

Universidade do Vale do Paraíba  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ

IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE CORRENTES TIPO I MÉTRICAS  
REGISTRADAS PELO CALLISTO-BLEN NO PERÍODO DE 30 DE  
JULHO A 09 DE AGOSTO DE 2011

São José dos Campos, SP  
2013

Zuleika Auxiliadora da Luz Sodré

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE CORRENTES TIPO I  
MÉTRICAS REGISTRADAS PELO CALLISTO-BLEN NO  
PERÍODO DE 30 DE JULHO A 09 DE AGOSTO DE 2011**

Dissertação apresentada como parte das exigências da disciplina de Mestrado do curso de Física e Astronomia do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento IPD.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes

São José dos Campos, SP

2013

---

S663i

Sodré, Zuleika Auxiliadora da Luz

Identificação e análise de correntes tipo I métricas registradas pelo CALLISTO-BLEN no período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011 / Zuleika Auxiliadora da Luz Sodré; Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes. – São José dos Campos, 2013.

105 p., 1 disco laser: Color

-Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento. Programa de Pós-Graduação em Física e astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Sol. 3. Atividade solar. 4. Astronomia-Instrumentos. I. Fernandes, Francisco Carlos Rocha. II. Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento. Programa de Pós-Graduação em Física e astronomia. III. Título.

CDU: 52

---

Autorizo exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta Dissertação, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura do aluno: *Zuleika C. Luz Sodré*

Data: 28 de fevereiro de 2013.

## ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ

### “IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE CORRENTES TIPOS MÉTRICAS REGISTRADAS PELO CALLISTO-BLEN NO PERÍODO DE 30 DE JULHO A 09 DE AGOSTO DE 2011”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dra. **ALESSANDRA ABE PACINI** (UNIVAP)

Prof. Dr. **FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES** (UNIVAP)

Prof. Dr. **CAIUS LUCIUS SELHORST** (UNIVAP)

Prof. Dr. **JOSÉ ROBERTO CECATTO** (INPE)

Prof<sup>a</sup>. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa

Diretor do IP&D – UniVap

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2013.

*O Sol está dentro de cada um. Sorrir e acreditar em si é o caminho para alcançar a luz e o brilho que irradia da própria existência e acalenta a crença em nós mesmos. Acreditemos no próprio sol, ele mora no eu e ilumina o tudo e o todo. A gargalhada é o sol que varre o inverno do rosto humano.*

VICTOR HUGO

*Para meu marido Francisco, principal incentivador deste Mestrado,  
pela paciência nas horas que em que estava ocupada com meus estudos.*

*A meus pais Célia e José, pelo ensinamento do valor do  
conhecimento e apoio à minha busca pelo mesmo. A meus irmãos,  
cunhados e sobrinhos pelas horas de descontração.*

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por estar sempre presente em minha vida, e permitir a realização desse trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Francisco, pela paciência e desprendimento na transmissão dos conhecimentos.

Aos membros da banca, por seus comentários que ajudaram na melhoria deste trabalho.

Aos professores do Mestrado, que abriram caminho para o entendimento dos processos e análises deste trabalho.

Aos companheiros de curso, por compartilhar seus conhecimentos e pelo apoio nas horas de dificuldade.

A UNIVAP e CAPES pela bolsa de Mestrado concedida.

## RESUMO

Neste trabalho, é apresentada a análise de correntes tipo I, rádio emissões solares que, quando observadas por instrumentos com alta resolução espectral e temporal, apresentam aparência complexa e sequências com pelo menos 4 emissões tipo I individuais (banda estreita e curta duração), separação inferior a 1 segundo e aproximadamente a mesma frequência central. As emissões tipo I são as menos estudadas, portanto o conhecimento sobre os detalhes dos mecanismos físicos responsáveis pelas mesmas ainda não são plenamente compreendidos, motivando e justificando estudos como o realizado nesta Dissertação. Na análise, foram usados dados de emissões tipo I observados pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN, na faixa de frequências métricas (170-870 MHz), no período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011, durante a fase ascendente do ciclo solar 24. Com base nas características morfológicas identificadas nos espectros dinâmicos foram selecionadas 225 correntes tipo I. Aplicando metodologia desenvolvida no decorrer do trabalho, as seguintes características espectro-temporais das 225 correntes tipo I foram medidas nos espectros dinâmicos: frequência central na faixa de 200 a 400 MHz; largura banda de 1 a 150 MHz; duração total de 20 a 600 segundos e deriva em frequência na faixa de  $-3$  a  $+3$  MHz/s. Os parâmetros físicos determinados apresentam os seguintes valores: densidade eletrônica de  $0,5 \times 10^9$  a  $2,0 \times 10^9$   $\text{cm}^{-3}$ ; velocidade radial de  $+50$  a  $+550$  km/s; campo magnético entre 2,2 e 3,3 G e altura da fonte 0,9 a 1,1  $R_{\odot}$ . Tais resultados reforçam as evidências de que as emissões tipo I (e correntes tipo I) são decorrentes da emissão de plasma gerada por elétrons energéticos presentes nas estruturas magnéticas da coroa solar associadas às regiões ativas. Os resultados obtidos são discutidos e comparados com valores encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** Sol, emissão solar, ondas métricas, corrente tipo I, CALLISTO-BLEN.



## ABSTRACT

This work presents the analysis of chains type I, which are solar emission with complex structure when observed by instruments with high spectral and temporal resolution exhibits sequences of least four type I emission individual (with narrowband and short duration), separation of less than 1 second and approximately the same center frequency. Type I emissions are the less studied solar metric emissions, so the knowledge about the details of the physical mechanisms responsible for them are not yet fully understood. The analysis used data of type I emissions by CALLISTO-BLEN spectrograph, in the frequency band metric (170-870 MHz), from 30 July to 9 August 2011, during the ascending phase of the solar cycle. Based on the morphological characteristics identified in the 225 chains of type I the following were selected. Applying the methodology developed in this work, spectro-temporal characteristics of the 225 chains of type I were measured: center frequency in the range of 200 to 400 MHz; bandwidth of 1 to 150 MHz; total duration of 20-600 seconds and rate drift frequency in the range of  $-3$  to  $+3$  MHz/s. The physical parameters determined are as follows: electron density from  $0.5 \times 10^9$  to  $2,0 \times 10^9$   $\text{cm}^{-3}$ ; radial velocity of  $+50$  to  $+550$  km/s; magnetic field between 2.2 and 3.3 G and height of the source from 0.9 to 1.1  $R_{\odot}$ . These results provide further evidence of that emissions type I are the result of plasma emission generated by energetic electrons present in the magnetic structures in the solar corona associated with active regions. The results obtained are discussed and compared with values found in the literature.

**Keywords:** Sun, solar emission, metric wavelength, chain of I type, CALLISTO-BLEN.

# SUMÁRIO

Pág.

