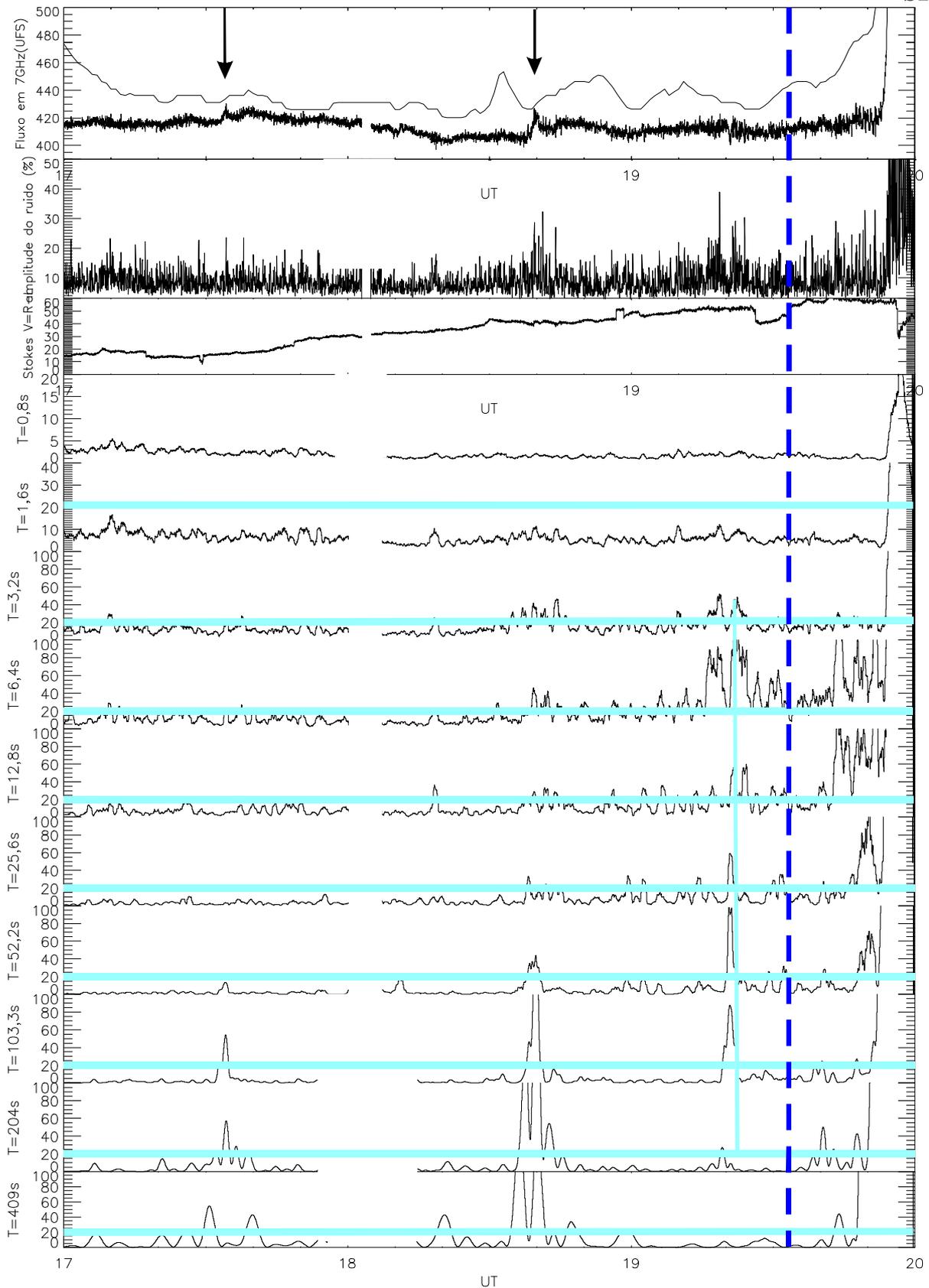


Figura 8.8.3- Ampliação da figura 8.8. As setas verticais pretas 7 GHz e as setas azuis marcam o horário estimado pelo LASCO para o início da EMC na atmosfera solar. As barras verticais azuis destacam as bcps nos trechos de maior interesse.

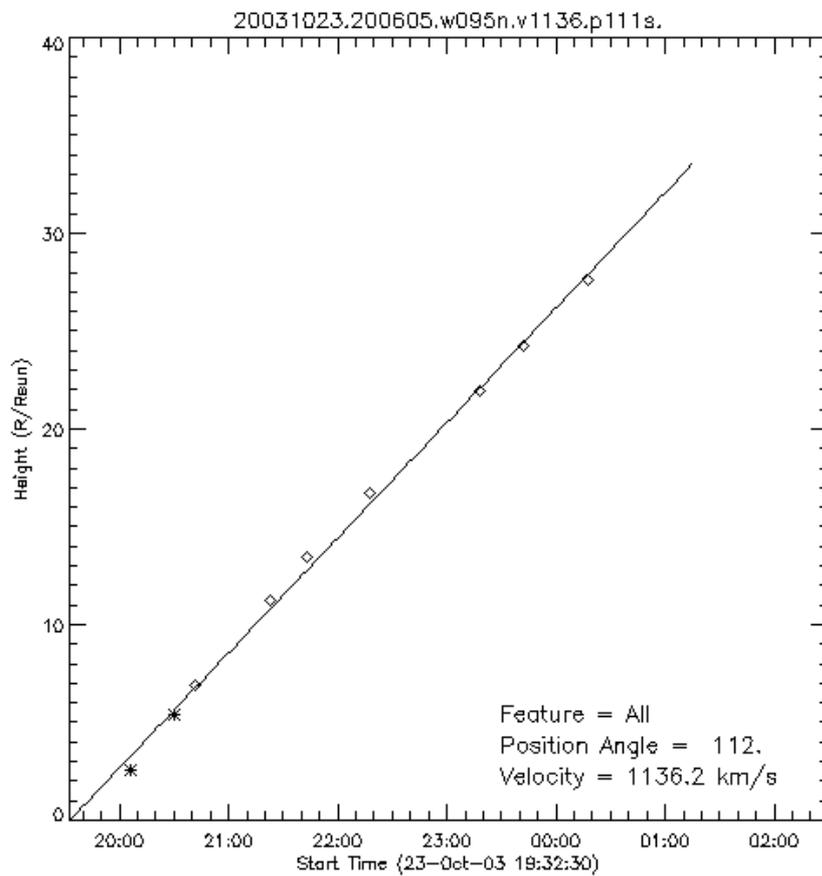
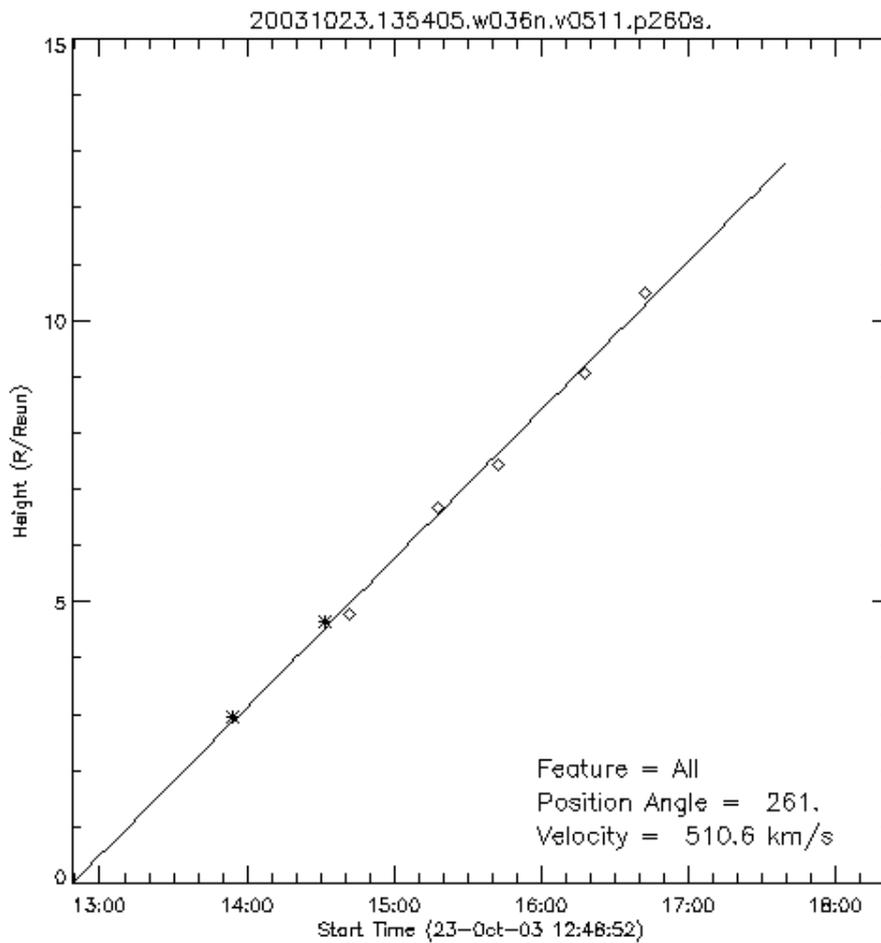


Fig 8.9- Estimativas do início das EMCs na atmosfera solar feita pelo LASCO

	Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz												
23/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz
13:19UT	18	10	18	20	5	4	4	1	1	1	5	320	183
13:44UT	17	3	5	10	10	25	6	5	7	33	50		
~13:45UT início de um evento em raios X com $5 \cdot 10^{-6}$ U no pico às ~13:50 UT, sem excesso significativo em 7 GHz													
14:04UT	10_15	3	13	13	13	10	14	4	2	1	2	Fluxo circularmente polarizado a esquerda	
14:15UT	10_15	3	5	10	5	8	14	13	10	5	10		
14:30UT		5	10	15	10	10	17	40	40	45	65	evento em 7GHz com ~10sfu no pico sem excesso de emissão em raios-X associado.	
14:33UT	20-25	10	30	30	44	25	10	5	3	3	10		
14:53UT	20-25	10	20	30	18	18	7	1	3	1	1	Fluxo circularmente polarizado a esquerda	
15:16UT	20-25	10	19	25	35	7	10	5	4	10	25		
15:45UT	20-28	8	20	30	18	18	3	5	10	28	65		
~15:45 UT início do evento M1.0 sem posição e RA definida													
16:25UT	20-25	9	27	35	20	15	5	0	5	15	1		
18:19UT	15	2	10	25	20	40	5	0	0	0	5	Fluxo circularmente polarizado a Direita	
18:42UT	15-23	2	10	45	20	30	20	5	15	10	20		
19:19UT	20-40	2	10	48	90	35	15	15	5	5	5		
19:25UT	15-25	1	10	45	130	55	60	100	80	10	5		
~19:32 UT início de um CME; ~20:00 UT início do evento X1.1 (S17E84) RA10486													

Tabela 6- Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

### 8.3.1- Discussões

Neste dia foram observados vários eventos em raios X, classificação M na RA 10484 e 2 eventos classificação X na RA 10486. O início das observações em 7 GHz ocorreu durante a queda do evento X5.4 com pico às ~8:35 UT na RA 10486. Durante a queda deste evento ocorreram alguns eventos em raios X, um M2.7 com pico às ~10:40 UT na RA10484, um M1.0, com pico às ~16:20 UT sem posição definida. No final do dia ocorreu um X1.1 com pico às ~20:00 UT na RA10486, e às 12:48 UT e às 19:33 UT foram estimados o início na superfície do Sol de EMCs.

O sinal em 7 GHz apresentou aumentos na amplitude do ruído no início e durante os eventos fracos em raios X, mesmo quando não se teve evento associado em rádio. Estes aumentos foram mais pronunciados ~1 hora antes dos eventos em raios X do tipo M e X do decorrer do dia. As variações na amplitude do ruído antes do evento M2.7 na RA 10484, apresentaram componentes de período com potência significativa na faixa de 3,2s a 52,2s com potências de 30 a 50  $\text{ufs}^2$  e pico em 3,2s, sendo que antes do evento classificação X, foi na faixa de 3,2s a 204s com potências de 80 a 130  $\text{ufs}^2$  e pico em 6,4s. O fluxo em 7 GHz foi polarizado a direita até às ~12:00 UT e depois das ~16:00 UT, sendo polarizado a esquerda das ~12:00 UT às 16:00 UT.

Em alguns trechos onde a amplitude do ruído foi >20 % ou ocorreram eventos em 7 GHz também foram observados eventos em ondas métricas (vide tabela 7). Nestes casos, as componentes de período do sinal apareceram em uma faixa larga que foi de ~3,2s a 409s. A estimativa do início da primeira EMC do período de análise se deu entre dois eventos pequenos (<10 ufs) em 7 GHz às ~12:48 UT e o da segunda se deu às ~19:33 UT, próximo de um intervalo de ~10 minutos onde a amplitude do ruído alcançou valores >20%

e as componentes de período do sinal apareceram na faixa de 3,2s a 204s com potências de 80 a 130  $\text{ufs}^2$  e sendo máxima em 6,4s e 52,2s.

Horário	~10:25 UT	~11:50 UT	~14:35 UT	~17:35 UT	~18:35 UT	~19:25 UT
Faixa	20-70 MHz	20-70 MHz	245 MHz	245 MHz	245 MHz	245 MHz

Tabela 7

## 8.4- Análise do dia 24 de outubro de 2003

### Aspectos Gerais

Neste dia, as RAs 10484 e 10486 (fig 8.10) produziram vários eventos C e M em raios X. O fluxo global do Sol em 3 GHz foi ~190 ufs e a componente *S* em 7 GHz foi ~450 ufs. Durante o período de análise foram observados os eventos em raios X C9.1 às ~10:31 UT, seguido de eventos fracos não classificados pelo Goes das ~11:00 UT às ~14:30 UT, os eventos graduais C8.9 às ~15:23 UT e um M1.3 às ~18:42 UT (fig 8.11). Todos os eventos observados em raios X tiveram contrapartida em 7 GHz e o evento C8.9 foi associado a uma EMC com início estimado às ~15:18 UT.

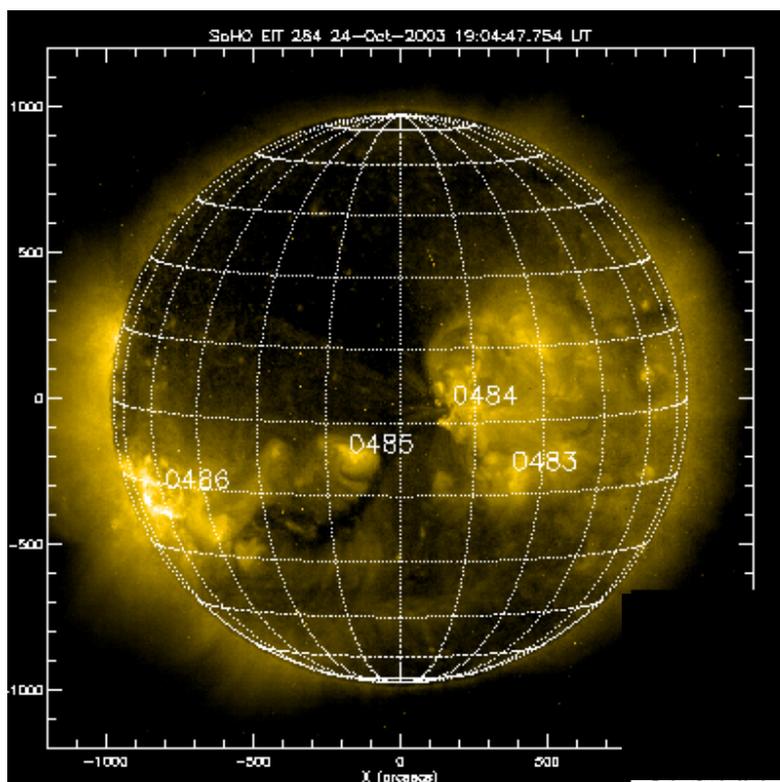


Figura 8.10 - Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 24/10/03

(fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031024\\_2012/gev\\_20031024\\_1031.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031024_2012/gev_20031024_1031.html))

A figura 8.11 mostra que a amplitude do ruído do sinal em 7 GHz foi >20% nos trechos das 10:00 UT às ~10:25 UT, das ~13:00 UT às 14:30 UT, antecedendo o evento em raios X C8.9, e sendo mais pronunciadas (~80%) nos trechos das ~16:10 UT às ~17:00 UT e das ~18:40 UT às 20:00 UT, durante os eventos complexos em 7GHz, que acompanharam os eventos graduais em raios X C8.9 e M1.0. O fluxo em 7 GHz circularmente polarizado a direita durante todo o dia. A análise ondeletas do sinal em 7 GHz mostra o aparecimento de componentes de período, com potências significativas (>20  $\text{ufs}^2$ ), na faixa de 3,2s a 409s, nos trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$ . Particularmente no trecho das ~13:50 UT às ~14:30 UT, as componentes de período apresentaram as maiores potências, principalmente aquelas entre 6,4s e 103,3s, mas de modo geral, as maiores potências foram se deslocando dos períodos mais curtos para os mais longos depois das ~13:00 UT (tabela 8). Às ~15:18 UT, foi estimado o início de uma EMC na atmosfera solar, pouco antes do início do evento C8.9 às ~15:23 UT. Nos trechos das ~16:10 UT às ~17:00 UT, e após às ~18:40 UT, onde a amplitude do ruído aumentou mais pronunciadamente chegando até a  $\geq 80\%$ , apareceram componentes de período no sinal em toda faixa de 0,8s a 409s com potência >100  $\text{ufs}^2$  em todos os períodos >3,2s. Nestes mesmos intervalos foram observados pontos de abrilhantamentos nas imagens em ultravioleta obtidas pelo satélite SOHO (fig 8.12a).

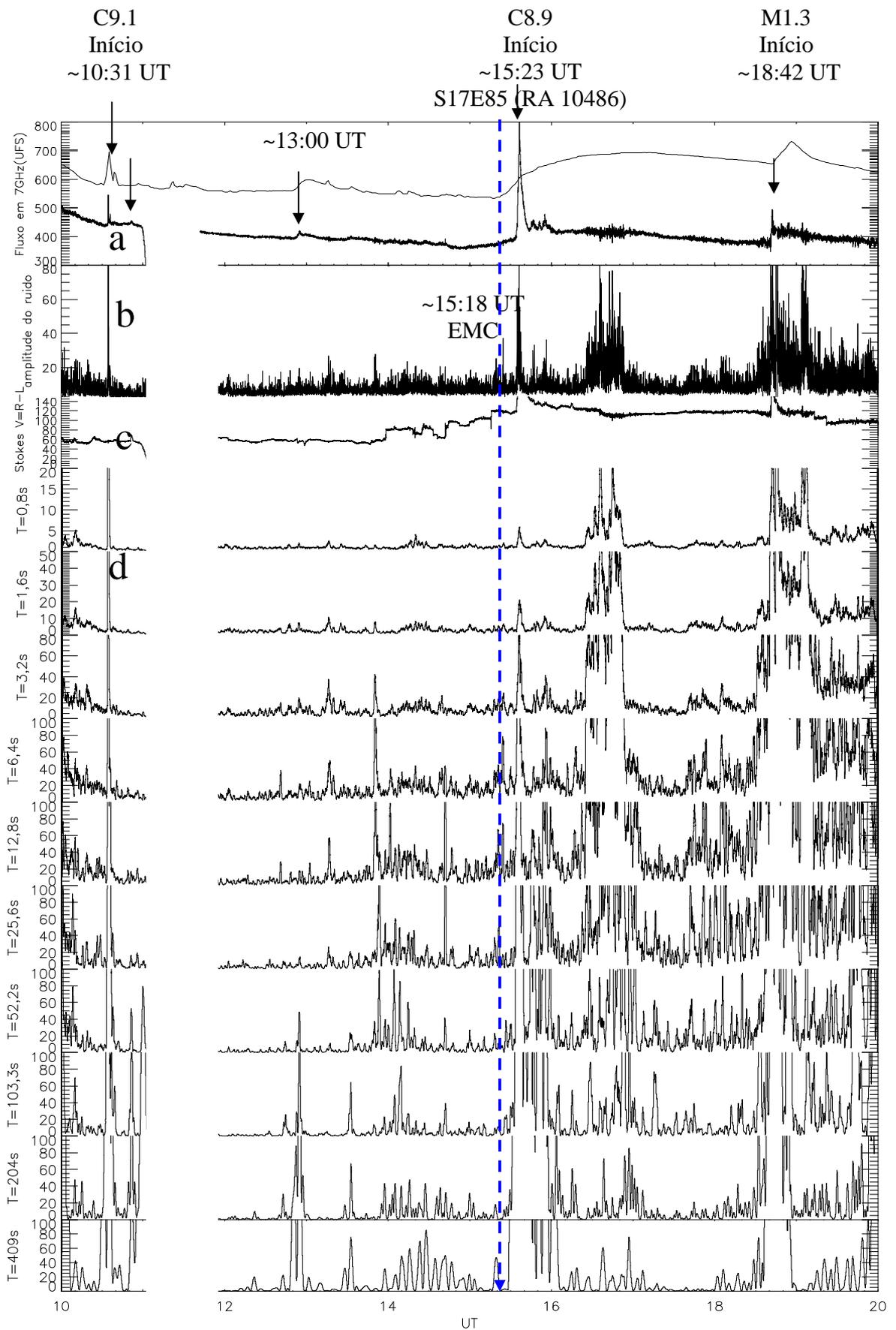


Figura 8.11 a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em raios X mole do GOES (traço fino), b) - amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L). A barra horizontal destaca o nível zero do fluxo polarizado. As barras verticais tracejadas marcam o início estimado para a saída da EMC da atmosfera solar. d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s).

A análise mais detalhada, feita na figura 8.11.1, do trecho das 12:00 UT às 15:20 UT, que antecede o evento C8.9, mostra que os aumentos na amplitude do ruído do sinal em 7 GHz ocorreram associados aos eventos fracos em raios X, sendo que depois do evento das ~13:00 UT, que teve contrapartida em 7GHz, a amplitude do ruído >20%.

A análise ondeleta mostra que os aumentos na amplitude do ruído foram acompanhados por aumentos na potência das componentes de período do sinal mais especificamente, na faixa de ~6,4s a ~12,8s às ~12:40 UT e na faixa de ~52,2s a ~409s às ~12:45, antes do evento das ~12:55 UT. Às ~13:17 UT, na faixa de ~3,2s a 25,6s, antecedendo o evento fraco em 7 GHz das ~13:35 UT. Porém, associado aos aumentos na amplitude do ruído no trecho das ~13:50 UT às 14:50 UT, as componentes de período do sinal apareceram primeiro na faixa de ~3,2s à ~52,2s às 13:50 UT e se estenderam até a faixa de ~12,8s a ~409s das ~14:00 UT às ~15:00 UT. Entre 14:10 UT e ~14:25 UT, as componentes de período apareceram na faixa de ~0,8s a ~25,6s, quando a amplitude do ruído foi ~20%. O evento C8.9 começou às ~15:23 UT e alcançou ~500 ufs no pico em 7 GHz às ~15:40 UT. Às ~15:18 UT, foi relatado o início de uma EMC na atmosfera solar (fig 8.13).

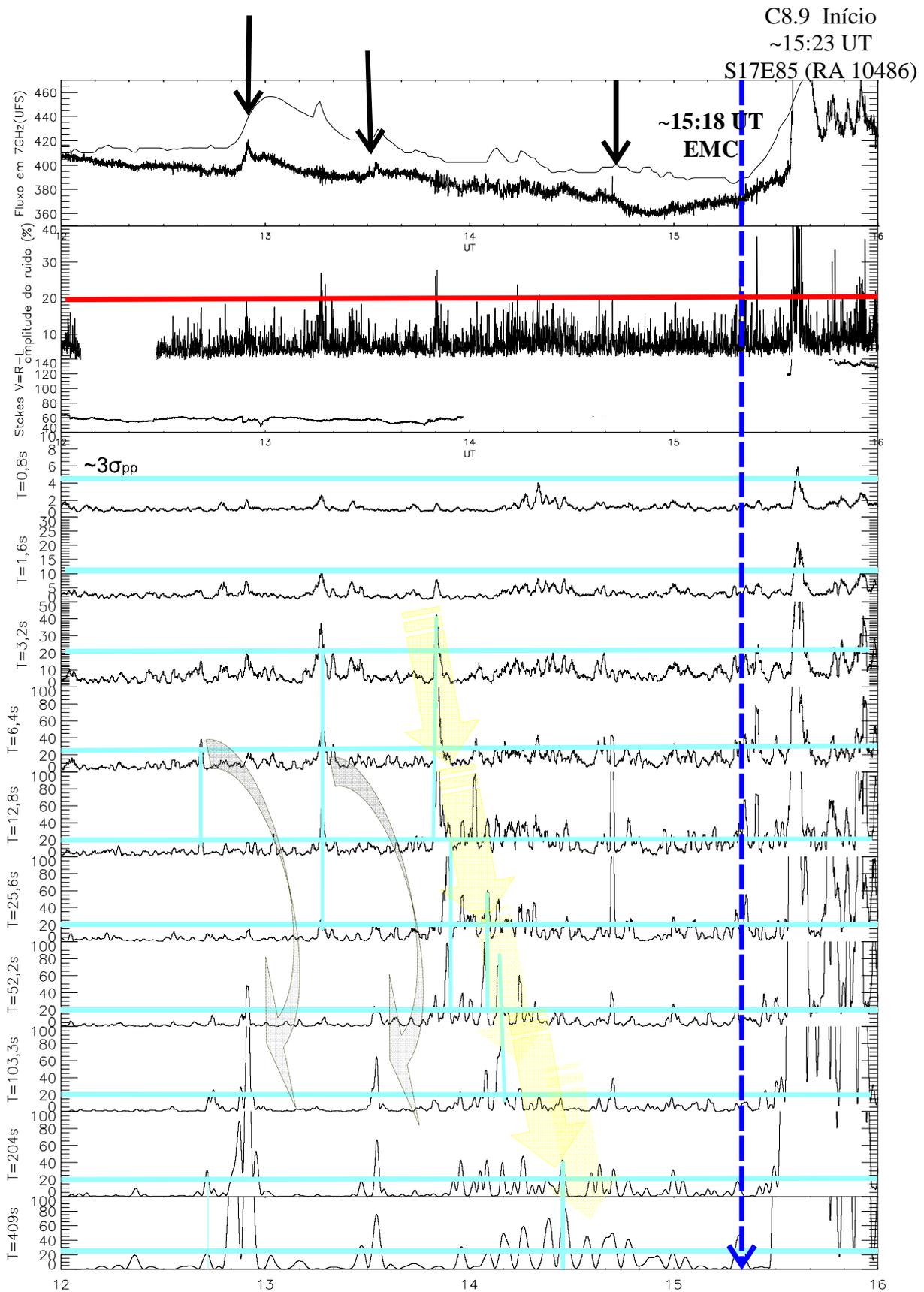


Figura 8.11.1 - Ampliação da figura 8.11. As barras horizontais azuis estabelecem o nível de significância ( $>3\sigma_{pp}$ ) para a potência das componentes de período do sinal. As barras verticais destacam as bcps nos trechos de maior interesse. As barras horizontais vermelhas em 'b' destacam os diferentes níveis da amplitude do ruído. As setas cinza e a região amarela destacam a evolução temporal das bcps e a seta azul tracejada identifica a estimativa de saída da EMC da atmosfera solar.

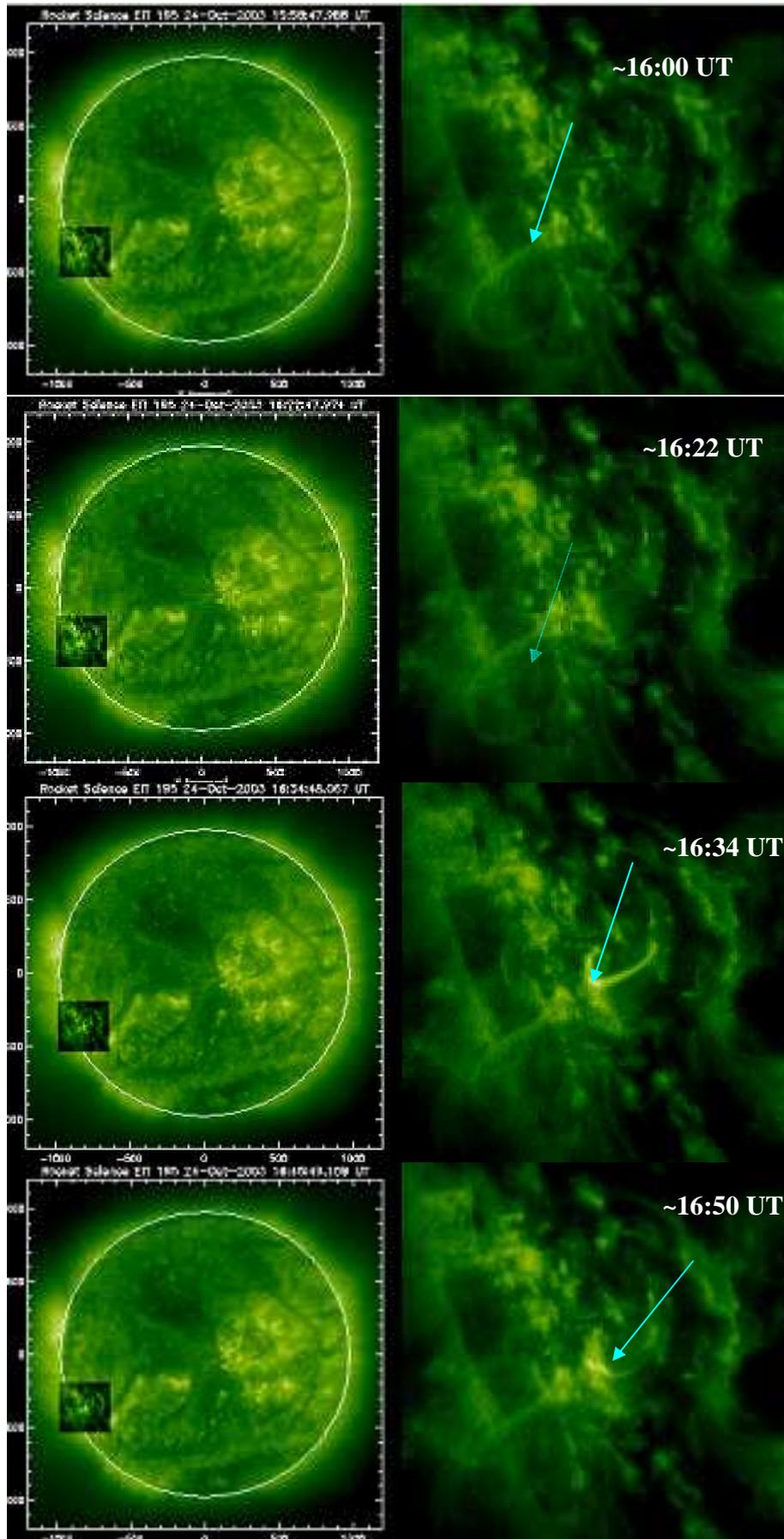


Figura 8.12 a- Imagens em Ultravioleta no período das ~16:00 UT às ~16:50 UT. As setas destacam os pontos de abrilhantamento sobre a RA10486.

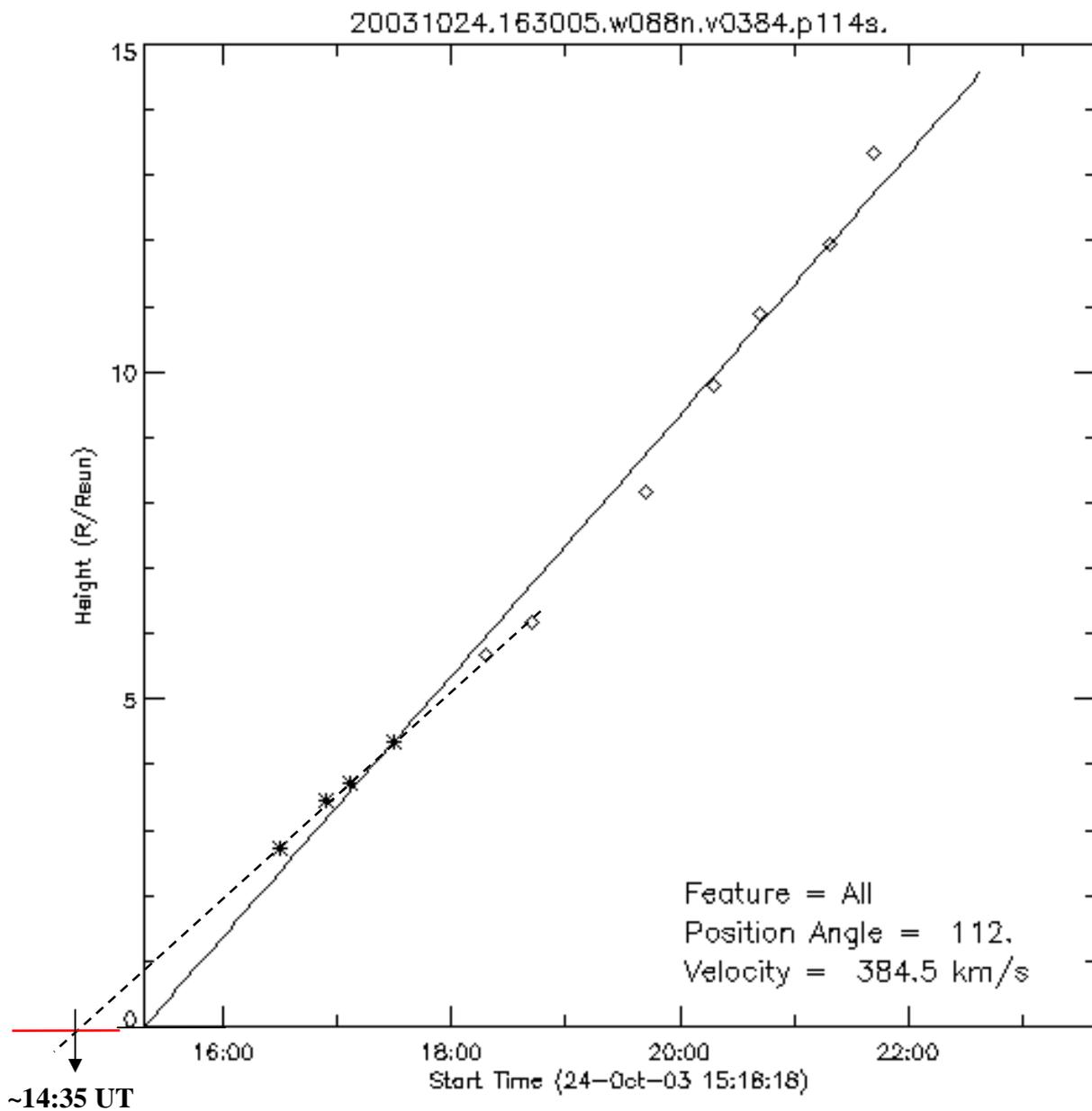


Fig 8.13- Estimativa do início da EMC na atmosfera solar feita pelo LASCO. A linha tracejada transversal é o ajuste onde consideramos apenas os 6 primeiros pontos, e a seta indica uma nova estimativa para o horário de saída da EMC da atmosfera solar.

24/10/2003	Potência Ondeleta das Componentes de período do sinal em 7GHz											Comp S(7 GHz)	3 GHz
	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409		
12:42UT	13-18	0	3	15	35	25	1	0	0	0	0		
13:17UT	15-25	2	6	35	45	50	20	0	0	0	0	Pico em raios X com $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$	
13:33UT	05_10	0	0	3	5	10	15	30	60	65	70		
13:50UT	15-25	1	5	40	120	120	15	40	15	0	6		
13:53UT	5_15	0	0	5	20	35	110	95	0	0	0		
14:06UT	5_15	0	0	4	5	35	50	95	50	40	20	início e pico em raios X com $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$	
14:09UT	5_15	0	0	5	30	35	55	75	80	40	45		
14:28UT	10_15	2	5	20	30	35	10	20	15	40	80		
<b>-15:18 UT início de um CME; ~15:23 UT início do evento C8.9 posição S17E55, RA10486 e ~15:00 UT início do evento em 7GHz</b>													

Tabela 8- Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

#### 8.4.1- Discussões

Durante as observações em 7 GHz, foram relatados e classificados pelo Goes os eventos em raios X, C9.0 às ~10:31 UT, sem posição determinada, e os eventos graduais C8.9 às ~15:23 UT e o M1.0 às 18:42 UT, ambos a RA 10486, todos com contrapartida em 7 GHz. A amplitude do ruído em 7 GHz foi  $\geq 20\%$  minutos antes do evento C9.0 das ~10:30 UT, e no trecho das 13:00 UT às 14:20 UT, antes do evento C8.9. A amplitude do ruído apresentou aumentos muito pronunciados ( $>80\%$ ), das 16:00 às ~17:00 UT, durante a fase gradual do evento das ~15:23 UT e do evento das ~18:42 UT. As componentes de período do sinal em 7 GHz na faixa de ~3,2s a ~409s apareceram quando a amplitude do ruído foi  $>20\%$ , e suas potências chegaram a  $\geq 100 \text{ ufs}^2$  quando a amplitude foi  $\geq 80\%$ .