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	Motivação para Desenvolvimento da Dissertação	29
1.2	Objetivos	29
1.3	Estrutura da Dissertação	30
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>31</b>
2.1	O Espectro Eletromagnético	31
2.2	Observação do Sol em Múltiplos Comprimentos de Onda	32
2.3	A Estrutura Solar	34
2.4	Coroa Solar	37
2.4.1	O Ciclo Solar	42
2.4.1.1	A Características da Coroa Durante as Fases do Ciclo Solar	43
2.5	Rádio Emissão Solar	44
2.6	Emissão Tipo I	49
2.7	Tempestades	50
2.8	Correntes Tipo I	53
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO</b>	<b>57</b>
3.1	O Espectrômetro CALLISTO	58
3.1.1	Aquisição de Dados da rede e-CALLISTO	59
3.2	O CALLISTO-BLEN	61
<b>4</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO, SELEÇÃO E ANÁLISE DE DADOS</b>	<b>63</b>
4.1	Identificação e Seleção de Dados	63
4.2	Parâmetros Observacionais das Correntes Tipo I	67
4.3	Parâmetros Físicos da Região Fonte das Correntes Tipo I	70
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>73</b>

5.1	Distribuição da Duração Total das Correntes . . . . .	73
5.2	Características Espectrais (Frequência Inicial e Largura de Banda em Frequência)	75
5.3	Taxa de Deriva em Frequência e Velocidade da Fonte . . . . .	79
5.4	Campo Magnético . . . . .	82
5.5	Altura da Fonte . . . . .	84
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>87</b>
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	90
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>A</b>	<b>APÊNDICE A - Composição da Rede e-CALLISTO . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>B</b>	<b>APÊNDICE B - Tabelas de Parâmetros Observacionais e Físicos da Fonte . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>C</b>	<b>APÊNDICE C - Fases do Ciclo Solar . . . . .</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Espectro Eletromagnético mostrando as escalas de comprimento de onda e frequências das diversas faixas do espectro e diversos tipos de radiação. A parte destacada apresenta a faixa do visível. . . . .	31
2.2 Janelas Atmosféricas mostrando a transparência da atmosfera terrestre para radiação com comprimentos de onda entre $\approx 390$ e $760$ nm (janela óptica) e entre $1$ mm e $30$ m (janela rádio). . . . .	33
2.3 Sol em vários comprimentos de onda. A: raios-X; B: extremo ultravioleta; C: ultravioleta; D: linha de emissão do hidrogênio no visível; E: linha de emissão do cálcio(ionizado uma vez) no visível; F: luz branca no visível; G: infravermelho; H: rádio (microondas). . . . .	33
2.4 Diagrama representando a divisão da estrutura solar em camadas. Neste diagrama também são representadas as manchas solares e as linhas de campos magnético. . . . .	35
2.5 Diagrama da cadeia próton-próton, o ciclo de fusão nuclear que gera a maior parte da energia do Sol. . . . .	36
2.6 Imagem Yohkoh Solar Observatory mostrando a coroa solar em raio-X. Esta imagem foi gravada em 14/12/2001. . . . .	38
2.7 Variação do parâmetro $\beta$ de Plasma em função da altura na atmosfera solar. . . . .	41
2.8 Distribuição de Densidade e Temperatura na Cromosfera e Baixa Coroa Solar. . . . .	42
2.9 Diagrama da evolução dos ciclos solares desde 1700 até o presente. O diagrama relaciona o número de manchas solares (eixo vertical) com o tempo (eixo horizontal). . . . .	42
2.10 Coroa em extremo ultravioleta durante um ciclo solar, próximo ao mínimo em 1996, passando pelo máximo em 2001, e iniciando um novo mínimo em 2006. . . . .	44
2.11 Exemplo espectro dinâmico com representação eixo frequência invertido. . . . .	46
2.12 Espectro dinâmico de emissões em ondas métricas: da esquerda para a direita superior: emissão tipo I, tipo II e tipo III. Na parte inferior: tipo IV e tipo V. . . . .	48
2.13 Modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar. . . . .	51
2.14 Modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I. Um novo arco magnético move-se num campo magnético coronal pré-existente. Os campos novo e antigo serão separados por uma região de alta densidade de corrente. Onde os campos são fortes a densidade de corrente atingirá o valor crítico para a geração da turbulência íon-som que em última instância resulta na emissão de radiação eletromagnética. . . . .	52

2.15	Espectro dinâmico ilustrando burst tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade.	54
3.1	Configuração Rede e-CALLISTO, em março 2013. Os triângulos em vermelho representam estações fornecendo dados, o triângulo em azul representa o CALLISTO-BLEN, instalado na Suíça e as estrelas as estações que ainda não fornecem ou não mais fornecem dados. . . . .	57
3.2	Cobertura anual rede e-CALLISTO. A área em branco representa os meses do ano e o período do dia em que não existe cobertura da rede. . . . .	58
3.3	Etapas de aquisição e disponibilização de dados dos espectrômetros da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar. . . . .	60
3.4	Diagrama representando a disponibilização dos espectros dinâmicos da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar. . . . .	60
3.5	Antena de 7 m de diâmetro do CALLISTO-BLEN. . . . .	61
3.6	Cobertura anual do CALLISTO-BLEN. Entre os meses de abril e agosto a cobertura estende-se aproximadamente das 04:00 UT às 18:00 UT; já entre setembro e março, essa cobertura concentra-se entre aproximadamente 06:00 UT e 16:00 UT. . . . .	62
4.1	Reprodução da listagem do <i>Space Weather Prediction Center</i> da NOAA, dos eventos em rádio frequências registrados no dia 30 de julho de 2011. Foram assinalados os eventos correspondentes à ocorrência de tempestades de ruído identificados pela sigla RNS. . . . .	64
4.2	Espectro dinâmico de correntes tipo I registradas pelo CALLISTO-BLEN em 30 julho de 2011 ( $\approx$ 06:30 UT) . . . . .	67
4.3	Espectro dinâmico de correntes tipo I registradas pelo CALLISTO-BLEN em 01 agosto de 2011 ( $\approx$ 09:15 UT) . . . . .	67
4.4	Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando a determinação dos parâmetros observacionais: instantes de tempo de início ( $t_i$ ) e de fim ( $t_f$ ), duração total da corrente ( $\Delta t$ ), frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ), frequência central ( $f_c$ ) e largura de banda em frequência ( $\Delta f$ ). . . . .	68
4.5	Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando as derivas negativa (a) e positiva (b). . . . .	69
5.1	Distribuição das correntes tipo I em função da duração total. . . . .	73
5.2	Distribuição das correntes em função da duração total (superior a 50 segundos). A curva mostra o ajuste por uma lei de decréscimo exponencial. . . . .	75
5.3	Distribuição das correntes tipo I em função da frequência inicial. . . . .	76
5.4	Distribuição da duração das correntes tipo I em função de sua frequência inicial. . . . .	77
5.5	Distribuição das correntes tipo I em função da frequência central. . . . .	77
5.6	Distribuição das correntes tipo I em função da largura de banda em frequência. . . . .	78