Todos os trechos onde a amplitude do ruído foi  $>20\%$  foram relatados eventos na alta coroa. Veja por exemplo, os trechos das ~13:55 UT às ~14:20 UT, onde foram observados eventos na banda de 20 a 70 MHz, ou o trecho das ~16:10 UT às ~17:00 UT, onde foram observados regiões de abrlhantamento nas imagens obtidas em ultravioleta (fig 8.12).

Refazendo a estimativa do horário de saída da EMC da atmosfera solar, considerando-se apenas as 6 primeiras posições da EMC detectadas pelo LASCO, obtém-se uma nova estimativa para ~14:35 UT. Este novo horário está no intervalo em que foram observados aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído em 7 GHz, acompanhados pelo aparecimento das componentes de períodos mais longos do sinal na faixa de 25,6s a 409s com potências de 80 a 110  $\text{ufs}^2$ . Isto se deu um pouco antes de um evento tipo III na faixa de 25 a 180 MHz. Neste caso a EMC teve velocidade estimada em ~390 km/s.

### 8.5- Análise do dia 25 de outubro de 2003

Durante este dia ocorreram vários eventos em raios X com classificação Goes C e M. O fluxo em 3 GHz foi ~221 ufs e a componente S em 7 GHz foi ~435 ufs. No período de observações em 7 GHz ocorreu um evento M1.5 na RA 10484 com pico às ~10:35 UT, associado a um evento impulsivo em 7 GHz com ~530 ufs no pico (fig 8.16), e outros eventos do tipo C, que em alguns casos tiveram em contrapartida eventos pequenos em 7 GHz. Por exemplo, às ~11:24 UT ocorreu um evento pequeno (<10u ufs) em 7GHz associado a um C3.4 na RA 10486, às ~14:38 UT, associado a um C4.2 na RA 10486, ocorreu um evento pequeno e complexo em 7 GHz com ~20 ufs às ~14:40 UT. Além disto, ocorreram aumentos na amplitude do ruído do sinal em 7 GHz, que chegaram até ~60%, primeiro no período das ~13:20 UT às ~14:30 UT, que antecedeu o evento C4.2 das ~14:38 UT que teve contrapartida em 7 GHz, depois entre ~15:10 UT e ~15:50 UT na queda do evento em raios X (fig 8.16). Máximos de ~20% na amplitude do ruído também foram observados às ~16:50 UT e ~17:30 UT durante alguns eventos fracos em raios X, e no trecho das ~19:00 UT às ~19:20 UT, que antecedeu o evento C3.2 das ~19:25 UT.

O fluxo polarizado em 7 GHz permaneceu circularmente polarizado a direita e foi em média ~50 ufs até às ~14:00 UT, e depois, a partir das ~16:00 UT, passou para ~80 ufs.

A análise ondeletas do sinal em 7 GHz mostra que as componentes de período apareceram com potências significativas ( $>20 \text{ ufs}^2$ ) em toda faixa de 3,2s a 409s, nos trechos em que a amplitude do ruído em 7 GHz foi  $\geq 20\%$ , e apenas até às ~16:00 UT na faixa de 1,6s. Especialmente nos intervalos onde a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$  e/ou ocorreram eventos muito pequenos em 7 GHz (<10 ufs), e foram relatados eventos em ondas métricas, a potência das componentes de período do sinal na faixa de 3,2s a 103,3s

ou 52,2s a 409s chegou a ser até  $\geq 100 \text{ ufs}^2$ . Veja por exemplo, os trechos das ~11:28 UT (245 MHz), ~12:15 UT (410 MHz), ~12:35 UT (245 MHz), ~16:50 UT (245 MHz), 17:35 UT (245 MHz), indicados pelas regiões amarelas na figura 8.16.

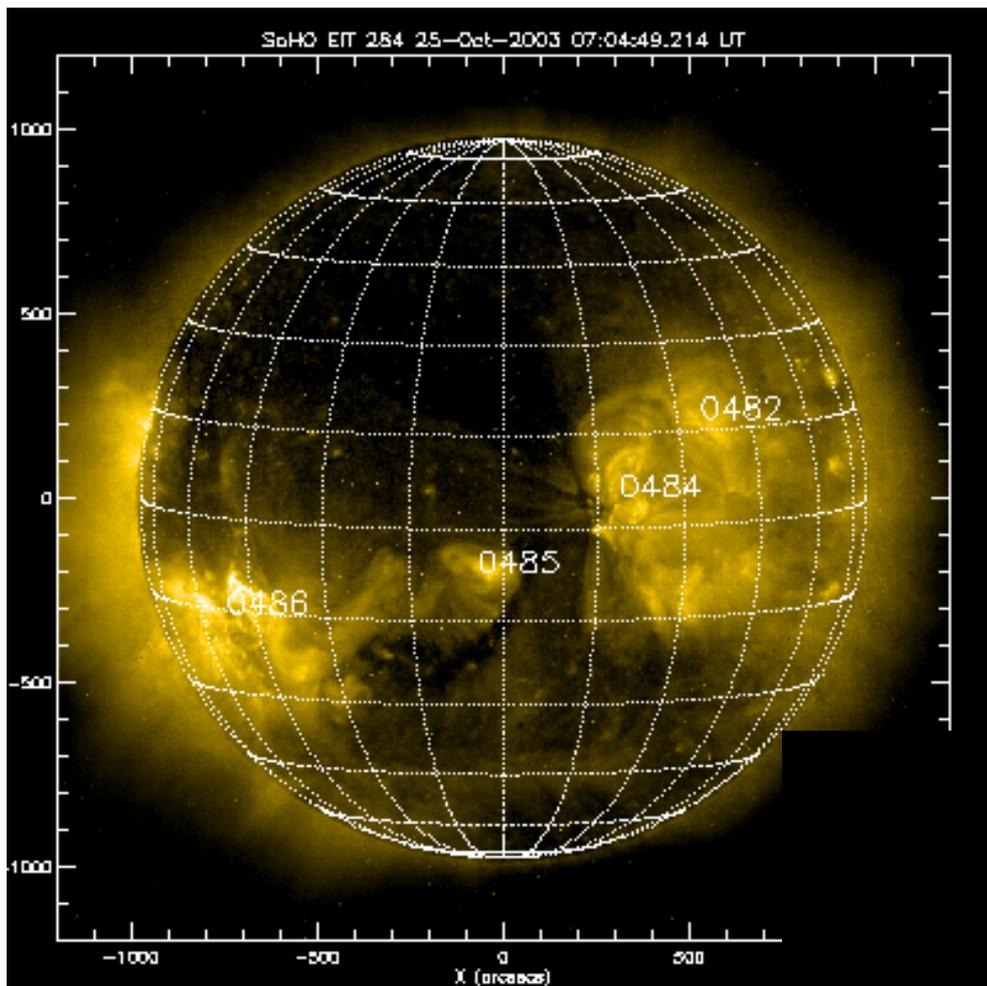


Figura 8.15- Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 25/10/03  
(fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031025\\_2012/gev\\_20031025\\_1031.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031025_2012/gev_20031025_1031.html))

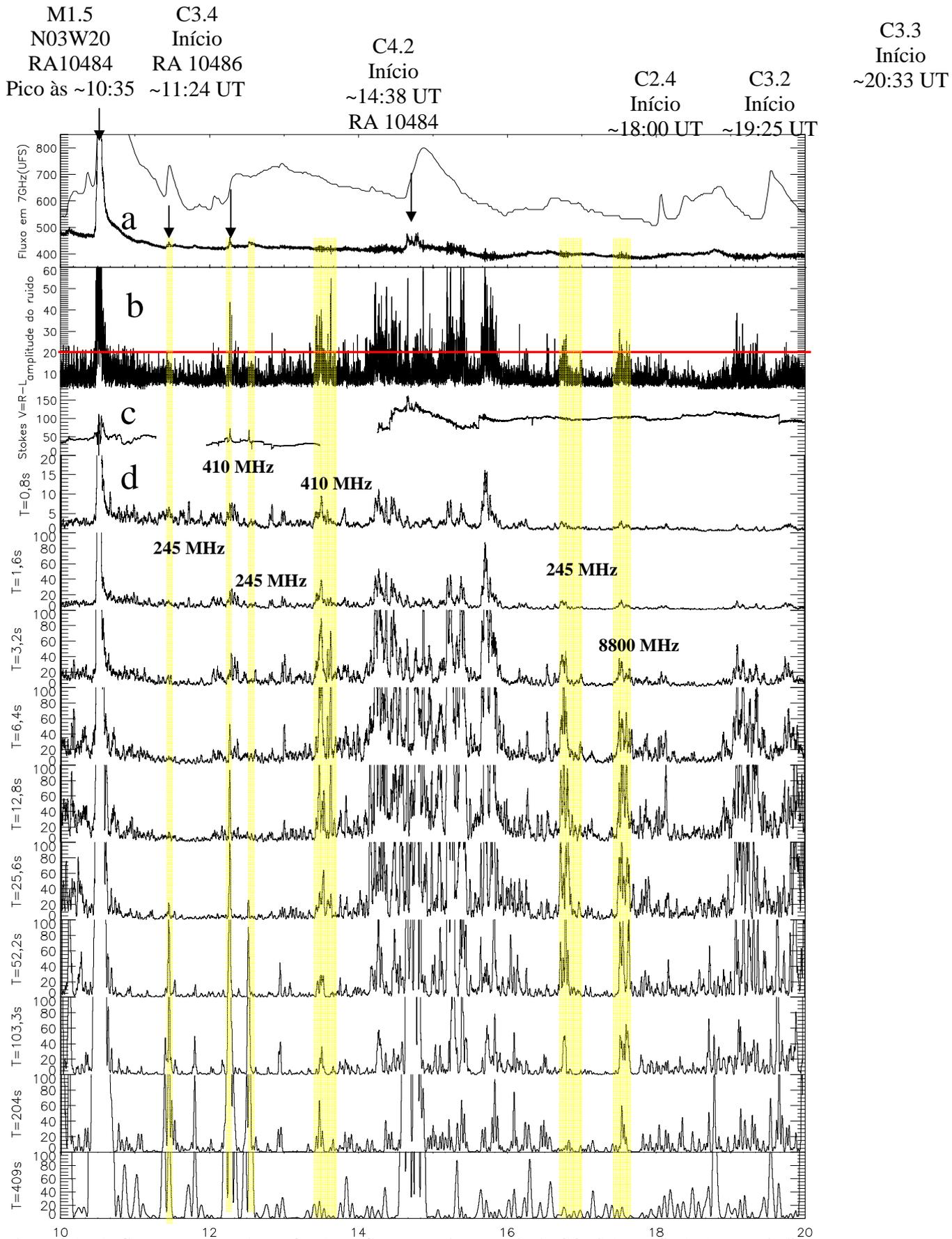


Figura 8.16 a) - fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em raios X mole do GOES (traço fino). As setas indicam os principais eventos solares da análise; b) - amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol. A reta horizontal vermelha destaca o limite de 20%; c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L). d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s). As barras verticais amarelas destacam alguns trechos onde foram observados eventos em ondas métricas. As frequências estão identificadas na figura.

## 8.6- Análise do dia 26 de outubro de 2003

### Aspectos gerais

Neste dia, o fluxo global do Sol em 3 GHz foi ~243 ufs, e o fluxo da componente S em 7 GHz foi ~405 ufs. O início das observações em 7 GHz se deu durante a queda de um evento X1.2, que teve início às ~6:55 UT na RA 10486 (fig 8.17) e terminou às ~17:00 UT. Durante este período, ocorreram outros eventos com menor intensidade em raios X, com contrapartida em 7 GHz (fig 8.18), e por volta de ~17:10 UT teve início o evento em raios X de intensidade X1.2 na RA 10484, que alcançou ~3800 ufs em 7GHz. Este evento teve uma EMC associada, cujo início na superfície do Sol foi estimado como sendo às ~17:33 UT.

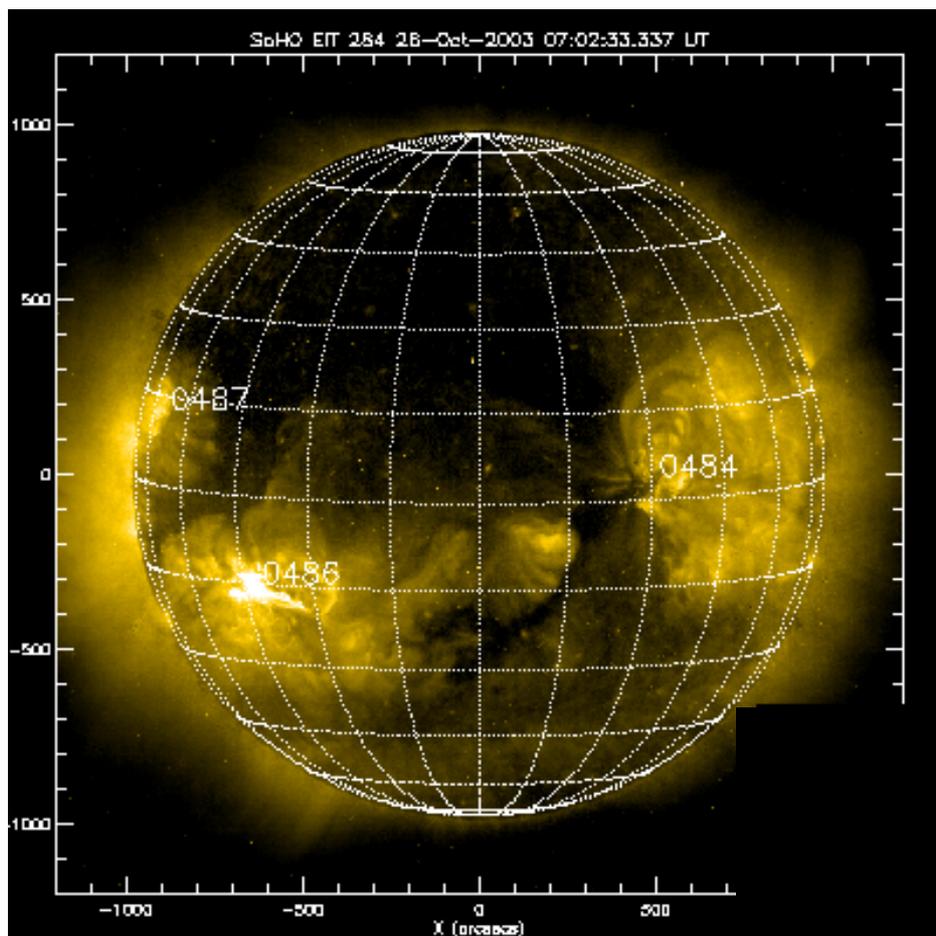


Figura 8.17- Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 26/10/03

(fonte: [www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031026\\_2012/gev\\_20031026\\_1031.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031026_2012/gev_20031026_1031.html))

Antes do evento M1.0 reportado na RA10484 às ~14:18 UT com ~120 ufs no pico em 7 GHz, a amplitude do ruído em 7 GHz foi maior  $\geq 20\%$  nos trechos das 10:00 UT às ~10:30 UT, das ~10:50 UT às ~11:50 UT, e das ~13:00 UT às ~14:00 UT (fig.8.18). No trecho das 10:00 UT às 11:30 UT, o fluxo polarizado em 7GHz foi praticamente nulo, mas devido a problemas instrumentais não foi possível observar as características do fluxo polarizado entre 11:30 UT e 14:00 UT. Depois do término do evento M1.0 às ~14:30 UT, o fluxo polarizado em 7 GHz permaneceu circularmente polarizado à direita.

No trecho das 11:00 UT às 14:00 UT, que antecede o evento M1.0 (fig. 8.18.1), tem-se a ocorrência de vários eventos fracos em raios X, que tiveram contrapartida em 7 GHz (eventos com fluxo no pico  $< 50$  ufs). Mas foi especialmente, no trecho das ~13:00 UT às ~14:00 UT, que em contrapartida aos eventos fracos em raios X, os aumentos na amplitude do ruído foram mais pronunciados chegando a máximos  $> 30\%$ , e ocorreram alguns eventos bem pequenos em 7 GHz com fluxos no pico de  $\leq 30$  ufs. A decomposição ondeletas mostra o aparecimento de componentes de período com potências significativas, na faixa de ~0,8s a 12,8s das às ~13:00 UT às ~13:40 UT, quando a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$  e com potências de 40 a 80 e pico na faixa de 3,2s, associado aos aumentos de  $\geq 30\%$  na amplitude do ruído.

↓  
 X1.2  
 S15E44  
 RA10486  
 Pico às ~6:55 UT

M1.0  
 N05W33  
 RA10484  
 ~14:18 UT

Evento não classificado  
 S18E29  
 RA10486  
 ~16:18 UT

↓  
 X1.2  
 N02W38,  
 RA10484,  
 Pico às ~18:10 UT

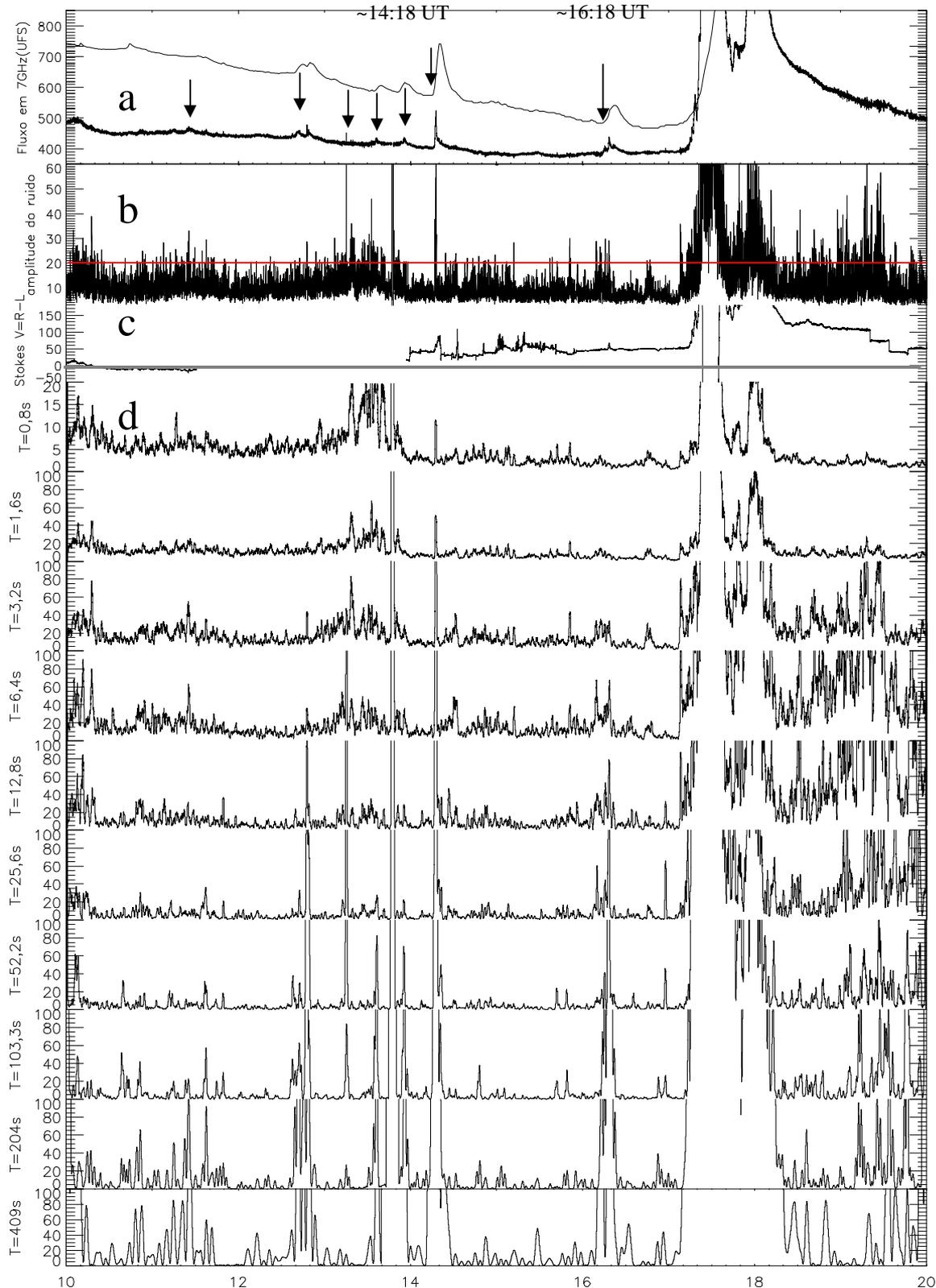
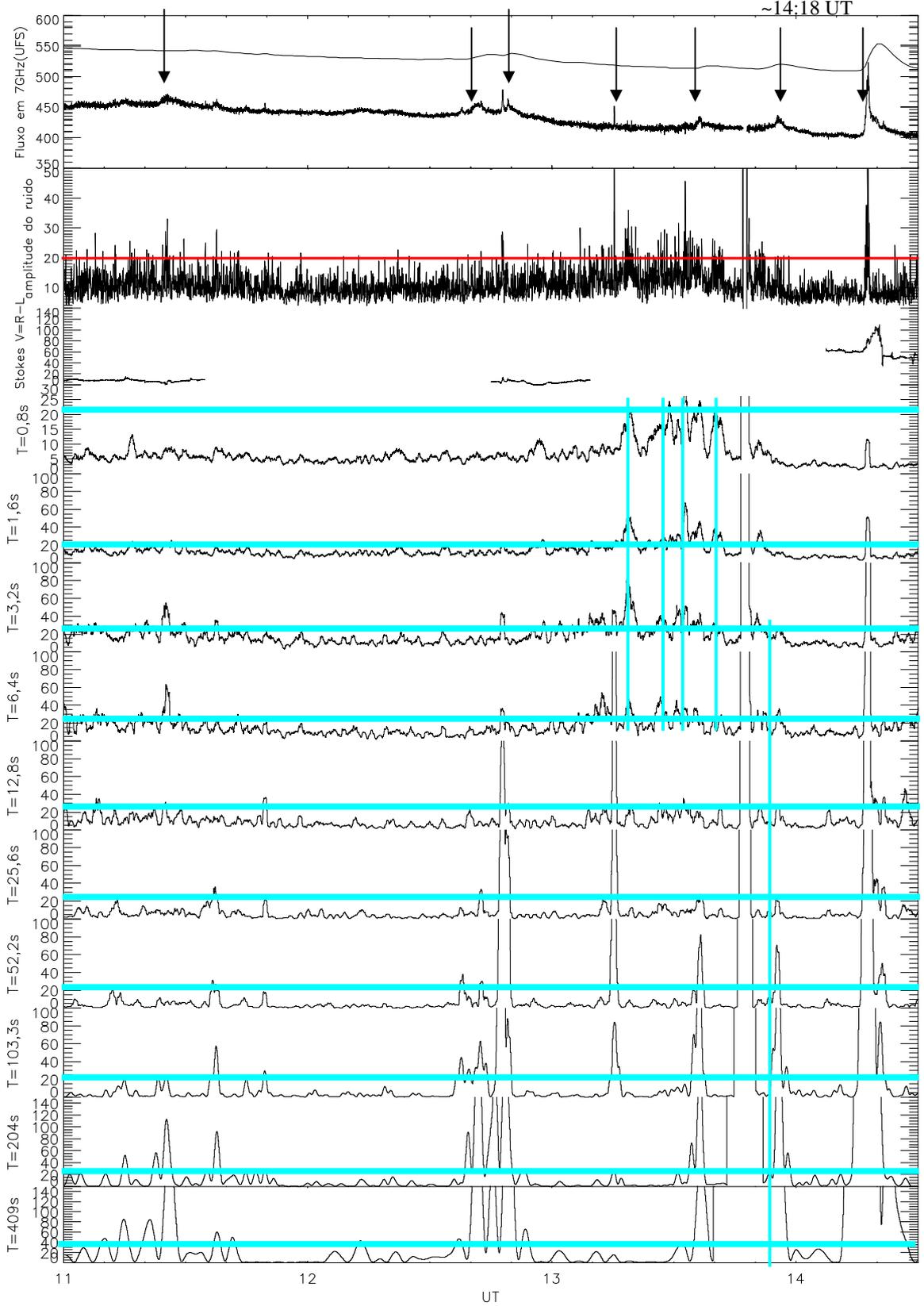


Figura 8.18 a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo  $\phi^T$  em raios X mole do GOES (traço fino). As setas indicam os principais eventos solares da análise; b)- amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol. A reta horizontal vermelha destaca o limite de 20%; c) fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L). d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s).

M1.0  
N05W33  
RA10484  
~14:18 UT



A figura 8.18.2 mostra o trecho das ~14:30 UT às ~17:30 UT, que antecedeu o evento X1.2. Neste trecho tem-se que a amplitude do ruído em 7 GHz foi  $\geq 20\%$  das ~14:40 UT às ~15:10 UT, das 15:35 UT às ~15:50 UT, das ~16:45 UT às ~16:50 UT, e também nos trechos das ~16:05 UT às ~16:12 UT, antes do evento fraco das ~16:15 UT, e às ~17:10 UT praticamente no início do evento X1.2.

Nos trechos em que a amplitude do ruído 7 GHz foi  $\geq 20\%$ , a análise ondeleta do sinal em 7 GHz mostra o aparecimento das componentes de período do sinal em praticamente toda faixa analisada de ~1,6s a 409s . No entanto, nos períodos que antecedem os eventos das ~16:15 UT e ~17:10 UT, as componentes de período aparecem com potências mais significativas principalmente na faixa de ~3,2s a ~25,6s. Sendo que as maiores potências foram de 25 a 45 com pico na faixa dos 6,4s, minutos antes do evento das ~16:15 UT que teve  $\sim 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ , e foram de 40 a 110  $\text{ufs}^2$  com pico também em 6,4s às ~17:10 UT, quase no início do evento X1.2. Entretanto, no trecho das ~17:10 UT a potência das componentes de período  $> 103\text{s}$  foi  $\gg 100 \text{ ufs}^2$  (vide tabela 9).

Às ~17:33 UT foi estimado pelo LASCO o início para uma EMC na superfície solar (fig 8.19). Entretanto, uma segunda estimativa feita aqui considerando-se os 4 primeiros pontos da figura 8.19, identifica o início da EMC às ~17:10 U, quando se tem um pico na amplitude do ruído associado às maiores potências das componentes de período do sinal de todo o dia.

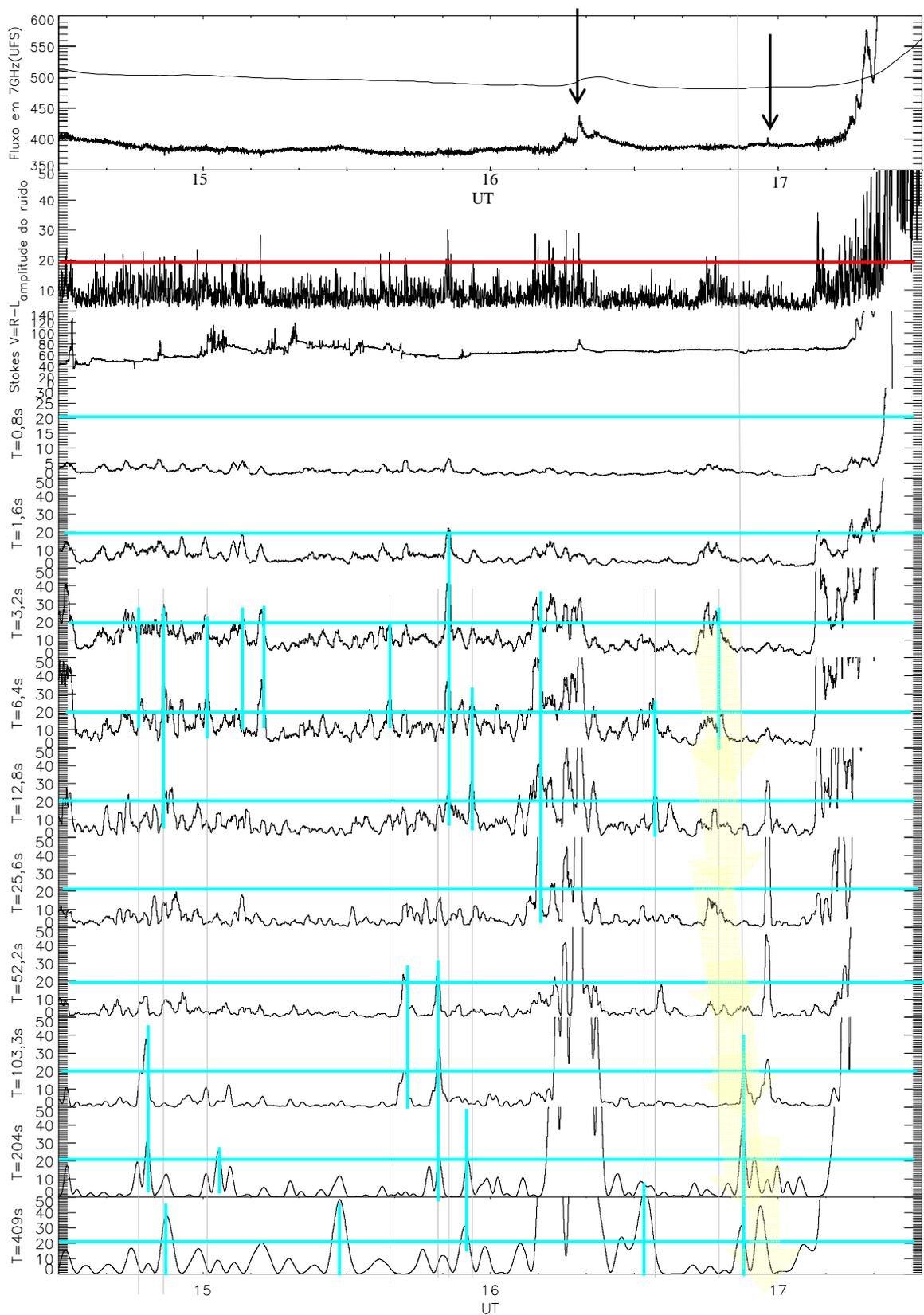


Figura 8.18.2 - Ampliação da figura 8.18. As barras horizontais azuis estabelecem o nível de significância ( $>3\sigma_{pp}$ ) para a potência das componentes de período do sinal. As barras verticais destacam as bcps nos trechos de maior interesse. A curva azul escuro destaca a dinâmica temporal da potência das componentes de período do sinal até o evento X1.2.

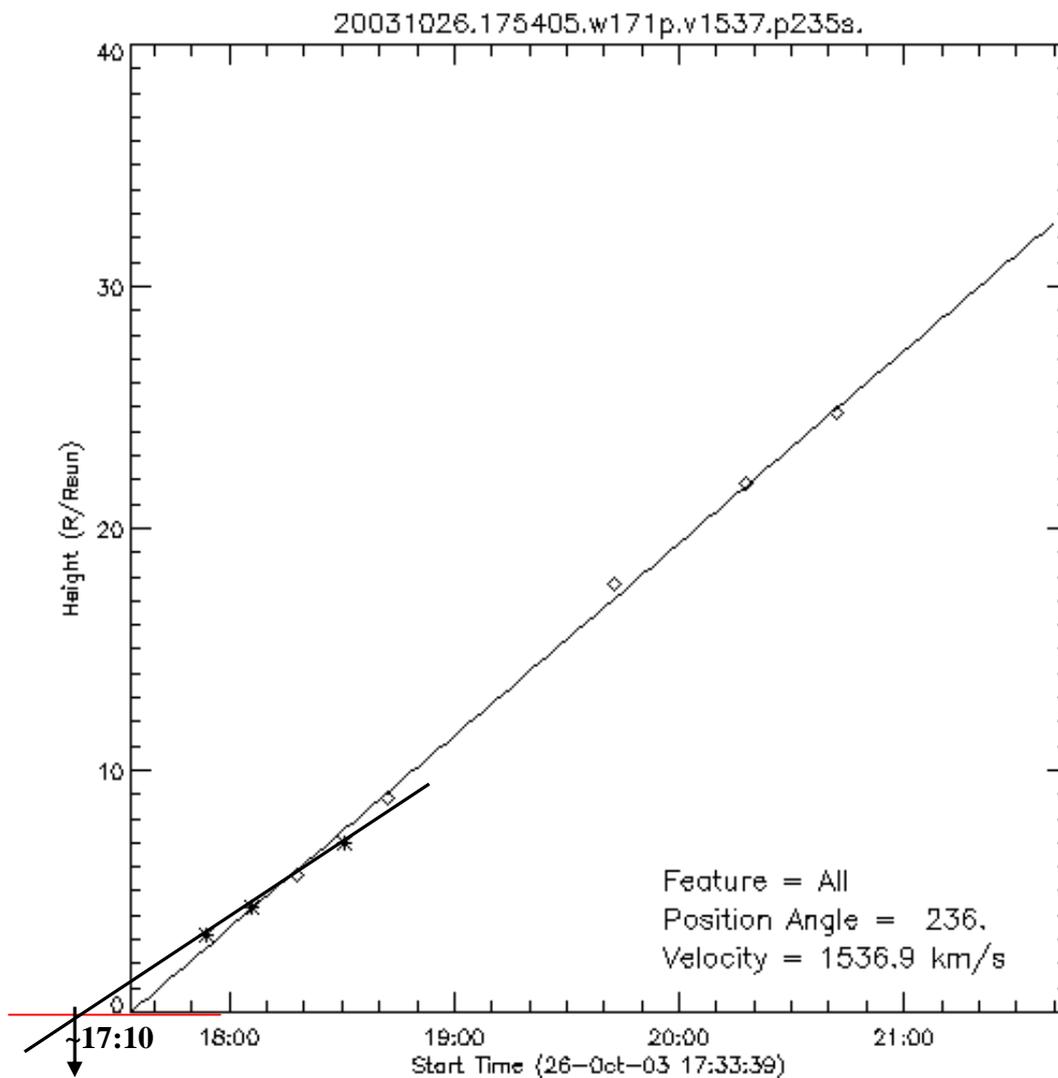


Fig 8.19- Estimativa do início da EMC na atmosfera solar feita pelo LASCO. A linha tracejada transversal é o ajuste onde consideramos apenas os 4 primeiros pontos, e a seta indica uma nova estimativa para o horário de saída da EMC da atmosfera solar.

	Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz											Comp S( 7 GHz)	3 GHz	
26/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409		405	243
11:05UT	15	8	20	30	20	10	5	1	1	1	5			
11:11UT	15	5	10	10	10	20	20	20	15	5	20			
11:25UT	17_33	7	25	55	60	30	5	10	20	55	80		Pico em raios X com 8,5 10 <sup>-6</sup> W/m <sup>2</sup>	
11:38UT	17_29	7	20	35	25	15	35	25	60	50	60			
11:40 UT início do evento em raios X com 7,5 10 <sup>-6</sup> W/m <sup>2</sup> às 11:45 UT														
13:20UT	28_35	25	50	80	40	40	5	10	5	0	0			
13:32UT	25_45	30	60	50	20	35	10	5	10	20	40			
13:40UT	20_25	10	15	20	10	20	25	80	130	120	100			
14:09UT	15	5	10	10	5	5	5	1	5	20	20			
~14:15 UT início do evento em raios X M1.0 N04W31, RA10484 e ~14:18 UT início em 7GHz (~120 ufs no pico)														
14:32UT	10_25	5	15	40	45	25	10	10	10	18	15			
14:40UT	15-20	5	10	15	15	5	5	3	2	1	5			
14:48UT	10_20	4	10	15	18	13	8	10	38	30	5			
15:00 UT	10_20	5	12	17	30	10	5	5	10	10	10			
15:12UT	10_23	3	13	25	35	10	8	5	5	0	20			
15:50UT	10	1	5	5	10	20	20	25	33	20	10			
15:51UT	20_23	5	20	40	40	70	10	5	5	0	5			
15:58UT	10_23	1	10	15	30	35	15	5	5	20	30			
~16:15 UT evento em raios X com 3,1 10 <sup>-6</sup> W/m <sup>2</sup> no pico e 40 ufs em 7 GHz														
16:48UT	15_20	9	12	30	15	5	15	5	1	5	0			
16:52UT	10	0	5	5	5	5	5	3	23	40	30			
17:10 UT	20-40	5	20	80	100	70	20	5	10	>>100	>>100			
~17:21UT início do evento em raios X X1.2 N04W31, RA10484 e ~17:10 UT pico do ruído e 2ª estimativa para saída da EMC														

Tabela 9 - Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

### 8.6.1- Discussões

Neste dia foram relatados eventos em raios X classificação X e M nos dois hemisférios solares, sendo que no período de observações em 7 GHz, ocorreram vários eventos pequenos durante a queda do evento em raios-X X1.2 com pico às ~6:55 UT na RA 10486 posição S15E44, que terminou às ~17:00 UT quase no início do evento X1.2 na RA 10484 posição N02W38. A amplitude média do ruído em 7 GHz chegou a  $\geq 30\%$  no trecho das ~13:00 UT às ~14:00 UT, que antecedeu o evento em raios X M1.0 das ~14:18 UT na RA 10484 posição N05W33, e nos trechos das ~15:10 UT às ~15:50 UT e das ~16:00 UT às ~16:18 UT, que antecedeu o evento fraco das ~16:18 UT observado na RA 10486 posição S18E29. Depois voltaram a aparecer aumentos de até  $\geq 20\%$  entre às ~16:40 UT e ~16:50 UT, e às ~17:10 UT, justamente no início do evento X1.2 observado na RA 10484.