5.7	Distribuição da largura de banda em frequência das correntes tipo I em função de sua frequência inicial. . . . .	79
5.8	Distribuição das correntes tipo I em função da taxa de deriva em frequência. . .	80
5.9	Distribuição das correntes tipo I em função da velocidade radial positiva. . . .	80
5.10	Distribuição das correntes tipo I em função da velocidade radial negativa. . . .	81
5.11	Distribuição das correntes tipo I em função da intensidade do campo magnético. .	82
5.12	Representação do número de manchas solares. As fases do ciclo solar em que se encontram os dados analisados neste trabalho são identificados por: a) Sarma (1994), b) Elgaroy e Ugland (1970) e c) este trabalho. . . . .	83
5.13	Distribuição das correntes tipo I em função da altura da fonte. . . . .	84



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Principais Características do Sol. . . . .	34
2.2 Rádio emissões solares em ondas métricas . . . . .	48
3.1 Principais especificações dos instrumentos da rede e-CALLISTO. . . . .	59
4.1 Etapas realizadas para identificação e seleção final das 225 correntes tipo I analisadas no presente trabalho. . . . .	66
4.2 Dados do CALLISTO-BLEN, no período de 30/07/11 a 09/08/11, apresentando correntes tipo I selecionados para a análise. . . . .	66
5.1 Comparação dos Parâmetros Observacionais obtidos no presente trabalho com Parâmetros Observacionais de trabalhos anteriores. Na tabela $\eta$ é o número de correntes, $\Delta t$ a duração, dada em segundos, $\Delta B$ a largura de banda, em MHz, e, $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ , a deriva em frequência, em MHz/s. . . . .	85
5.2 Comparação dos Parâmetros Físicos obtidos no presente trabalho com Parâmetros Físicos de trabalhos anteriores. Na tabela $\eta$ é o número de correntes, $B$ o campo magnético, dado em Gaus, $R$ a altura da fonte, em raios solares, e, $v_r$ é a velocidade radial, em km/s. . . . .	85
A.1 Espectrógrafos da rede e-CALLISTO em novembro de 2012. . . . .	97
A.2 Países candidatos a se integrarem à rede e-CALLISTO. . . . .	98
B.1 Largura Banda X Número Correntes. . . . .	99
B.2 Deriva Frequência X Número Correntes. . . . .	99
B.3 Freq. Inicial X Número Correntes. . . . .	100
B.4 Duração X Número Correntes. . . . .	100
B.5 Altura Fonte X Número Correntes. . . . .	100
B.6 Campo Magnético X Número Correntes. . . . .	101
B.7 Velocidade Radial Positiva X Número Correntes. . . . .	101
C.1 O Ciclo Solar com as datas de início, máximo e fim. . . . .	103





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM - Amplitude Modulada

BLEN - *Bleien Observatory* - Zurique, Suíça

CALLISTO - *Compact Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Tra*

CELESTE - Centro Latinoamericano de ESTUDOS Solares TERrestres

CME - *Coronal Mass Ejection* (Ejeção de Massa Coronal)

CONT - Emissão Contínua

DiRaC - Controle Distribuído de Rádio Espectrômetro

EIT - *Extreme ultraviolet Imaging Telescope*

FITS - *Flexible Image Transport System*

FM - Frequência Modulada

GPS - *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

INPE - Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OVRO - *Owens Valley Radio Observatory* - Radioheliógrafo na Califórnia

PERL - *Practical Extraction and Report Language*

RATAN-600 - Radioheliógrafo na Rússia

RNS - *Radio Noise Storm*

SOHO - *Solar and Heliospheric Observatory*

U.A. - Unidade Astronômica

sfu - solar flux unit (1 sfu =  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>Hz)

UT - Tempo Universal

VLA - *Very Large Array* - Radioheliógrafo no Novo México

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N$	–	Densidade Eletrônica
$B$	–	Intensidade do Campo Magnético
$v_r$	–	Velocidade Radial
$v_a$	–	Velocidade de Alfvén
$R$	–	Altura da Fonte
$R_{\odot}$	–	Raio Solar ( $6,96 \times 10^5$ km)
$f_i$	–	Frequência Inicial
$f_f$	–	Frequência Final
$f_c$	–	Frequência Central
$f_p$	–	Frequência de Plasma
$\frac{\Delta f}{\Delta t}$	–	Deriva em Frequência
$\Delta B$	–	Largura de Banda
$\Delta t$	–	Variação do Tempo
$\lambda$	–	Comprimento de Onda
$\nu$	–	Velocidade
$\eta$	–	Número de Correntes
$\mathfrak{R}$	–	Coefficiente de Determinação
$\beta$	–	Parâmetro Beta (razão entre pressão térmica e pressão magnética)
$c$	–	Velocidade da Luz



## 1 INTRODUÇÃO

Quando se observa a olho nú o brilho do Sol e também de bilhões de estrelas, o que se vê é radiação óptica. A luz visível que é observada no Sol provém de uma relativamente estreita camada chamada fotosfera (muitas vezes chamada de superfície, apesar de não ser sólida). Na coroa solar, que é a camada mais exterior do Sol, a emissão óptica é muito tênue, e somente pode ser vista quando a *superfície* é ocultada (por exemplo, durante um eclipse solar total). As primeiras observações da coroa solar durante eclipses foram relatadas por povos indianos, babilônicos e chineses na antiguidade (ASCHWANDEN, 2005).

Como relata Aschwanden (2005), observações regulares de eclipses solares começaram em 1842, sendo observados por experientes astrônomos da época: Airy, Arago, Bailey, Littou e Struve. Registros fotográficos começaram com o eclipse de 1851 na Noruega e na Suíça, com o fotógrafo profissional Berkowski. Durante o século 19, observações visuais e espectroscópicas de proeminências foram realizadas por Pietro Angelo Secchi na Itália e por Charles Augustus Young na Universidade de Princeton. George Ellery Hale construiu um espectroheliógrafo, em 1892, e observou linhas espectrais durante eclipses. Em 1930, Bernard Lyot construiu seu primeiro coronógrafo, um instrumento que ocultava o brilho do disco solar e assim permitiu observações coronais rotineiras, sem a necessidade de se esperar por um raro evento de eclipse solar total.

O Sol, assim como as demais estrelas, emite radiação em grande faixa do espectro além da luz visível, por exemplo, em ondas de rádio. As investigações nestas faixas do espectro contribuem para o melhor entendimento da estrutura, composição e os fenômenos associados à atividade solar.

Em fevereiro de 1942, a combinação de duas circunstâncias ajudou no descobrimento da radiação solar em ondas métricas: o aparecimento do maior grupo de manchas solares até então registrado e a II Guerra Mundial, que fazia com que a Grã-Bretanha monitorasse constantemente o céu com o auxílio de radares. Durante o monitoramento, um forte ruído e uma interferência altamente variável foram reportados pelos operadores do radar e atribuídos à radiação eletromagnética do Sol (WILD; TLAMICHA, 1964; WILD; TLAMICHA, 1965).

O descobrimento foi feito por Hey, que liderava o Grupo de Pesquisa Operacional do Exército Britânico e que investigou a interferência. Hey notou a ocorrência de um grande aumento da radiação solar. O descobrimento foi mantido em sigilo até depois da guerra. Então, em 1945, o primeiro bem documentado exemplo de emissão em ondas métricas e sua associação com outras atividades solares foi publicado por Appleton e Hey (WILD; TLAMICHA, 1965).

Com o fim da guerra, investigações sistemáticas de emissões solares em rádio começaram na Universidade de Cambridge e na Divisão de Radiofísica de Sidney, usando gravadores de rádio que eram por vezes adaptados de antigos radares dos tempos da guerra. Ambos grupos relataram, além de emissões, a ocorrência de persistente e variável radiação, mais tarde chamada *tempestade de rádio*, cuja característica mais notável era sua alta intensidade (WILD; TLAMICHA, 1965).

Devido à atmosfera terrestre, que barra a propagação de radiação em determinados comprimentos de onda, essencialmente dois comprimentos de onda são observados em solo e fornecem informações da coroa solar: comprimentos de onda óptico e rádio. Observações solares na faixa de radiofrequências, desde ondas métricas e decimétricas até milimétricas, têm fornecido resultados que contribuem para um melhor entendimento dos fenômenos eruptivos solares que têm origem nas diferentes camadas da atmosfera solar. Os dados de emissões solares nestas faixas de onda de rádio são importantes para a investigação de diversos problemas ainda em discussão na física solar; questões essas que estão principalmente relacionadas a processos de armazenamento e liberação de energia, à aceleração e ao transporte de partículas energéticas e à caracterização e localização das regiões de aceleração destas partículas (BENZ, 1996).

Diversos fenômenos podem ser registrados em ondas de rádio, que são emissões produzidas por diferentes mecanismos físicos, e estão relacionados às propriedades da coroa solar (como densidade e temperatura) e também do campo magnético coronal.

Tempestades de ruído chamadas tipo I (descritas em detalhes no Capítulo 2) foram o primeiro evento em rádio descoberto em ondas métricas, e são o fenômeno mais comum neste comprimento de onda. Eventos tipo I duram de poucas horas a vários dias (KRUCKER et al., 1995). Contudo, ainda hoje não há uma explicação definitiva para as propriedades observadas destes eventos (TABOADA et al., 2010).

Segundo Spicer et al. (1981), a energia necessária para explicar a rádio emissão em ondas métricas associada com tempestades tipo I (ao redor de  $10^{18}$  erg) é minúscula se comparada com a energia necessária para o aquecimento da coroa solar. Então, o problema principal, além do mecanismo de radiação efetivo, associado com tempestades tipo I não é um problema de energia, mas sim a identificação de qual *forma* de energia livre transporta a tempestade.

Wild e Tlamicha (1965) analisaram eventos tipo I ocorridos durante o ciclo solar 20 e reportaram características espectrais que encontraram repetidamente; a esses eventos deram o nome de *correntes tipo I*. Segundo esses autores, estas características podem ser atribuídas às ondas propagando-se através da coroa solar com velocidades determinadas pela intensidade do campo magnético e da densidade eletrônica.

Ao investigar correntes tipo I, Hanasz (1966), analisou várias características das mesmas e não encontrou distinção entre propriedades físicas de correntes e emissões individuais ou isoladas. A partir desta constatação, aquele autor sugere que, nas considerações para a teoria de radiação tipo I, avalie-se primeiro uma explicação de correntes, para então considerar *bursts* simples como um caso limite de correntes.

## 1.1 Motivação para Desenvolvimento da Dissertação

Ainda que tempestades de ruído tenham sido descobertas durante a década de 40, no século anterior, e sejam o fenômeno mais comum em comprimentos de onda métricos, o conhecimento sobre os processos físicos responsáveis pelas mesmas ainda é escasso.

As tempestades tipo I são as menos estudadas (sendo as do tipo III as mais estudadas). No entanto, com o advento de novos equipamentos e tecnologias de observação, novos dados e descobertas relacionados ao estudo da tempestades de ruído têm sido apresentados por vários pesquisadores (HANASZ, 1966; ELGARROY; UGLAND, 1970; DEGROOT et al., 1976; MELROSE, 1980; KAI et al., 1985; SUNDARAM; SUBRAMANIAN, 2005).

Existe hoje uma grande quantidade de dados sobre a atividade solar em ondas métricas disponíveis e facilmente acessáveis, por exemplo, os dados da rede e-CALLISTO (BENZ et al., 2009), utilizados nesta Dissertação.

Com a dependência cada vez maior de equipamentos de comunicação, como os celulares e computadores, e uma vez que essas transmissões podem ser prejudicadas por perturbações no clima espacial, o estudo das rádio emissões métricas, que podem ser usadas como diagnósticos de diversos processos físicos no Sol, torna-se importante (SODRÉ et al., 2011).

Sendo assim, a motivação para essa dissertação sobre a identificação e a análise de rádio emissão solar tipo I advém da escassez tanto de estudos quanto de conhecimento sobre os processos físicos, bem como uma possível contribuição para o entendimento da dinâmica do clima espacial.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a identificação e a análise de rádio emissões solares em ondas métricas registradas pelo CALLISTO (*Compact Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory*), identificadas como correntes tipo I e associadas a tempestades de ruído, e a determinação de parâmetros físicos da fonte emissora.



### 1.3 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2, são revisados os principais aspectos da fenomenologia e da física das emissões solares observadas em ondas de rádio, com ênfase nas ondas em comprimento métrico, as características da coroa solar e o mecanismo de emissão de plasma (uma vez que esse é o processo mais aceito para as emissões tipo I, que dão origem às correntes).

No Capítulo 3, há uma descrição da rede e-CALLISTO com as principais características dos instrumentos que fazem parte da mesma. Neste mesmo capítulo, são apresentados detalhes do espectrógrafo CALLISTO-BLEN, cujos dados, disponibilizados na internet, foram utilizados neste trabalho.

O Capítulo 4, é reservado à descrição da metodologia de identificação, seleção e análise dos dados de correntes tipo I.

Os resultados obtidos pela análise dos eventos identificados como correntes tipo I são apresentados e discutidos no Capítulo 5, bem como a comparação dos mesmos com resultados previamente publicados.