As componentes de períodos da componente *S* apareceram nos trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$ , sendo na faixa entre 0,8s e 25,6s com potências de 50 a 80 ufs<sup>2</sup> com máximo na faixa de 3,2s, nos trechos antes do evento M1.0, mas cobrindo praticamente toda faixa de 1,6s a 209s, com potências mais significativas na faixa de 3,2s a 6,4s, dentro de um intervalo de ~2 horas, e com potências muito mais significativas ( $\gg 100$  ufs<sup>2</sup>) na faixa  $>103$ s bem próximo de uma das estimativas horário de início às ~17:10 UT da EMC e do início em raios X do evento X1.2.

Neste dia, os vários eventos pequenos ( $<15$  ufs) em 7 GHz foram observados nos trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$  e, em boa parte dos casos, foram associados a eventos na alta coroa. Exemplo, até ~12:00 UT em várias faixas  $>0,2$  MHz, às ~13:15 UT, às ~13:36 UT e às ~17:00 UT associado a eventos tipo III, e entre ~15:40 UT e ~16:00 UT na faixa de 245 MHz. No trecho das 16:40 UT às ~17:50 UT não foram relatados

eventos na alta coroa, mas às ~17:10 UT foi estimado o início de uma EMC na superfície solar.

## 8.7- Análise do dia 27 de outubro de 2003

Neste dia o fluxo global em 3 GHz foi ~ 257 ufs e em 7 GHz foi ~435 ufs. Os eventos solares detectados pelo GOES durante o período de observações em 7 GHz ocorreram em três regiões ativas complexas (10484, 10486 e 10488, figura 8.20), e foram classificados como C ou M, sendo que os dois mais intensos, um M6.7 observado às ~12:20 UT na RA 10486 e um C9.0 observado às ~19:50 UT na RA 10484, tiveram contrapartida em 7 GHz e EMCs associadas.

No decorrer das observações em 7 GHz ocorreram vários outros eventos em raios X de menor intensidade, dois classificados e outros não pelo GOES, mas que tiveram contrapartida em 7 GHz (marcados com setas na figura 8.21), às 14:00 UT, às 16:00 UT, às 17:30 UT e às 18:30 UT, aproximadamente. Os eventos em 7 GHz apresentaram fluxo circularmente polarizado à esquerda.

O evento das ~12:30 UT ocorreu durante um período em que o canal R do receptor estava com problemas, portanto não temos a informação do fluxo polarizado durante o mesmo.

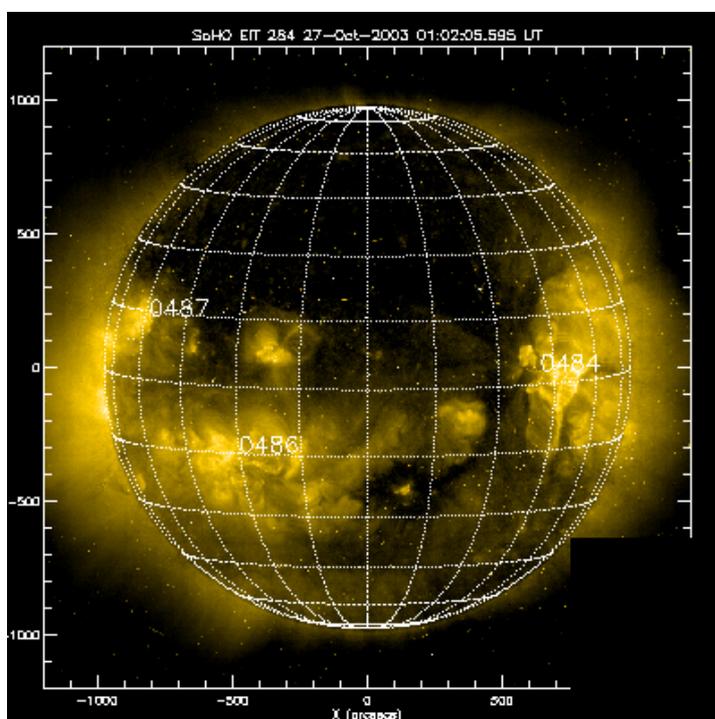


Figura 8.20- Imagem em ultravioleta obtida pelo satélite SOHO no dia 27/10/03. A RA10488 estava começando a aparecer no limbo leste neste dia, e por isto ainda não pode ser observada nesta figura.

(fonte:

[www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events\\_20031027\\_2012/gev\\_20031027\\_1021.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events_20031027_2012/gev_20031027_1021.html))

A amplitude do ruído do sinal em 7 GHz foi  $\geq 20\%$  nos trechos de 10:00 UT às ~11:30 UT, cerca de ~13:30 UT e ~15:00 UT, e depois das ~17:00 UT até 20:00 UT, no final das observações em 7 GHz. O primeiro trecho antecedeu a ocorrência de uma EMC que teve início estimado na superfície do Sol às 12:12 UT, e o evento M6.7 que teve contrapartida em 7 GHz, com fluxo no pico de 350 ufs, e que teve início às ~12:27 UT. Os trechos curtos antecederam eventos fracos em raios X associados a eventos também fracos em 7 GHz ( $\leq 50$  ufs), que começaram por volta de ~14:00 UT e ~16:00 UT, respectivamente. Após as 17 UT ocorreram os eventos em raios X C7.5 e C9.0, com início as ~18:30 e ~19:48 UT, e que tiveram contrapartida fraca em 7 GHz ( $< 30$  ufs). Vale lembrar aqui que, no dia 28/10 às 10:00 UT ocorreu o grande evento  $> X17$ , o maior do período do ciclo 23, mas como foi no início das observações em 7 GHz, não se tem informações da emissão em 7 GHz antes deste evento.

O fluxo polarizado em 7 GHz apresentou um aumento gradual na componente circularmente polarizada a esquerda no decorrer do dia.

A análise ondeletas mostra que durante os trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$  apareceram componentes de períodos com potência acima de 20 na faixa de 3,2 a 409 s. E chegando a cerca de 100 na faixa de 52,2 a 409s nos trechos que antecederam os maiores eventos em raios X (M6.7 das 12:30 UT e os  $> C7.0$  depois das 17 UT).

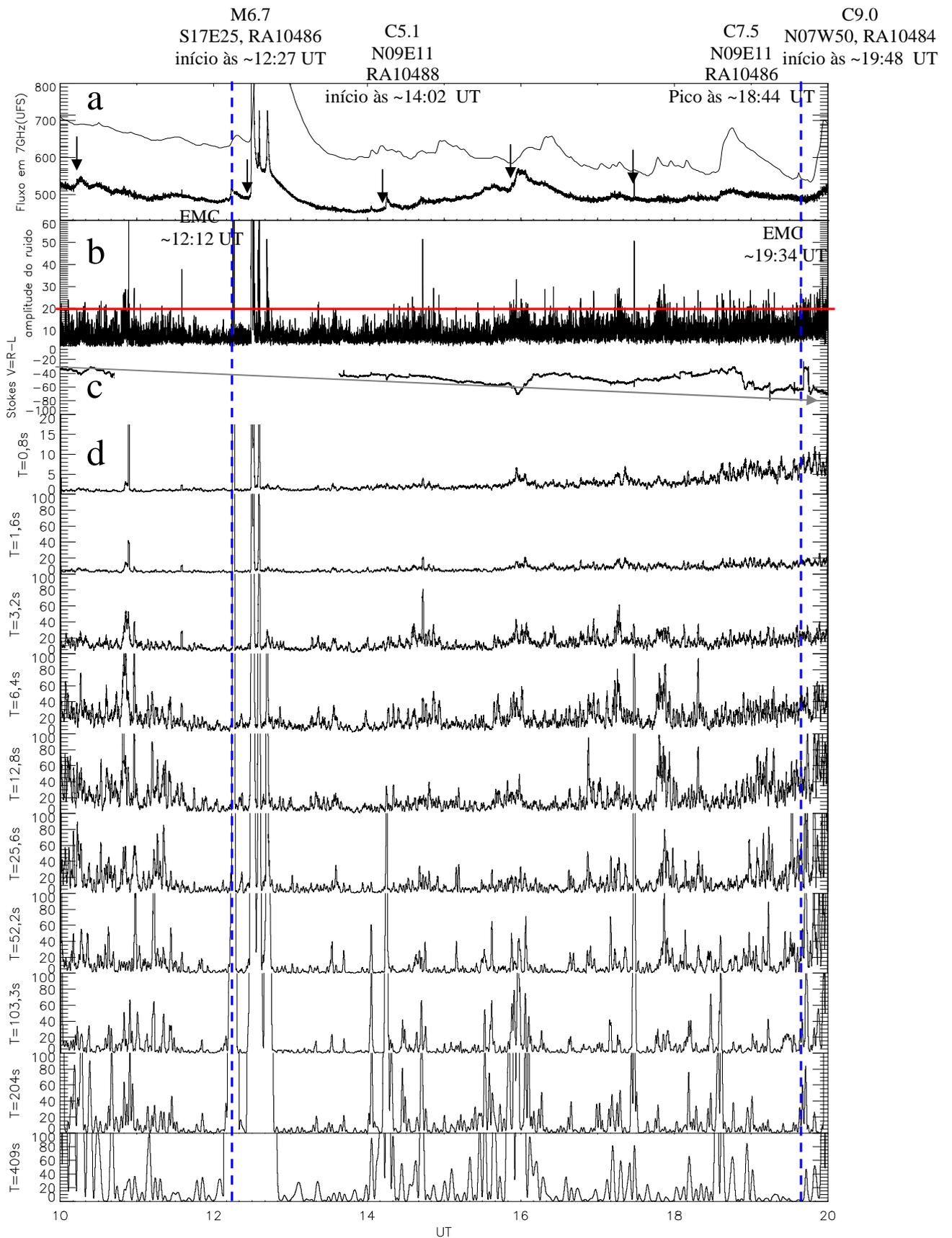


Figura 8.21 a)- fluxo em 7 GHz (traço forte) e o fluxo em raios X mole do GOES (traço fino). As setas indicam os principais eventos solares da análise; b)- amplitude percentual do ruído do sinal em 7GHz calculada para cada 5 segundos e normalizada com relação a diferença dos níveis Céu-Sol. A reta horizontal vermelha destaca o limite de 20%; c)fluxo polarizado, parâmetro de Stokes V (R-L). d) Potência ondeleta das componentes de período do sinal (0,4s- 0,8s-1,6s-3,2s-6,4s-12,8s-25,6s-52,2s-103,3s-204s-409s).

A análise detalhada do trecho das 10:00 UT às ~13:00 UT, que inclui o evento M6.7 (fig 8.21.1) que teve início às ~12:30 UT, mostra que a amplitude do ruído entre às ~10:45 UT e ~10:55 UT, permaneceu >20%. Neste trecho tem-se o aparecimento de componentes de período em quase toda a faixa, de 0,8 a 204 s, mas sendo mais significativa para períodos maiores que 6,4 s. Por outro lado, a amplitude do ruído ficou ~20% das 10:00 as ~11:30 UT, quando apareceram componentes de período na faixa de ~12,8s a 409s (tabela 10), sendo que em alguns dos trechos onde as componentes de período mais longas (>25,6s) tiveram potência >100 ufs<sup>2</sup>, foram relatados eventos tipo III em diferentes faixas, conforme mostra a figura 8.21.1. Às ~12:12 UT, foi estimado o início de uma EMC (fig 8.22) na atmosfera solar e às ~12:27 UT teve início o evento em raios X M6.7.

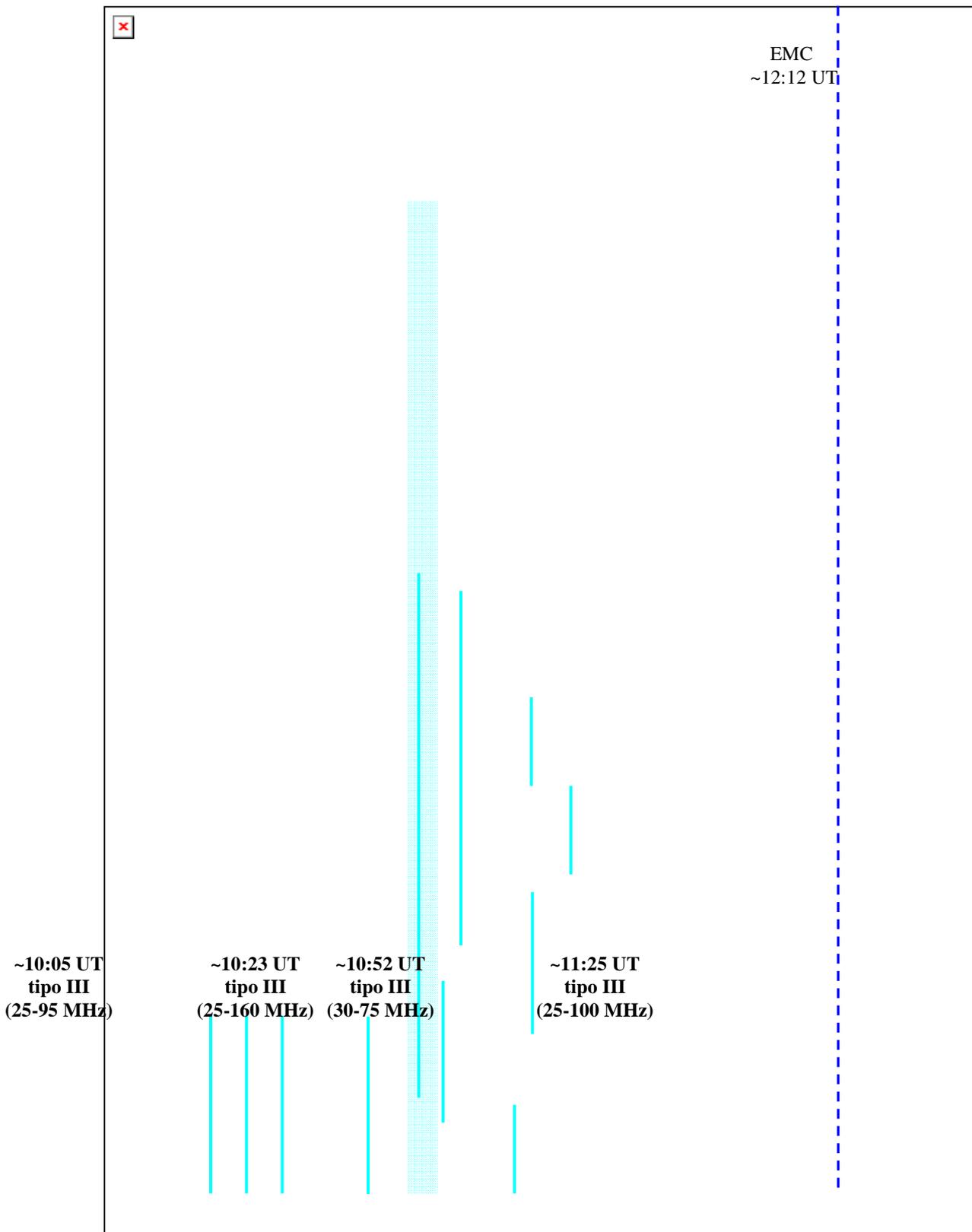


Figura 8.21.1 - Ampliação da figura 8.21. As barras horizontais azuis estabelecem o nível de significância ( $>3\sigma_{pp}$ ) para a potência das componentes de período do sinal. As barras verticais destacam as bcps nos trechos de maior interesse. A barra vertical tracejada e azul identifica o início estimado para saída da EMC da atmosfera solar.

A figura 8.21.2 mostra com mais detalhes o trecho das 13:00 UT às 20:00 UT. Neste trecho ocorreram três eventos em raios classificados como C segundo o GOES, que tiveram contrapartida em 7 GHz, e outros menores que não foram classificados, sendo alguns acompanhados por pequenos eventos em 7 GHz (16:00 UT e 18:30 UT) ou apenas por um aumento na amplitude do ruído (17:00 e 18:00 UT). A análise ondeleta mostra o aparecimento de componentes de período no sinal com potências significativas na faixa  $>3,2s$  durante todos os trechos em que a amplitude do ruído foi  $\geq 20\%$ , e atingindo potências de quase 100 depois das 17:00 UT.

A análise mais detalhada feita com os valores da tabela 8.8 mostra de maneira geral que, em todo trecho das ~13:00 UT às 20:00 UT, as componentes de período do sinal apareceram próximo do início dos eventos principalmente na faixa de **12,8s** ou **103s** e logo depois, durante os eventos em raios X, na faixa de **52,2s** ou **409s**. Nestes trechos, as maiores potências das componentes de período do sinal foram de 80 a 140 e alcançaram os picos ~19:40 UT. Às ~19:34 UT foi relatado o início de uma EMC na atmosfera solar com velocidade estimada de ~990 km/s. E as 10 UT do dia seguinte, teve início o evento em raios X  $>X17$  na RA10486. Este evento saturou os receptores do telescópio em 7 GHz e se estendeu durante praticamente todo o dia de observações.