O Capítulo 6, é reservado às conclusões e considerações finais a respeito do trabalho realizado, dos resultados obtidos e objetivos alcançados. Também neste capítulo, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que venham complementar ou aprimorar esta Dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Espectro Eletromagnético

James Clerk Maxwell descobriu, no século XIX, que campos elétricos e magnéticos oscilando juntos formam uma onda, a qual chamou de onda eletromagnética. As ondas eletromagnéticas movem-se à velocidade da luz ( $c$ ), que no vácuo é  $\approx 300.000$  km/s. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é diretamente proporcional ao produto da frequência pelo comprimento de onda, e pode ser expressa por:  $c = \lambda \times f$ , onde,  $c$  é a velocidade da luz, dada em metros por segundo (m/s),  $f$  é a frequência dada em hertz (Hz) e  $\lambda$  é o comprimento de onda dado em metros (m) (SILVA, 2006; MORAES, 2002). As ondas eletromagnéticas podem ser ordenadas em função de seu comprimento de onda e de sua frequência, sendo esta divisão chamada **espectro eletromagnético**. O espectro eletromagnético é subdividido em função do tipo de processo físico que dá origem à energia eletromagnética, do tipo de interação entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética. O espectro se estende desde comprimentos de onda muito curtos (altas frequências), associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda (SILVA, 2006; MORAES, 2002). As regiões do espectro eletromagnético são mostradas na Figura 2.1.

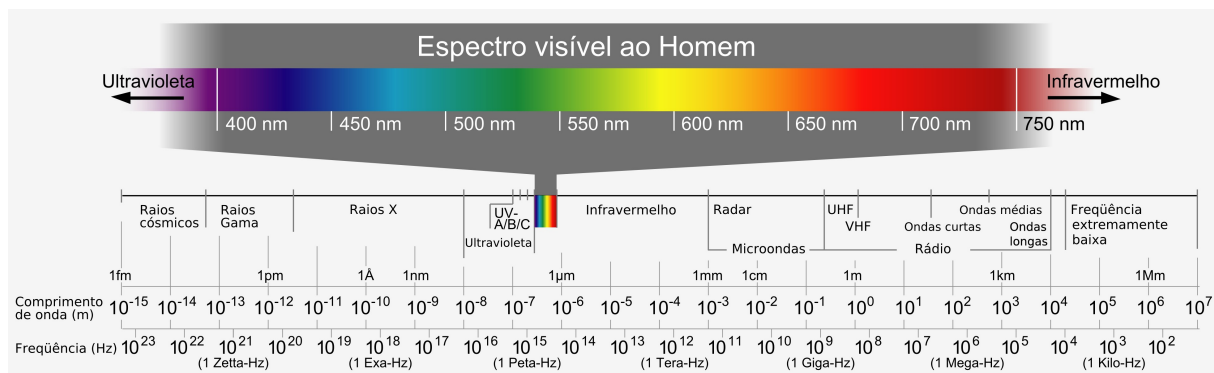


Figura 2.1 - Espectro Eletromagnético mostrando as escalas de comprimento de onda e frequências das diversas faixas do espectro e diversos tipos de radiação. A parte destacada apresenta a faixa do visível.

Fonte: <http://www.sbfisica.org.br/v1/pion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>

Algumas regiões do espectro eletromagnético têm denominações que indicam propriedades especiais, como por exemplo (MORAES, 2002):

- espectro óptico: refere-se à região do espectro eletromagnético que compreende as energias que podem ser detetadas por sistemas ópticos (ultravioleta, visível e infravermelho);
- espectro solar: refere-se à região espectral que compreende os tipos de energia emitidas pelo Sol.
- espectro visível: refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas percebido pelo sistema visual humano, também denominado de luz;
- espectro termal: refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas emitidas pelos objetos terrestres e encontra-se nos intervalos espectrais correspondente ao infravermelho médio e distante.

## 2.2 Observação do Sol em Múltiplos Comprimentos de Onda

O Sol emite radiação em todo espectro eletromagnético; a maior parte da intensidade concentra-se no visível, especificamente em comprimento de onda de 500 nm (SILVA, 2006).

A radiação solar pode ser detectada em vários comprimentos de onda, mas para isso dois fatores devem ser levados em conta: o primeiro tecnológico, dependente de sensores adaptados ao comprimento de onda específico que se deseja analisar; o outro diz respeito à atmosfera terrestre e como ocorre a absorção nas diferentes faixas do espectro. A atmosfera, em função de sua espessura e elementos químicos que a constituem, impõem *janelas* (faixas de comprimentos de onda) que permitem a propagação da radiação. Tais como:

- *janela óptica*: com radiações de comprimento de onda de luz visível de 390 a 760 nm;
- *janela rádio*: permite a passagem de radiação entre 1 mm e 30 m; dependendo das condições atmosféricas, o limite superior para o comprimento de onda pode atingir 150 m.

A Figura 2.2, representa como a atmosfera terrestre absorve a radiação ao longo do espectro eletromagnético. É evidente a janela no visível e a transparência da atmosfera em rádio. Para comprimentos de onda na faixa de rádio, as ondas não são absorvidas pela atmosfera, como acontece com a luz visível, oferecendo assim, uma ferramenta de estudo muito eficiente. Observações em raios-X e UV, por exemplo, devem ser feitas por meio de satélites, para evitar a absorção dessas radiações pela atmosfera terrestre.

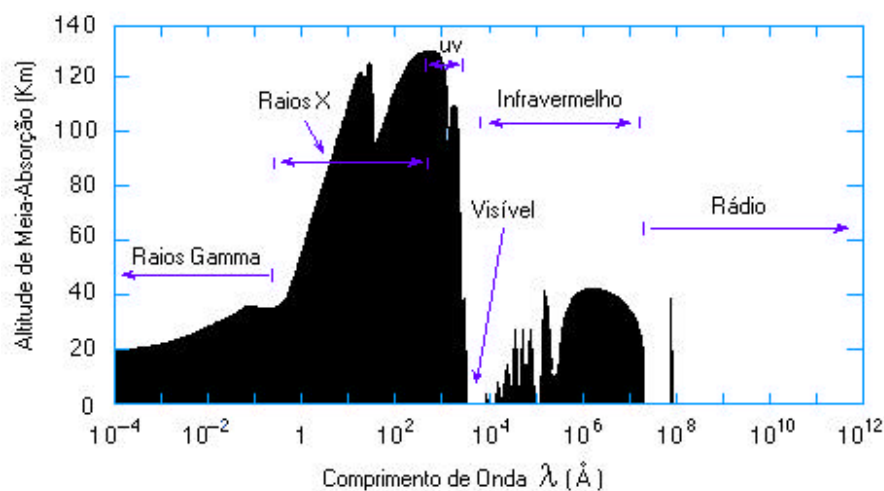


Figura 2.2 - Janelas Atmosféricas mostrando a transparência da atmosfera terrestre para radiação com comprimentos de onda entre  $\approx 390$  e  $760$  nm (janela óptica) e entre  $1$  mm e  $30$  m (janela rádio).

Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/conda.htm>

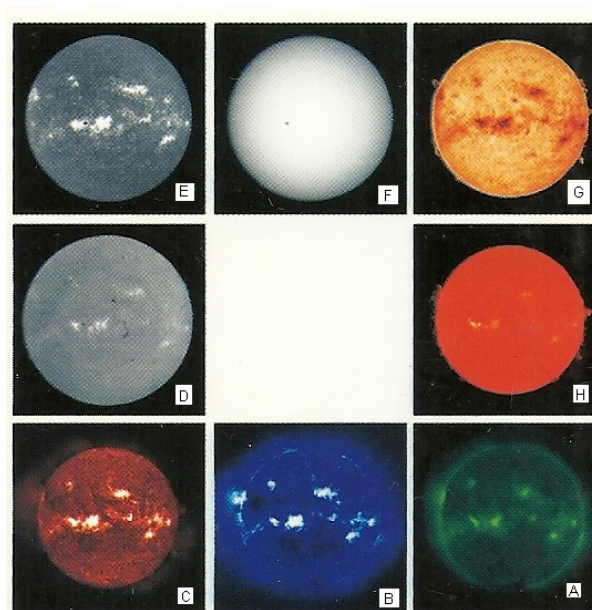


Figura 2.3 - Sol em vários comprimentos onda. A: raios-X; B: extremo ultravioleta; C: ultravioleta; D: linha de emissão do hidrogênio no visível; E: linha emissão do cálcio(ionizado uma vez) no visível; F: luz branca no visível; G: infravermelho; H: rádio (microondas).

Fonte: Silva (2006)

A Figura 2.3 mostra uma imagem do Sol observado em vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

## 2.3 A Estrutura Solar

O Sol é a estrela central do Sistema Solar, é composto basicamente de hidrogênio (74%) e hélio (24%) com traços de outros elementos, incluindo ferro, níquel, oxigênio, silício, enxofre, magnésio, neón, cálcio e cromo. Possui a classe espectral G2V: G2 indica que a estrela possui uma temperatura de superfície de aproximadamente 5 780 K, o que lhe confere uma cor branca (apesar de ser visto como amarelo no céu terrestre, o que se deve à dispersão dos raios na atmosfera); o V (5 em números romanos) na classe espectral indica que o Sol, como a maioria das estrelas, faz parte da sequência principal. A Tabela 2.1 apresenta as principais características do Sol (SILVA, 2006; PRIEST, 1995).

Tabela 2.1 - Principais Características do Sol.

Fonte: Silva (2006), Priest (1995)

Raio	695.500 km
Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Luminosidade	$3,854 \times 10^{26}$ W
Temperatura da superfície	5780 K
Densidade	Média: 1409 kg/m <sup>3</sup> Central: 160.000 kg/m <sup>3</sup>
Idade	4,55 bilhões de anos
Distância Terra-Sol	1 U.A. = $1,496 \times 10^{11}$ m
Composição média	H( $\approx 92,1\%$ ) He( $\approx 7,8\%$ ) O + C( $\approx 0,1\%$ ) Outros( $< 0,1\%$ )
Período Rotação	Equador: $\approx 26$ dias Pólos: $\approx 30$ dias
Gravidade Superfície	274 m/s <sup>2</sup>
Veloc. Escape Superfície	618 km/s

A estrutura solar é basicamente dividida em duas regiões: o interior e a atmosfera solar. O interior é a região do núcleo até a superfície (apesar do Sol não ter uma superfície sólida). Cada uma dessas regiões é subdividida em zonas. A partir da região mais central para fora, elas são: o núcleo, a zona radiativa, a tacomina e a zona convectiva (que compõem o interior solar), a fotosfera, a cromosfera, a região de transição e a coroa (que compõem a atmosfera solar) (OLIVEIRA; SARAIVA, 2004; SILVA, 2006).

Uma representação da estrutura solar pode ser vista na Figura 2.4.

No interior solar, a região mais interna é chamada de núcleo, e corresponde à aproximadamente 10% da massa solar. É no núcleo que ocorrem as reações termonucleares de conversão do hidrogênio em hélio, a fonte de energia que mantém o Sol brilhando. No núcleo, a gravidade puxa toda a massa para o interior e cria uma pressão elevada. Essa pressão é forte o bastante para forçar os átomos de hidrogênio a se unirem em reações de fusão nuclear. Em síntese, quatro átomos de hidrogênio se combinam para criar um

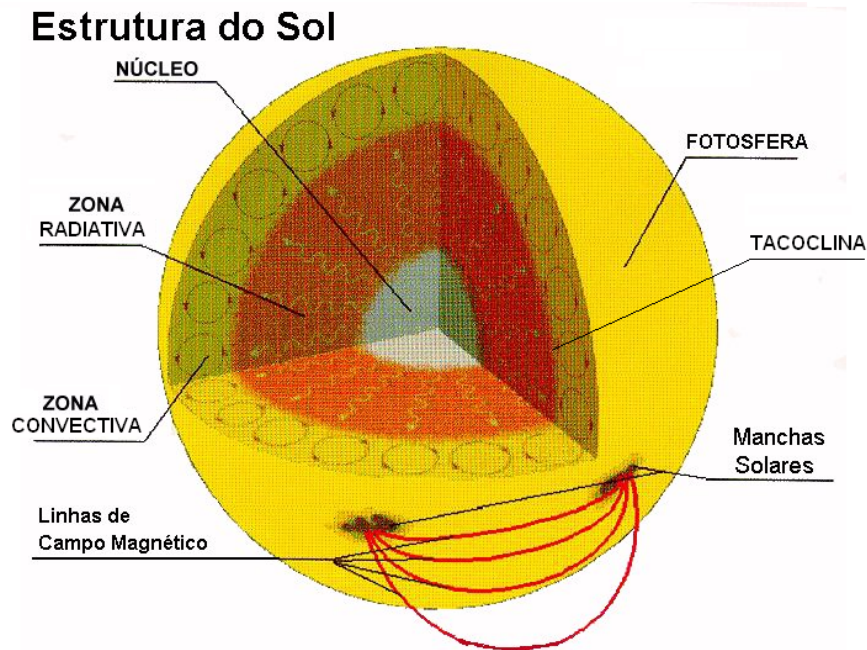


Figura 2.4 - Diagrama representando a divisão da estrutura solar em camadas. Neste diagrama também são representadas as manchas solares e as linhas de campos magnético.  
 Fonte: [www.cdcc.usp.br/cda/producao/sbpc94/fems-04.jpg](http://www.cdcc.usp.br/cda/producao/sbpc94/fems-04.jpg)

átomo de hélio-4 e energia em várias etapas (FREUDENRICH, 2000):

- dois prótons se combinam para formar um deutério (um átomo de hidrogênio com um nêutron), um pósitron (semelhante a um elétron, mas com carga positiva) e um neutrino;
- um próton e um átomo de deutério se combinam para formar um átomo de hélio-3 (dois prótons com um nêutron) e um raio gama;
- dois átomos de hélio-3 se combinam para formar um hélio-4 (dois prótons e dois nêutrons) e dois prótons.