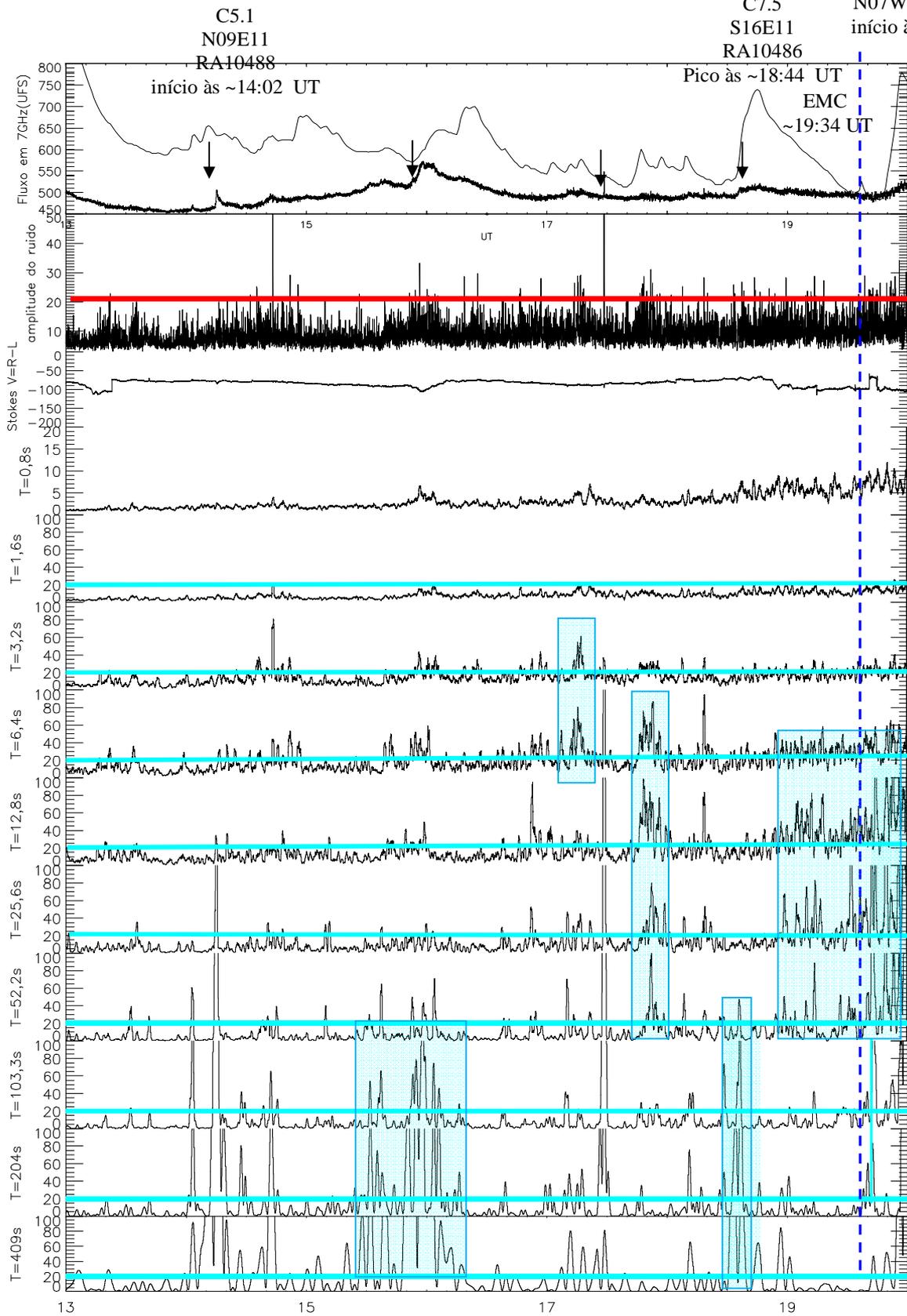


Figura 8.21.2 - Ampliação da figura 8.21. As  $T$  barras horizontais azuis estabelecem o nível de significância ( $>3\sigma_{pp}$ ) para a potência das componentes de período do sinal. As barras verticais destacam as bcps nos trechos de maior interesse. A barra vertical tracejada e azul identifica o início estimado para saída da EMC da atmosfera solar.

Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz													
27/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S (7 GHz)	3 GHz
10:30UT	10_20	0	5	10	20	65	60	20	0	15	45	410	257
11:10UT	5_10	1	5	5	55	90	55	120	60	35	35		
11:50UT	5	1	5	5	10	20	1	20	18	20	35		
~12:27UT início do evento em raios X M6.7 posição S17E25, RA10486 e ~12:28 UT início em 7GHz com 350 ufs no pico.													
15:11UT	10	1	0	5	10	20	30	40	10	15	0		
15:39UT	10_15	1	0	5	10	5	10	36	55	110	120		
15:40UT início de um evento com $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ no pico e ~14:50 UT início de um evento com 50 ufs em 7GHz e $6 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ no pico em raios X													
17:50UT	15_20	3	0	20	85	80	80	100	23	5	0		
18:30UT	10_20	5	0	10	35	10	10	44	105	130	140		
18:31UT início do evento em raios X C7.5 com $7,8 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ no pico e sem excesso sgnificativo em 7 GHz													
19:11UT	15-20	5	5	20	40	80	80	90	40	40	5		
19:40UT	20	10	5	20	55	110	120	120	120	80	40		
19:51UT início do evento em raios X C7.6 com $9 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ no pico e sem excesso sgnificativo em 7GHz													

Tabela 10- Em cinza estão os instantes em que foram observados eventos em raios X. Em azul estão as 4 componentes de períodos com as maiores potências daquele instante, e em vermelho a maior potência das 4.

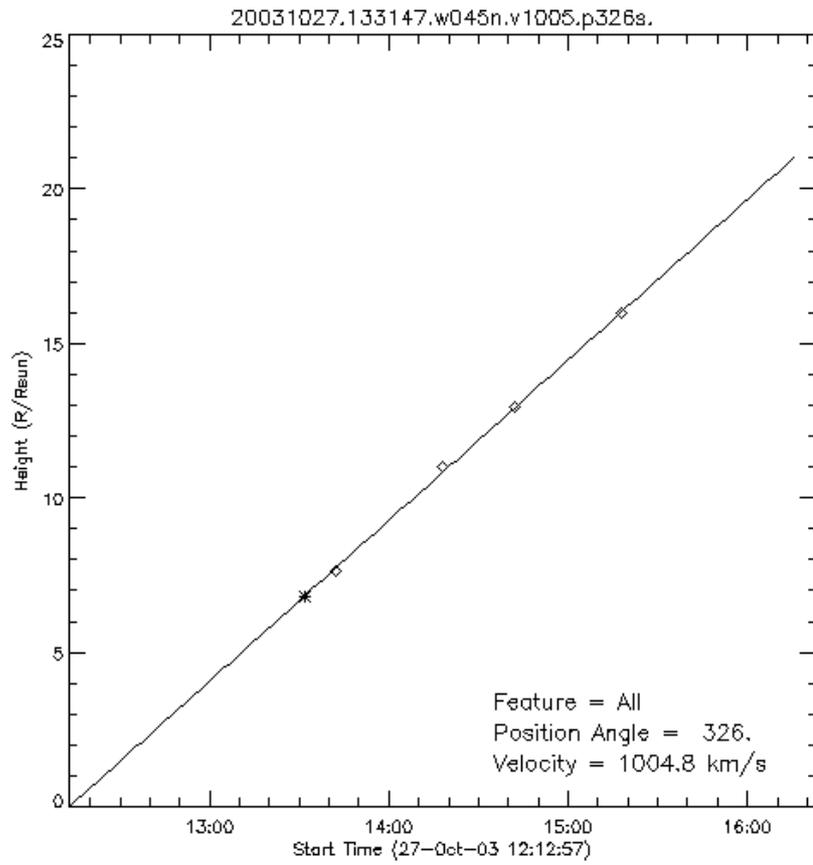


Fig 8.22- Estimativa do início da EMC na atmosfera solar feita pelo LASC0.

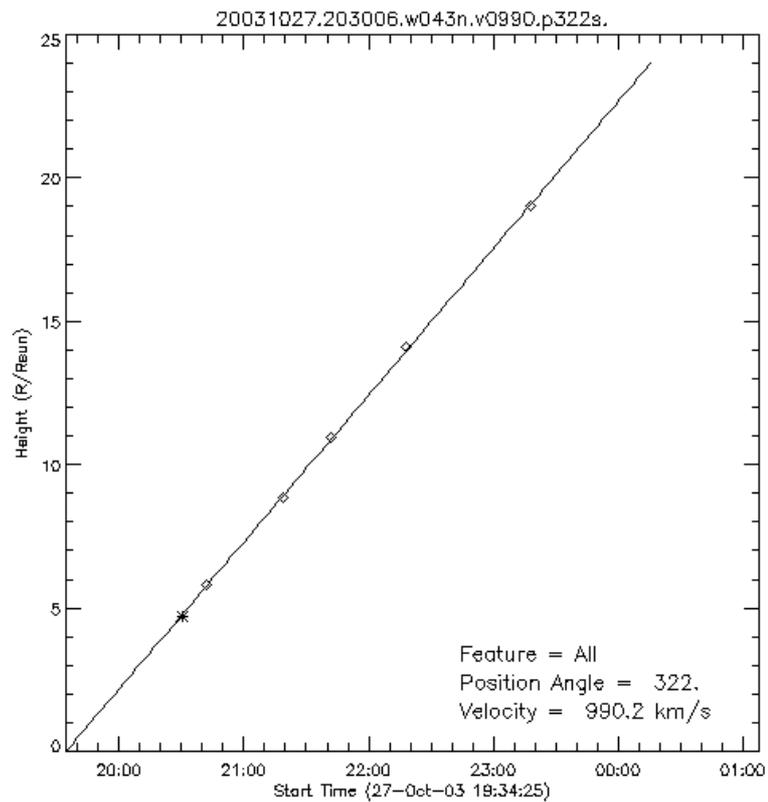


Fig 8.23- Estimativa do início da EMC na atmosfera solar feita pelo NOAA 142

## Capítulo 9

### Discussões gerais

Foi feita a análise da componente  $S$  em 7 GHz no dia 06/10/03, onde a atividade solar foi baixa, quase quiescente, e os eventos em raios X mais fortes, do período de observações em 7 GHz, alcançaram a classificação B do Goes, que foi utilizado como referência de análise para o período de alta atividade solar de 22/10/03 a 27/10/03, antes de intensas explosões solares, que tiveram ou não ejeções de massa coronal associadas. Este período, de crescente atividade solar, antecedeu um dos maiores eventos em raios X ocorridos no último ciclo solar, que teve início às ~9:35 UT do dia 28/10/03 na região ativa 10486 e teve associado a EMC mais geofetiva do período. Este evento saturou os receptores do Goes, mas através de uma extrapolação do fluxo em raios X foi classificado como X17.

A figura 9.1 mostra que, a componente  $S$  em 7 GHz e 3 GHz cresceu associada a passagem das RAs complexas 10484, 10486, 10488 pelo disco solar, e que foram responsáveis pela alta atividade do período. O fluxo polarizado (parâmetro de Stokes  $V=R-L$ ) em 7 GHz apresentou variações associadas as alterações do fluxo magnético das regiões ativas. O fluxo polarizado à direita (curva vermelha) cresceu até o dia 25/10/03 e predominou sobre o fluxo polarizado à esquerda (curva azul) do dia 24/10/03 ao dia 26/10/03, acompanhando as alterações do fluxo magnético da RA10484 (Fig.9.2). No dia 27/10/03 o fluxo polarizado à esquerda se tornou o predominante, justo quando a RA10484 começou a decair e a RA10486 começou a se tornar a mais importante. Este

comportamento sugere que apesar do rádio polarímetro estar observando todo o disco solar, as variações observadas no fluxo rádio refletem as variações da componente S.

A análise detalhada do fluxo polarizado em 7 GHz não pode ser feita todos os dias, devido a problemas instrumentais intermitentes no canal R, mas onde foi possível se fazer a análise, verificou-se a ocorrência de variações do fluxo durante os trechos em que a amplitude do ruído aumentou significativamente, especialmente antes dos eventos classificados como M e X pelo GOES.

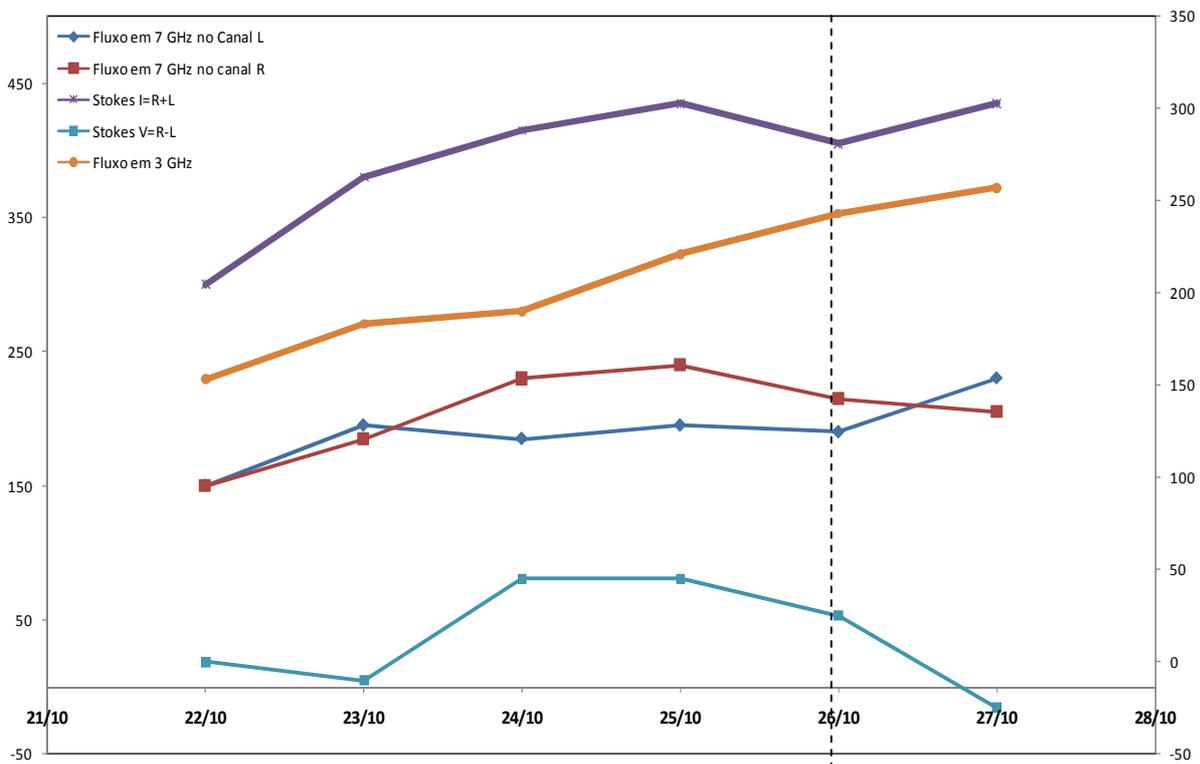


Figura 9.1- O fluxo dos canais R (traço vermelho) e L (traço azul), os parâmetros de Stokes I (traço roxo) e V (traço azul claro no eixo principal) e o fluxo global em 3 GHz (traço laranja)

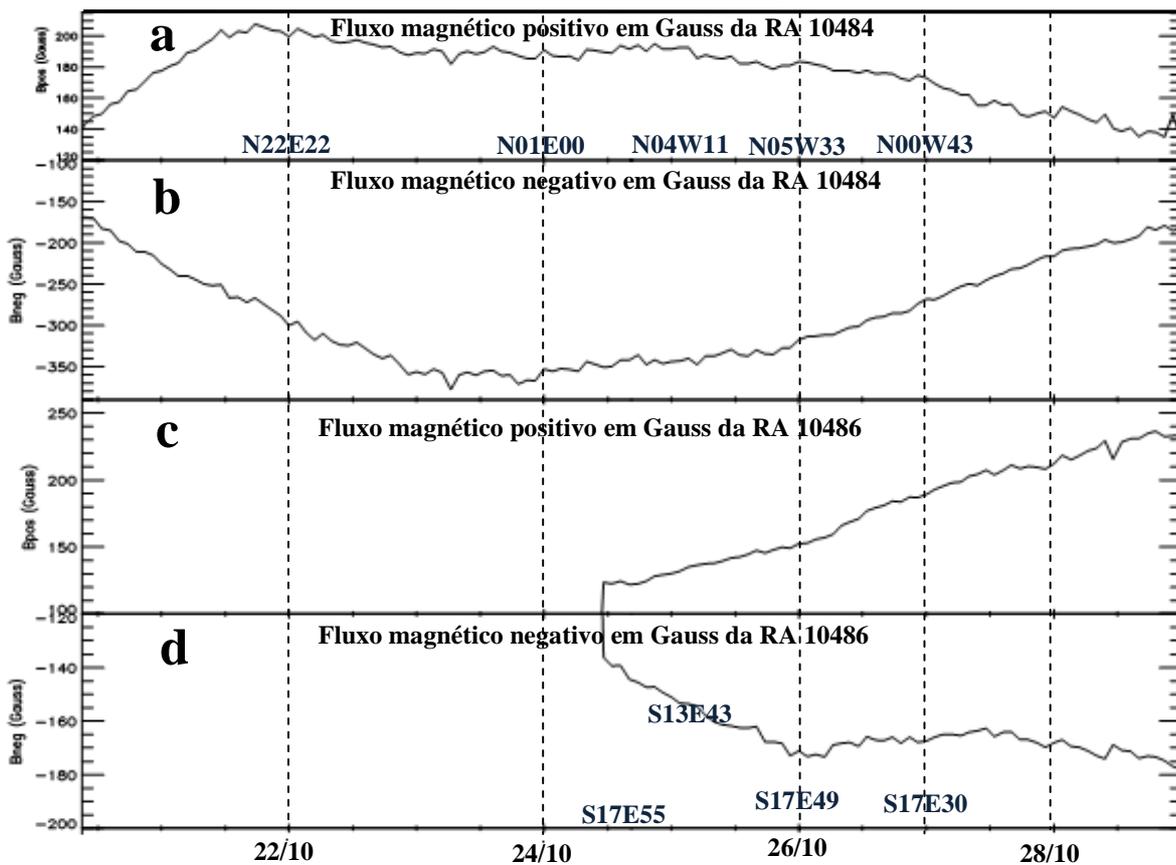


Figura 9.2- Evolução do fluxo magnético das regiões ativas 10484, e 1486 obtidas do experimento MDI aboard do satélite SOHO. Todas foram muito complexas e apresentaram configuração magnética  $\beta\gamma\delta$ . As polaridades magnéticas das regiões são: 'a' Polaridade positiva da RA10484; 'b' polaridade positiva da RA 10484; 'c' polaridade positiva da RA10486; 'd' polaridade negativa da RA 10486.

No dia 6/10, considerado como de baixa atividade solar, verificou-se que apesar dos eventos em raios X não terem contrapartida em 7 GHz, o sinal apresentou aumentos na amplitude do ruído durante os eventos pequenos em raios X, que foram pequenos este dia (classificação  $\leq B$ ). Por outro lado, nos dias de atividade maior, quando os eventos foram observados em raios X e 7 GHz, o sinal os aumentos de amplitude do ruído antes do início dos eventos.