Essas reações são responsáveis por 85% da energia gerada no Sol, os outros 15% vêm das seguintes reações (FREUDENRICH, 2000):

- um hélio-3 e um hélio-4 se combinam para formar o berílio-7 (quatro prótons e três nêutrons) e um raio gama;
- um berílio-7 captura um elétron para se tornar um lítio-7 (três prótons e quatro nêutrons) e um neutrino;
- o lítio-7 se combina a um próton para formar dois átomos de hélio-4.

Um átomo de hélio-4 tem menos massa que os quatro átomos de hidrogênio que iniciaram o processo. A diferença de massa é convertida em energia conforme descreve a teoria da relatividade de Einstein: ( $E = mc^2$ ). A energia é emitida em diversas formas (raio ultravioleta, raios-X, luz visível, infra-vermelho, microondas e ondas de rádio) (FREUDENRICH, 2000). Esta energia gerada no núcleo é transportada para o exterior inicialmente por radiação, através da zona radiativa (SILVA, 2006). A Figura 2.5 ilustra esse processo.

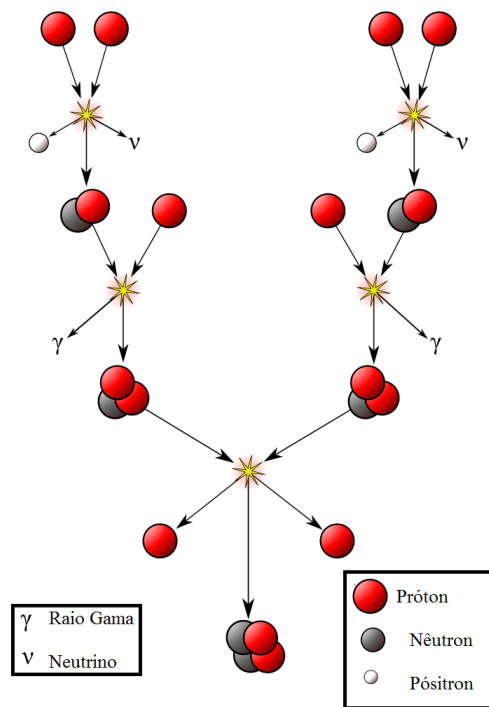


Figura 2.5 - Diagrama da cadeia próton-próton, o ciclo de fusão nuclear que gera a maior parte da energia do Sol.

Fonte: Adaptado de: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:FusionintheSun.png>

A zona radiativa se estende a partir do núcleo até a camada de interface ou *tacoclina*, na base da zona de convecção. É caracterizada pelo transporte de energia por radiação. Nesta camada, a densidade cai de  $20\text{g/cm}^3$  para  $0,2\text{g/cm}^3$ , da base para o topo da zona radiativa (HATHAWAY, 2011).

A camada de interface (*tacoclina*) encontra-se entre a zona radiativa e a convectiva. Detalhes a respeito desta fina camada dão conta de que o campo magnético do Sol é gerado por um dínamo magnético na mesma. Mudanças na velocidade do fluxo de plasma estendem as linhas de campo magnético, tornando-os mais intensos (HATHAWAY, 2011).

A zona convectiva é a camada mais externa do interior solar. A convecção ocorre

quando o gradiente de temperatura (taxa na qual a temperatura diminui com a altura ou o raio) se torna maior que o gradiente adiabático (taxa na qual a temperatura diminui se um volume maior de plasma é transferido sem adição de calor). Quando isso ocorre, o plasma deslocado para cima será mais quente que os que estarão à sua volta, e continuará a subir. O movimento convectivo transporta calor muito rapidamente, então, o plasma expande-se e resfria à medida que sobe, tornando a descer (HATHAWAY, 2011).

Conforme mencionado anteriormente, o Sol não possui uma superfície sólida, pois é uma esfera de gás. A chamada *superfície* representa a região a partir da qual não é possível visualizar as camadas mais internas. A partir desta região, considera-se a atmosfera solar, que é bastante rarefeita (SILVA, 2006).

A camada mais interna da atmosfera, é a chamada *fotosfera*, que tem de 300 a 400 km de espessura. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto. A densidade é de cerca de  $10^{13} - 10^{15}$  partículas por centímetro cúbico (CECATTO, 2003).

Acima da fotosfera se encontra a cromosfera, uma camada irregular, onde a temperatura atinge milhares de graus. A esta temperatura elevada, o hidrogênio emite luz com uma cor avermelhada (emissão  $H\alpha$ ) (HATHAWAY, 2011). Esta camada é observada em comprimentos de onda no visível, no ultravioleta e em frequências de rádio (SILVA, 2006).

A fronteira entre a cromosfera e a coroa é conhecida como região de transição, uma fina camada de poucas centenas de quilômetros na qual a temperatura se eleva dos valores cromosféricos até cerca de 1 - 2 milhões de graus, já na base da coroa. A densidade decresce a valores de  $10^9 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , valores estes típicos da coroa solar calma (característica de períodos de baixa atividade solar) (CECATTO, 2003).

A camada mais externa da atmosfera solar é chamada *coroa*. Os eventos analisados nesta Dissertação ocorrem na coroa, assim uma ênfase maior será dada a essa região da atmosfera solar na seção a seguir.

## 2.4 Coroa Solar

A coroa solar é a tênue atmosfera exterior do Sol, cujos limites não são plenamente definidos e que se estende a partir de alguns milhares de quilômetros acima da fotosfera até o meio interplanetário. Sua densidade é 2 a 3 ordens de grandeza mais baixa do que a encontrada na cromosfera. A temperatura do gás coronal é muito elevada, tipicamente ao redor de dois milhões de graus (MCLEAN, 1981). Uma das consequências dessa alta



temperatura é que o hidrogênio é totalmente ionizado, a condutividade elétrica e térmica são muito altas e o plasma coronal emite fortemente em raios-X e ondas de rádio em comprimento métrico (30 - 300 MHz) (MCLEAN, 1981).

A coroa solar é melhor observada durante os eclipses totais do Sol, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da Lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. Desta forma, durante o eclipse, como o disco solar é ocultado pela lua, é possível observar e estudar a coroa. Como a temperatura é extremamente alta, o gás encontra-se na forma de plasma, produzindo assim os elétrons e íons que formam o chamado vento solar (fluxo de elétrons e íons positivos que são expulsos da coroa solar em alta velocidade e propagam-se pelo meio interplanetário)(CECATTO, 2003).