Da análise das ondeletas verificou-se que os trechos em que a amplitude do ruído era  $\geq 20\%$  estavam associados ao aparecimento de componentes de período significativas. As componentes de período associadas a eventos de menor intensidade X apareceram na faixa de períodos mais curtos ( $< 6s$ ), enquanto que no caso de eventos X mais intensos, a faixa de períodos se estendeu na faixa de períodos mais longos ( $> 6s$ ). A tabela 11 mostra que a potência máxima das componentes de período do sinal ocorre de minutos a horas antes do início dos eventos, e é em períodos  $< 6s$  no caso de ventos fracos, e em períodos maiores no caso dos eventos mais intensos. A máxima potência das componentes de período foi  $17 \text{ usf}^2$  no dia 6, quando o ruído ocorreu durante os eventos de baixa intensidade em raios X, sendo máxima no dia 27, quando atingiu  $120 \text{ usf}^2$ , dia que antecedeu a ocorrência do maior evento do ciclo 23.

A figura 9.3, onde se tem a evolução da potência das componentes de período do sinal em 7 GHz associado à evolução da atividade solar, mostra que a medida que a atividade aumenta, as componentes de período cobrem toda a faixa analisada, e apresentam maior potência.

No dia 24/10/03, o sinal em 7 GHz apresentou aumento violento na amplitude de ruído durante a ocorrência de abrlhantamentos nas imagens em ultravioleta obtidas com o

TRACE. Aumentos na amplitude do ruído em 7 GHz também ocorreram quando foram relatados eventos apenas na alta coroa na faixa de ondas métricas. Nos trechos que foram observados em associação ao início de EMCs na superfície solar, a amplitude do ruído também foi  $\geq 20\%$  associada ao aparecimento de componentes de período do sinal em toda a faixa (1,8 a 409 s), com máximo de potência ( $\sim 80-140 \text{ ufs}^2$ ) na faixa de 6,4s a 25,6s.

Os resultados deste trabalho sugerem que as alterações no sinal em 7 GHz, aumentos da amplitude do ruído e da potência das componentes de período, estão associados a alterações da componente S.

Os períodos encontrados da análise ondeletas na faixa de 0,5s a 60s podem estar associadas à propagação das ondas longitudinais, com velocidade de Alfvén, através de tubos de fluxo magnético, que oscilam radialmente, como discutido em alguns trabalhos da literatura (Aschwanden 2003,2004). As componentes de períodos mais longos, na faixa de 100s a 1000s, seriam devido à propagação longitudinal das ondas MHDs nos tubos magnéticos, com velocidade de Alfvén ou com velocidade acústica. No caso da velocidade de Alfvén, a propagação das ondas MHDs longitudinais também é chamada de modo ‘kink’ rápido.

<b>Evento RA (Posição) Início do evento</b>	<b>Data</b> (intervalo antes do evento, onde ocorrem amplitudes do ruído acima da média global observada no dia) (fluxo 7 GHz em ufs/polarização)	<b>Intervalo 'i' onde a amplitude ruído apresentou os aumentos pronunciados (amplitude do ruído)</b>	<b>Potências máximas do intervalo 'i'</b>	<b>Faixa onde ocorreram às potências máximas no intervalo 'i'</b>
<b>B5.9 10483 (S07W02) ~18:35UT</b>	06/10/03 (~18:25UT-18:35UT) (0 usf/L)	~18:30UT-18:35UT (~5-10%)	<b>5-10</b>	<b>52,2s</b>
<b>M1.4 10484 (N05E22) ~15:09 UT</b>	22/10/03 (~12:20UT-15:00UT) ~65/L	~14:00UT-14:40UT (~15-40%)	<b>30-50</b>	<b>3,2s</b>
<b>M9.9 RA 10486 (S18E78) ~19:50 UT</b>	22/10/03 (~17:40UT-19:40UT) (~1500/L)	~18:40UT-19:40UT (~20-35%)	<b>50-110</b>	<b>6,4s -12,8s</b>
<b>M1.0 ~15:45UT</b>	23/10/03 (~14:15UT-15:45UT) 0 ufs/R	~14:30UT-15:45UT (~20-30%)	<b>25-45</b>	<b>3,2s-6,4s</b>
<b>X1.1 10486 (S17E84) ~20:00 UT</b>	23/10/03 (~17:40UT-19:45UT) (~3800/L)	~18:40UT-19:45UT (~15-40%)	<b>80-130</b>	<b>6,4s</b>
<b>C8.9 10486 S17E55 ~15:24 UT</b>	24/10/03 (~14:00UT-15:20UT) (~500/L)	~14:00UT-15:20UT (~10-20%)	<b>35-120</b>	<b>6,4s-409s</b>
<b>M1.0 10484 (N04W31) ~14:15UT</b>	26/10/03 (~12:30UT-14:00UT) ~100/R	~13:00UT-14:00UT (~20-45%)	<b>50-80</b>	<b>3,2s</b>
<b>X1.2 RA 10484 (N04W31) ~17:10UT</b>	26/10/03 (~10:00UT-17:10UT) (~6000/R)	~16:40UT-17:10UT (~20-40%)	<b>30-100</b>	<b>6,4s-12,8s</b>
<b>M6.7 10486 (S17E25) ~12:27 UT</b>	27/10/03 (~10:00UT-11:30UT) (~2500/L)	~10:00UT-11:30UT (~10-30% hora)	<b>80-110</b>	<b>6,4s-12,8s</b>
<b>C7.6 ~19:51UT</b>	27/10/03 (~15:00UT-19:50UT)	17:00UT-19:50UT (~15-25%)	<b>60-140</b>	<b>52,2s – 409s</b>

Tabela 11

Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
6/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
10:48 UT	10	0,5	2,5	5	5	5	4	0,5	0,5	1		220	112	
13:10UT	10	1	3	3	2	1	1	0	0	0		Início em raios-X com $3,4 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> no pico às 13:10UT		
15:38 UT	14	0,5	3,5	12	5	1	1	1	1	0		Pico em raios-X com $2,7 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> Subida em raios X com $2,8 \cdot 10^{-7}$ W/m <sup>2</sup> no pico às 15:38 UT		
16:55UT	14	0,5	3,5	12	14	17	5	6	7	11	21			
18:25UT	5	0	0	0	0,5	1	4	10	6	7	5			
18:35UT	9	1	1	3	5	5	0,5	5	14	23	36			
Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
22/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
11:35UT	22	10	30	30	15	15	2	0	0	0	0	300	153	
11:55UT	42	23	65	40	60	40	10	0	0	10	10			
-12:13 UT início em raios X com $9 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico às 12:15 UT; início em 7 GHz com -60 ufs às -12:15 UT														
12:40UT	46	23	40	60	35	10	5	0	2	10	10			
13:20UT	46	25	60	60	35	25	10	5	5	1	1			
13:51UT	44	12	45	45	40	30	0	0	0	0	0			
-14:00 UT início em raios X com $6,7 \cdot 10^{-8}$ ufs no pico às -14:03 UT e com -5 ufs no pico em 7 GHz às -14:06 UT														
14:25UT	40	23	62	20	25	20	15	50	60	15	15			
14:33UT	25	12	30	60	20	15	20	10	5	1	1			
14:38UT	15	5	10	25	30	30	45	35	20	14	10			
14:47UT	20	5	30	25	15	12	1	2	5	10	10			
14:57UT	20	3	25	20	15	10	0	0	0	0	0			
-15:00 UT CME (LASCO); -15:06 UT início do evento M1.4 (N05E23), RA10484 com -65 ufs em 7 GHz														
16:12UT	25-35	15	48	48	30	15	5	5	5	1	5			
16:27UT	25-55	20	55	65	40	15	25	1	5	1	1			
-16:37 UT início de um evento em 7 GHz com -20 ufs sem contrapartida significativa em raios X														
17:52UT	5	0	1	1	1	20	45	50	15	10	0			
17:53UT	23-28	15	39	40	60	25	5	15	1	0	0			
17:55UT	28-39	17	40	75	100	20	1	5	5	40	130		Início em raios X	
18:01UT	20-38	9	20	35	65	60	65	15	5	0	0			
-17:52 UT; início do evento em raios X, que alcançou o pico de $-5,8 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> , sem excesso significativo em 7 GHz														
18:50UT	20-35	17	50	40	25	25	30	40	5	0	0			
19:00UT	20-30	8	50	50	65	60	15	10	5	0	5			
19:24UT	25-35	8	50	80	70	105	90	10	5	0	0			
19:26UT	25-35	8	20	30	70	90	50	50	14	15	35			
-19:33 UT CME (LASCO); -19:47 UT início do evento em raios X M9.9, RA10486(S18E78) e -19:43 UT início do evento em 7GHz														
Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
23/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
13:19UT	18	10	18	20	5	4	4	1	1	1	5	380	183	
13:44UT	17	3	5	10	10	25	6	5	7	33	60			
-13:45UT início de um evento em raios X com $5 \cdot 10^{-8}$ U no pico às -13:50 UT, sem excesso significativo em 7 GHz														
14:04UT	10-15	3	13	13	13	10	14	4	2	1	2			
14:15UT	10-15	3	5	10	5	8	14	13	10	5	10			
14:30UT	5	10	15	10	10	17	40	40	45	65				
14:33UT	20-25	10	30	30	44	25	10	5	3	3	10			
14:53UT	20-25	10	20	35	18	18	7	1	3	1	1			
15:16UT	20-25	10	19	25	35	7	10	5	4	10	25			
15:45UT	20-28	8	20	30	18	18	3	5	10	25	65			
-15:45 UT início do evento M1.0 sem posição e RA definida														
16:25UT	20-25	9	27	35	20	15	5	0	5	15	1			
18:19UT	19	2	10	25	20	40	5	0	5	0	5			
18:25UT	15-23	2	10	25	20	20	5	15	10	20	5			
19:19UT	20-40	2	10	48	90	35	15	15	5	5	5			
19:25UT	15-25	1	10	45	130	55	60	100	80	10	5			
-19:33 UT início de um CME; -20:00 UT início do evento X1.1 (S17E84) RA10486														
Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
24/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
12:42UT	13-18	0	3	15	35	25	1	0	0	0	0	415	190	
13:17UT	15-25	2	6	35	45	20	0	0	0	0	0			
13:33UT	05-10	0	0	3	5	10	15	30	60	65	70		Pico em raios X com $1,8 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup>	
13:50UT	15-25	1	5	40	120	120	15	40	15	0	6			
13:53UT	5-15	0	0	5	20	35	110	95	0	0	0			
14:06UT	5-15	0	0	4	5	35	50	95	50	40	20			
14:09UT	5-15	0	0	5	30	35	55	75	50	40	45		Início e pico em raios X com $1,9 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup>	
14:28UT	10-15	2	5	20	30	35	10	20	15	40	60			
-15:18 UT início de um CME; -15:23 UT início do evento C9.9 posição S17E55, RA10486 e -15:00 UT início do evento em 7GHz														
Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
26/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
11:05UT	15	8	20	30	20	10	5	1	1	1	5	405	243	
11:11UT	15	5	10	10	10	20	20	20	15	5	20			
11:25UT	17-33	7	25	55	60	30	5	10	20	55	85			
11:38UT	17-29	7	20	35	25	15	35	25	60	50	60			
11:40 UT início do evento em raios X com $7,5 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> às 11:45 UT														
13:20UT	28-35	25	50	80	40	40	5	10	5	0	0			
13:32UT	25-45	30	60	50	20	35	10	5	10	20	40			
13:40UT	20-25	15	20	10	20	25	30	30	15	5	20			
14:09UT	15	5	10	10	5	5	5	1	5	20	20			
-14:15 UT início do evento em raios X M1.0 N04W31, RA10484 e -14:18 UT início em 7GHz (-120 ufs no pico)														
14:32UT	10-25	5	15	40	35	25	10	10	10	48	15			
14:40UT	15-20	5	10	15	15	5	5	3	2	1	5			
14:48UT	10-20	4	10	15	15	13	5	10	38	30	5			
15:00 UT	10-20	5	12	17	30	10	5	5	10	10	10			
15:12UT	10-23	3	13	25	36	10	5	5	5	0	20			
15:50UT	10	1	5	5	10	20	20	25	35	20	10			
15:51UT	20-23	5	20	40	40	70	10	5	5	0	5			
15:58UT	10-23	1	10	15	30	35	15	5	5	20	30			
-16:15 UT evento em raios X com $3,1 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico e 40 ufs em 7 GHz														
16:48UT	15-20	9	12	30	15	5	15	5	1	5	0			
16:52UT	10	0	5	5	5	5	5	3	23	40	30			
17:10 UT	20-40	5	20	80	100	70	20	5	10	50	100			
-17:21UT início do evento em raios X X1.2 N04W31, RA10484 e -17:10 UT pico do ruído e 2ª estimativa para saída da EMC														
Potência Ondeleita das Componentes de período do sinal em 7GHz														
27/10/2003	RMS 7GHz (%)	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6	52,2	103	204	409	Comp S(7 GHz)	3 GHz	
10:30UT	10-20	0	5	10	20	65	60	20	0	15	45	410	257	
11:10UT	5-10	1	5	5	55	90	55	120	60	35	35			
11:50UT	5	1	5	5	10	20	1	20	18	20	35			
-12:27UT início do evento em raios X M6.7 posição S17E25, RA10486 e -12:28 UT início em 7GHz com 350 ufs no pico.														
15:11UT	10	1	0	5	10	20	30	45	10	15	0			
15:39UT	10-15	1	0	5	10	5	10	36	55	110	120			
-15:40UT início de um evento com $4,8 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico e -14:50 UT início de um evento com 50 ufs em 7GHz e $6 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico em raios X														
17:50UT	15-20	3	0	20	85	80	80	100	23	5	0			
18:30UT	10-20	5	0	10	35	10	10	44	105	130	140			
18:31UT início do evento em raios X C7.5 com $7,8 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico e sem excesso significativo em 7 GHz														
19:11UT	15-20	5	5	20	40	60	60	95	40	40	5			
19:40UT	20	10	5	20	55	110	120	120	80	40	40			
19:51UT início do evento em raios X C7.6 com $9 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> no pico e sem excesso significativo em 7GHz														

Figura 9.3- Evolução da potência das componentes de período do sinal em 7 GHz associado aos aumentos da atividade solar.

Os nossos resultados podem ser comparados com os obtidos em outros trabalhos publicados a respeito deste período de atividade solar. Por exemplo, Zharkova et al (2006) observaram os aumentos no fluxo em  $H\alpha$  de 10 a 20 minutos antes dos eventos M1.2 das ~16:00 UT no dia 22, que mais ou menos coincidem com o aumento da amplitude de ruído em 7 GHz. Bem como com o evento X1.2 das ~17:10 UT do dia 26 em que também foram relatadas variações no campo magnético da RA 10484 (Bao et AL, 2007).

No dia 25, Mandrini et al (2006) identificaram bipolos magnéticos emergentes da RA 10486 por volta de ~14:35 UT. Próximo deste intervalo e associado a um evento pequeno e complexo em 7 GHz, a amplitude do ruído superou 80% e a potência das componentes de período do sinal foi  $>100 \text{ usf}^2$ , praticamente em toda faixa, durante vários minutos. Segundo Mandrini, estes mesmos bipolos se separaram em 2 novas manchas na RA 10486 no dia 26, e podem ter iniciado um processo de rearranjo nas estruturas magnéticas da região ativa, que culminou com o evento X17 do dia 28. No dia 25, a amplitude do ruído do sinal em 7 GHz chegou a ser  $\geq 30\%$  em vários trechos e as componentes de período do sinal apareceram em toda faixa.

Os aumentos na amplitude do ruído e nas potências das componentes de período do sinal em 7 GHz podem estar associados às alterações do campo magnético que se processam antes dos processos explosivos.

## 9.1- Conclusões finais

Nós analisamos a componente *S* em 7 GHz antes de ~40 eventos com fluxo entre ~30 e ~6000 ufs em 7 GHz, que foram produzidos em 3 regiões ativas complexas (RA NOAA 10484,1486,1488 – todas alcançaram classificação magnética  $\beta\gamma\delta$ ) durante sua passagem pelo disco solar. O estudo teve como referência o dia 06/10/03 de baixa atividade solar, sem relatos de EMCs ou eventos em rádio.

A componente *S* em 7 GHz apresentou aumentos mais pronunciados na amplitude do ruído associados ao aparecimento de componentes de período no sinal em 7 GHz antes das explosões solares e associados ao início estimado na superfície solar de 7 EMCs. Os resultados sugerem que, o intervalo entre o instante em que a amplitude do ruído começa a aumentar e o início dos eventos em raios X é função da intensidade dos eventos.

As componentes de períodos do sinal em 7 GHz apareceram com potências relativamente baixas, principalmente na faixa das componentes de períodos mais curtos (3,2s-12,8s), desde minutos antes dos eventos pequenos em raios X ( $\leq B$ ). Enquanto que, associado aos eventos maiores M ou X, as componentes de período de período do sinal apareceram com potências muito mais fortes do que as observadas antes dos eventos pequenos, desde minutos a horas antes dos eventos M ou X. A faixa das componentes de períodos que predominou inicialmente foi a dos períodos mais curtos, mas a faixa se estendeu e os períodos mais longos passaram a predominar mais próximo do início dos eventos em raios X.

Globalmente, a potência das componentes de período do sinal cresceu significativamente associada ao aumento da atividade solar, sendo que a partir do dia 26

elas apareceram com muito mais frequência em toda faixa de 3,2s a 409s, e no dia 27 os períodos mais longos (>52,2s) passaram a predominar.

Às variações na potência das componentes de período do sinal em 7 GHz foram atribuídas às oscilações radiais e transversais dos tubos de fluxos magnéticos, iniciadas provavelmente por novos fluxos emergentes na fotosfera. As oscilações radiais e/ou transversais dos campos magnéticos estão associadas aos processos de reconexão que produziram os eventos solares, sendo que a complexidade e a extensão da estrutura magnética perturbada está correlacionada com a intensidade dos eventos solares. A emissão solar em 7 GHz é, portanto, um indicador potencial de previsão de explosões solares e EMCs a curto prazo nas regiões ativas.

## Referências Bibliográficas

Akhmedov, Sh. B.; Bogod, V. M.; Gelfreikh, G. B.; Hildebrandt, J.; Krüger, A., "A study of "thermal" and "nonthermal" S-component emissions generated outside sunspots", Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, vol. 15, p.339, 1986;

Aschwanden, Markus J.; Kliem, Bernhard; Schwarz, Udo; Kurths, Jürgen; Dennis, Brian R.; Schwartz, Richard A., "Wavelet Analysis of Solar Flare Hard X-Rays", The Astrophysical Journal, Volume 505, Issue 2, p. 941-956, 1998;

Aschwanden, M. J., "The Role of Observed MHD Oscillations and Waves for Coronal Heating", Proceedings of the SOHO 15 Workshop - Coronal Heating. 6-9 September 2004, p.97,2004

Aschwanden, M. J., " Review of Coronal Oscillations - An Observer's View", Advanced Research Workshops, 16-20 Sept 2002, held in Budapest, Hungary;

Aschwanden, Markus J.; Fletcher, Lyndsay; Schrijver, Carolus J.; Alexander, David, "Coronal Loop Oscillations Observed with the Transition Region and Coronal Explorer", The Astrophysical Journal, Volume 520, Issue 2, pp. 880-894,1999;

Bao, X.; Zhang, H.; Lin, J.; Stenborg, G. A., "Coronal mass ejections and the associated activities on the solar disk observed on October 26, 2003", Astronomy and Astrophysics, Volume 463, Issue 1, February III 2007, pp.321-331, 2007;

Bendjoya, Ph.; Petit, J.-M.; Spahn, F., 1993, "Bendjo Wavelet analysis of the Voyager data on planetary rings. I - Description of the method", Icarus, vol. 105, p. 385 ;

Boffeta, G., Carbone P.,Giuliani P., and Vulpiani, A., “Power Laws in Solar Flares: Self-Organized Criticality or Turbulence?”, *Phys. Rev. Lett.*, 83, 4662-4665, 1999;

Bogod, V. M.; Gel'Freikh, G. B.; Willson, R. F.; Lang, K. R.; Opeikina, L. V.; Shatilov, V.; Tsvetkov, S. V., “Very Large Array-RATAN 600 observations of a solar active region”,*Solar Physics*, vol. 141, no. 2, p. 303-323.,1992;

Bogod, V.; Grebinskij, A.; Garaimov, V.; Urpo, S.; Fu, Q. J.; Zhang, H. , “Pre- and post-flare evolution of AR 8038 on May 9 - 14, 1997 with Metsähovi-RATANB-BAO spectral microwave observations”, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, Vol. 48, p. 17 – 24, 1999;

Bogod, V.; Tokhchukova, S., “Spectral-polarization behaviour of solar active region producing powerful flares”, *Solar variability: from core to outer frontiers. The 10th European Solar Physics Meeting, 9 - 14 September 2002, Prague, Czech Republic*. Ed. A. Wilson. ESA SP-506, Vol. 1. Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-816-6, p. 279 – 282, 2002;

Bougeret, Jean-Louis, “Observations of shock formation and evolution in the solar atmosphere”, *Reviews of current research Washington, DC, American Geophysical Union*, p. 13-32,1985;

Chiuderi Drago, F.; Melozzi, M. “Non-thermal radio sources in solar active regions”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 131, no. 1, p. 103-110, 1984

Chiuderi Drago, F.; Alissandrakis, C.; Hagyard, M., “Microwave emission above steady and moving sunspots”, *Solar Physics*, vol. 112, no. 1, p. 89-105, 1987;

Covington, Arthur E., "Solar Radio Emission at 10.7 cm, 1947-1968", Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Vol. 63, p.125, 1969;

Dulk, G. A., "Radio emission from the sun and stars", Annual review of astronomy and astrophysics. Volume 23, p. 169-224., 1985;

Feynman, J.; Martin, S. F, "The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux", Journal of Geophysical Research (ISSN 0148-0227), vol. 100, p. 3355-3367,1995;

Filippov, Boris, "Saddle Structures and Magnetic Nulls in the Solar Corona", 8th SOHO Workshop: Plasma Dynamics and Diagnostics in the Solar Transition Region and Corona. Proceedings of the Conference held 22-25 June 1999 in CAP 15, 1-13, 1999;

Fujiki, K.; Nakajima, H., "Microwave Preflare Enhancement and Depletion in Long Duration Events", Advances in Space Research, Volume 26, Issue 3, p. 477-480, 2000;

Gelfreikh, G. B.; Lubyshev, B. I., "Structure of Local Sources of the S-Component of Solar Radio Emission", soviet astronomy V. 23, P. 316, 1979;

Giménez de Castro, C. G.; Raulin, J.-P.; Mandrini, C. H.; Kaufmann, P.; Magun, A., 2001, "Multi-resolution wavelet analysis of high time resolution millimeter wavelength observations of solar bursts", Astronomy and Astrophysics, v.366, p.317-325;

Gopalswamy, N.; Raulin, J.-P.; Kundu, M. R. Hildebrandt, J.; Kruger, A.; "VLA Observations of a Solar Active Region at 6.2 and 3.5 CM Wavelength Compared with Model Calculations" Radio emission from the stars and the sun. Astronomical Society of

the Pacific Conference Series, Volume 93; Proceedings of a conference held at the University of Barcelona; Barcelona; Spain; 3-7 July 1995;

Goldman, M. V., "Progress and problems in the theory of type III solar radio emission", *Solar Physics*, vol. 89, p. 403-442., 1983;

Harvey, Karen L.; Zwaan, Cornelis, "Properties and emergence of bipolar active regions", *Solar Physics* , vol. 148, no. 1, p. 85-118, 1993;

Hochedez, J.F., "The Solar UV radiometer onboard PROBA-2", 35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18 - 25 July 2004, in Paris, France., p.2934;

Kahler, S. W., "Preflare characteristics of active regions observed in soft X-rays", *Solar Physics*, vol. 62, p. 347-357., 1979

Kai, K.; Melrose, D. B.; Suzuki, S., "Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths", Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985, p. 415-441, 1985;

Kakinuma, T.; Swarup, G., "A Model for the Sources of the Slowly Varying Component of Microwave Solar Radiation", *Astrophysical Journal*, vol. 136, p.975;

Kalman, B., "Flow patterns around old sunspots and flare activity" *Astronomy and Astrophysics*, v.327, p.779-785, 1997.

Kaufmann, Pierre; Giménez de Castro, C. Guillermo; Makhmutov, Vladimir S.; Raulin, Jean-Pierre; Schwenn, Rainer; Levato, H.; Rovira, M., 2003, "Launch of solar coronal mass

ejections and submillimeter pulse bursts”, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, Volume 108, Issue A7, p. SSH 5-1;

Kaufmann, Pierre. “La atmósfera solar y su investigación a través de ondas radioeléctricas”, noviembre, 1975, Talleres Gráficos Del Observatorio nacional de Física Cósmica, Buenos Aires, Argentina;

Kattenberg, A.; van Hees, R. M.; van Nieuwkoop, J., “Digitally recorded type I bursts and some theoretical aspects of continuum and burst generation”, *Radio physics of the sun; Proceedings of the Symposium, College Park, Md., August 7-10, 1979*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., p. 259-264, 1980;

Kosovichev, A. G.; Zharkova, V. V., “Variations of Photospheric Magnetic Field Associated with Flares and CMEs”, *Solar Physics*, v. 190, Issue 1/2, p. 459-466, 1999;

Krall, K. R.; Smith, J. B., Jr.; Hagyard, M. J.; West, E. A.; Cummings, N. P., “ Vector magnetic field evolution, energy storage, and associated photospheric velocity shear within a flare-productive active region”, *Solar Physics*, vol. 79, p. 59-75., 1982;

Lantos, P. A., “A model for thermal gyromagnetic radio emission from solar active regions”, *Annales d'Astrophysique*, Vol. 31, p.105, 1968;

Lee, Jeongwoo W.; Hurford, G. J.; Gary, Dale E., “Microwave emission from a sunspot. I - Implications for the sunspot magnetic structure”, *Solar Physics*, vol. 144, no. 1, p. 45-57. , 1993

Makhmutov, V. S.; Raulin, J.-P.; Giménez de Castro, C. G.; Kaufmann, P.; Correia, E., 2003, “Wavelet Decomposition of Submillimeter Solar Radio Bursts”, *Solar Physics*, v. 218, Issue 1, p. 211-220;

Mallat, S. G., 1989, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, 7, 674;

Mandrini, C. H.; Demoulin, P.; Schmieder, B.; Deluca, E. E.; Pariat, E.; Uddin, W., “Companion Event and Precursor of the X17 Flare on 28 October 2003”, *Solar Physics*, Volume 238, Issue 2, p.293-312, 2006;

Martin, S. F.; Livi, S. H. B.; Wang, J., “The cancellation of magnetic flux II - in a decaying active region”, *MPA Rep.*, No. 212, p. 179 – 182, 1985;

Martin, Sara F., “Recent observations of the formation of filaments”, In *NASA. Goddard Space Flight Center Coronal and Prominence Plasmas* p 73-80, 1986;

McIntosh P., “ The classification of sunspot groups, *Solar Physics*”, 125, 251, 1990;

Melrose, D. B., “The emission mechanisms for solar radio bursts”, *Space Science Reviews*, vol. 26, p. 3-38, 1980;

Melrose, D. B., Nelson, G. J.; “Type II bursts”, *Solar radiophysics*, p. 333–359, 1985;

Moon, Y.-J.; Choe, G. S.; Yun, H. S.; Park, Y. D., “ Flaring time interval distribution and spatial correlation of major X-ray solar flares “*Journal of Geophysical Research*, Volume 106, Issue A12, p. 29951-29962, 2001;

Muglach, K.; Dere, K., “The Evolution of Photospheric Source Regions of CMEs”, Coronal and Stellar Mass Ejections, IAU Symposium Proceedings of the International Astronomical Union 226, Held 13-17 September, Beijing, edited by K. Dere, J. Wang, and Y. Yan. Cambridge: Cambridge University Press, pp.179-183, 2005.

North G. R. G, Mengel, and D. A. Short, “Climatic response to a time varying solar constant. weather and climatic response to solar variations”, B.M. Mc Cosmac, ed., Colorado Associated University Press, Boulder, 243-245, 1983.

Núñez M., Fidalgo R., Baena M., and Morales R., “The influence of active region information on the prediction of solar flares: an empirical model using data mining” *Annales Geophysicae*, 23, 3129-3138, 2005;

Priest, E. R., “Magnetic Reconnection at the Sun”, *Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasmas: Geophysical Monograph 30*. Edited by Edward W. Hones, Jr.. Published by the American Geophysical Union, Washington, DC USA, p.63, 1984;

Priest, E. R., “Appearance and Disappearance of Magnetic Flux at the Solar surface”, *The Role of Fine-Scale Magnetic Fields on the Structure of the Solar Atmosphere*, Proceedings of the Inaugural workshop and round table discussion for the D-E-S Telescope installations on the Canary Islands, La Laguna, Tenerife, Spain, 6-12 October 1986. Edited by E.-H. Schröter, M. Vázquez, and A.A. Wyller. Cambridge: Cambridge University Press, p.297, 1987;

Priest, Eric; Forbes, Terry, “Magnetic reconnection : MHD theory and applications”, Eric Priest, Terry Forbes. New York : Cambridge University Press, 2000;

Reid G.:J. Geophys. Res., 96, 2835-2844, 1991;

Robinson, P. A., “Gyrosynchrotron emission - Generalizations of Petrosian's method”, *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 298, p. 161-169, 1985;

Sakurai T., “ A study of magnetic energy build-up based on vector magnetograms” *Solar Physics*, vol. 113, no. 1-2, 1987, p. 137-142; Discussion, p. 143, 144.1987

Scargle, J. D., Steiman-Cameron, T.,Young, K., et al. 1993, *The Astrophysical Journal*, Volume 441 , p.91.

Schmieder, B.; Engvold, O.; Yong, Lin; Deng, Y. Y.; Mein, N., “Magnetic cancellation and small-scale activity in an AR filament”, In: SOLMAG 2002. Proceedings of the Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference and IAU Colloquium 188, 11 - 15 June 2002, Santorini, Greece. Ed. H. Sawaya-Lacoste, 2002, p. 223 - 226

Schrijver, Carolus J., “A Characteristic Magnetic Field Pattern Associated with All Major Solar Flares and Its Use in Flare Forecasting”, *The Astrophysical Journal*, Volume 655, Issue 2, pp. L117-L120, 2007;

Schrijver, Carolus J., “Driving major solar flares and eruptions: A review”, *Advances in Space Research*, Volume 43, Issue 5, p. 739-755., 2009;

Schrijver, Carolus J.; Aschwanden, Markus J.; Title, Alan M., “Transverse oscillations in coronal loops observed with TRACE I. An Overview of Events, Movies, and a Discussion of Common Properties and Required Conditions”, *Solar Physics*, v. 206, Issue 1, p. 69-98, 2002;

Schwarz, U.; Kurths, J.; Kliem, B.; Kruger, A.; Urpo, S., “Multiresolution analysis of solar mm-wave bursts”, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, v.127, p.309-318, 1998;

Shibasaki, K.; Chiuderi-Drago, F.; Melozzi, M.; Slottje, C.; Antonucci, E., “Microwave, ultraviolet, and soft X-ray observations of Hale region 16898”, *Solar Physics*, vol. 89, p. 307-321., 1983;

Smirnov, R. V. 1974, in *Solar-Atmospheric Relationship in the theory of Climate and weather forecast*, p. 33(in Russian)

Smirnov, R. V. 1984, *Sov. Astron. Journ.* 61, 1168

Smirnov, R. V. 1987, in *Cosmos and Meteorology* (Ed. S. I. Avdjushin), Moscow, Gidrometeoizdat, p. 70 (in Russian)

Smirnov, R. V e Kononovich, E.V., 1993, in *Proceedings of the 1992 STEP Symposium/ 5-th COSPAR Colloquium*, (ed M. Teague) p. 53

Smirnov, R. V e Kononovich, E.V., 1994, “ in *Magnetic fields of the Sun and helioseismology*” , (ed Yu. I. Vitinskij), p. 140 (Russian)

Smirnov, R. V e Kononovich, E.V., *Astron. Astrophys. Trans.*, 6,1,1995;

St. Cyr, O. C.; Plunkett, S. P.; Michels, D. J.; Paswaters, S. E.; Koomen, M. J.; Simnett, G. M.; Thompson, B. J.; Gurman, J. B.; Schwenn, R.; Webb, D. F.; Hildner, E.; Lamy, P. L., “Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998”, *Journal of Geophysical Research*, Volume 105, Issue A8, p. 18169-18186, 2000;

Stewart, R. T., "Moving type IV bursts", *Solar radiophysics*, p. 361–383, 1985;

Subramanian, Prasad; Dere, K. P., "Source Regions of Coronal Mass Ejections", *The Astrophysical Journal*, Volume 561, Issue 1, pp. 372-395, 2001

Sudol J. J. e Hardey J.W., "Changes in the Longitudinal Magnetic Field during Solar Flares", *Proceedings of the SOHO 14 / GONG 2004 Workshop (ESA SP-559). "Helio-and Asteroseismology: Towards a Golden Future"*. 12-16 July, 2004. New Haven, Connecticut, USA. Editor: D. Danesy., p.643, 2004

Sych, R. A.; Uralov, A. M.; Korzhavin, A. N., "Radio observations of compact solar sources located between sunspots", *Solar Physics*, vol. 144, no. 1, p. 59-68, 1993 ;

Sudol J. J. e Hardey J.W., " Longitudinal magnetic field changes accompanying solar flares", *Astrophysical Journal*, 635, p. 647-658, 2005;

Tanaka, H.; Enome, S., "The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares", *Solar Physics*, vol. 40, p. 123-131, 1975;

Takakura, T., "Origin of Solar Radio Type I Bursts", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 15, p.462, 1963;

Torrence, C. e Compo, G. P., 1998, *Bull. Am. Meteor. Soc*, vol. 79, p. 61

Tousey, R.; Bartoe, J. D. F.; Bohlin, J. D.; Brueckner, G. E.; Purcell, J. D.; Scherrer, V. E.; Sheeley, N. R., Jr.; Schumacher, R. J.; Vanhoosier, M. E., "A Preliminary Study of the Extreme Ultraviolet Spectroheliograms from Skylab", *Solar Physics*, Volume 33, Issue 2, pp.265-280, 1973;

Tsuneta, Saku; Takahashi, Tetsuo; Acton, Loren W.; Bruner, Marilyn E.; Harvey, Karen L.; Ogawara, Yoshiaki, "Global restructuring of the coronal magnetic fields observed with the YOHKOH Soft X-ray Telescope", Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 44, no. 5, p. L211-L214, 1992;

Tsuneta, Saku, "Structure and Dynamics of Magnetic Reconnection in a Solar Flare", Astrophysical Journal v.456, p.840,1996;

Van Loon, H., and Labitzke, K.: J. Geophys. Res., 98,p. 919-927, 1993.

Vernazza, J. E.; Avrett, E. H.; Loeser, R., "Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun", Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 45, p. 635-725., 1981;

Wang, Haimin; "Evolution of vector magnetic fields and the August 27 1990 X-3 flare", Solar Physics, vol. 140, no. 1, p. 85-98., 1992;

Wang, Y.-M.; Sheeley, N. R., Jr., "Filament Eruptions near Emerging Bipoles", The Astrophysical Journal, Volume 510, Issue 2, pp. L157-L160.,1999;

Webb, D. F., "X-ray evidence of coronal preflare emission", Solar and interplanetary dynamics; Proceedings of the Symposium, Cambridge, Mass., August 27-31, 1979. (A81-27626 11-92) Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., p. 189-192; Discussion, p. 193., 1980;

Webb, D. F.; Krieger, A. S.; Rust, D. M., "Coronal X-ray enhancements associated with H-alpha filament disappearances", Solar Physics, vol. 48, p. 159-186, maio 1976;

Webb, D. F.; Davis, J. M.; Kundu, M. R.; Velusamy, T., "X-ray and microwave observations of active regions", Solar Physics, vol. 85, p. 267-283, 1983;

Wheatland M. S., "Rates of flaring in individual active regions", Solar Physics, 203,87,2001

Zaitsev, V. V.; Kuniilov, M. V.; Mityakov, N. A.; Rapoport, V. O., "Generation of type III radio bursts by electron fluxes having a large injection time", Soviet Astronomy, Vol. 18, p.147, 1974;

Zharkova, V.; Benkhalil, A.; Zharkov, S.; Ipson, S.; Bentley, R. D., "Active region AR484 tracking with Solar Feature Cataloge", Advances in Space Research, Volume 37, Issue 6, p. 1152-1162.,2006;

Zheleznyakov, V. V., "The Origin of the Slowly Varying Component of Solar Radio Emission", Soviet Astronomy, Vol. 6, p.3 , 1962

Zirin, H., "Book-Review - Astrophysics of the Sun", SCIENCE V.242, NO.4885/DEC16, P.1586, 1988;

Zlotnik, E. Ya., "Theory of the Slowly Changing Component of Solar Radio Emission. I.", Soviet Astronomy, Vol. 12, p.245, 1968;

Zwaan, Cornelis, "Elements and patterns in the solar magnetic field",IN: Annual review of astronomy and astrophysics. Vol. 25, p. 83-111, 1987;

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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