A Figura 2.6 mostra a coroa solar em raio-X mole.

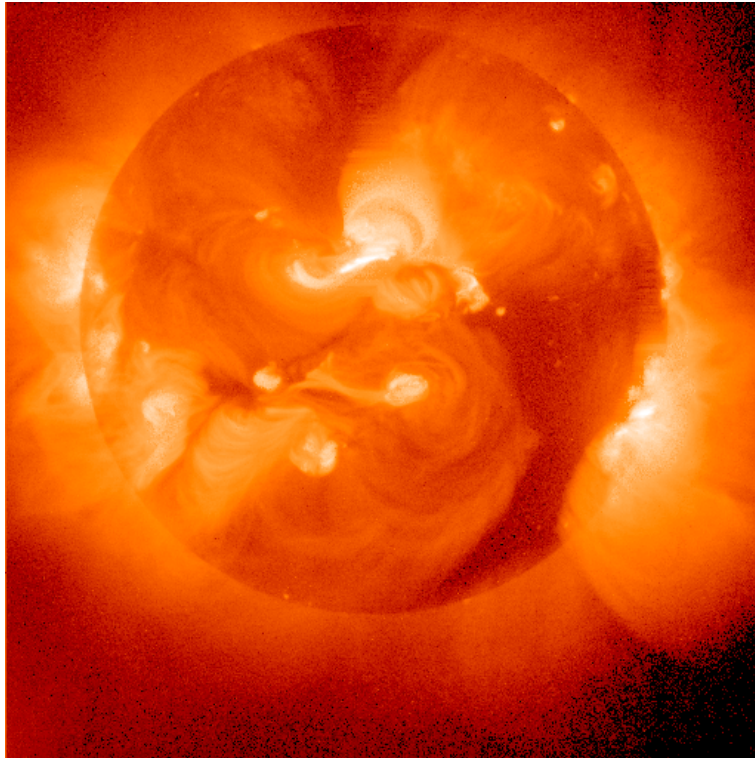


Figura 2.6 - Imagem Yohkoh Solar Observatory mostrando a coroa solar em raio-X. Esta imagem foi gravada em 14/12/2001.

Fonte: <http://www.lmsal.com/SXT/homepage.html>

A coroa solar se subdivide em três regiões, e todas variam em extensão durante o ciclo solar (subseção 2.4.1) (ASCHWANDEN, 2005):

- regiões ativas: são localizadas em áreas de forte concentração de campo magnético. Devido a sua natureza bipolar, regiões ativas são formadas principalmente

de linhas de campo magnético fechadas. A temperatura é de  $\approx 2$  a  $6$  MK;

- regiões de sol calmo: abrangem todas as regiões de campo magnético fechado (excluindo-se regiões ativas), claramente demarcando a região de Sol calmo do território de buracos coronais, que envolvem regiões de campo magnético aberto. A variação da temperatura fica entre  $\approx 1$  e  $2$  MK;
- buracos coronais: são dominadas por linhas de campo magnético abertas, que atuam como um eficiente condutor de fluxo de plasma aquecido da coroa para o vento solar. A temperatura nessa região é inferior  $1$  MK.

Os campos magnéticos desempenham um importante papel na dinâmica, bem como na formação de estruturas na coroa solar (RAMESH et al., 2010).

Regiões de campo magnético aberto são mais comuns nas regiões polares, e algumas vezes estendem-se em direção ao equador, conectam a superfície solar com o campo interplanetário e são a fonte do vento solar rápido ( $\approx 800$  km s<sup>-1</sup>).

Regiões de campo aberto são mais frias porque o transporte de plasma é muito eficiente, enquanto regiões de campo fechado são quentes porque o plasma aquecido é aprisionado e não pode fluir. A diferença de temperatura entre o Sol calmo e regiões ativas é consequência de diferentes taxas de fluxo magnético emergente, taxas de aquecimento, baixa taxa de condutividade, baixa taxa de radiatividade e baixa taxa de vento solar (ASCHWANDEN, 2005).

Uma consequência da configuração de campo aberto é o eficiente transporte de plasma para fora da heliosfera<sup>1</sup> sempre que o plasma cromosférico é aquecido nos pés dos arcos coronais (tubos magnéticos preenchidos com plasma aquecido, moldados pela geometria de campo magnético coronal) (ASCHWANDEN, 2005).

Regiões de campo fechado, ao contrário, contém principalmente linhas de campo fechado na coroa até alturas em torno de um raio solar, que abrem-se a altas altitudes e conectam-se eventualmente na heliosfera, e produzem a componente lenta do vento solar ( $\approx 400$  km s<sup>-1</sup>) (ASCHWANDEN, 2005).

Segundo Ramesh et al. (2010), conforme a distância radial (a partir da fotosfera) a coroa pode ser dividida em:

- Coroa Superior:  $R > 2 R_{\odot}$ ;

---

<sup>1</sup>A Heliosfera é a região tridimensional em torno do Sol que é preenchida pelo vento solar e o IMF (campo magnético interestelar). O tamanho da heliosfera acredita-se ser  $100$  U.A. ou mais, e é determinado pelo equilíbrio entre a pressão dinâmica do vento solar e a pressão do meio interestelar. O limite entre o plasma do vento solar e o plasma interestelar é conhecido como *heliopausa* (FORSYTH, 2009)

- Média Coroa:  $0,2 R_{\odot} < R < 2 R_{\odot}$  e
- Coroa Inferior:  $< 0,2 R_{\odot}$ .

A coroa solar é altamente heterogênea, devido à estrutura do campo magnético. O parâmetro decisivo é a razão da pressão térmica e da pressão magnética também chamado parâmetro  $\beta$  de plasma (ASCHWANDEN, 2005), ou seja:

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m} \quad (2.1)$$

O campo magnético  $B$  exerce a força de Lorentz sobre as partículas carregadas do plasma coronal, constituído de elétrons e íons, guiando-os em um giromovimento espiral ao longo das linhas de campo magnético. Somente quando a energia cinética excede a energia magnética (isto é, a altas temperaturas e baixos campos magnéticos), as partículas podem escapar dessa órbita de giro e difundir-se através do campo magnético. O parâmetro crítico entre esses dois regimes é o parâmetro  $\beta$  de plasma (ASCHWANDEN, 2005). Portanto, o parâmetro  $\beta$  estabelece a condição para o plasma estar ou não confinado nas estruturas magnéticas (ASCHWANDEN, 2005).

A Figura 2.7 mostra a variação do parâmetro  $\beta$  de plasma com a altura na atmosfera solar, e as regiões em que o plasma é confinado ( $\beta < 1$ ) ou não ( $\beta > 1$ ).

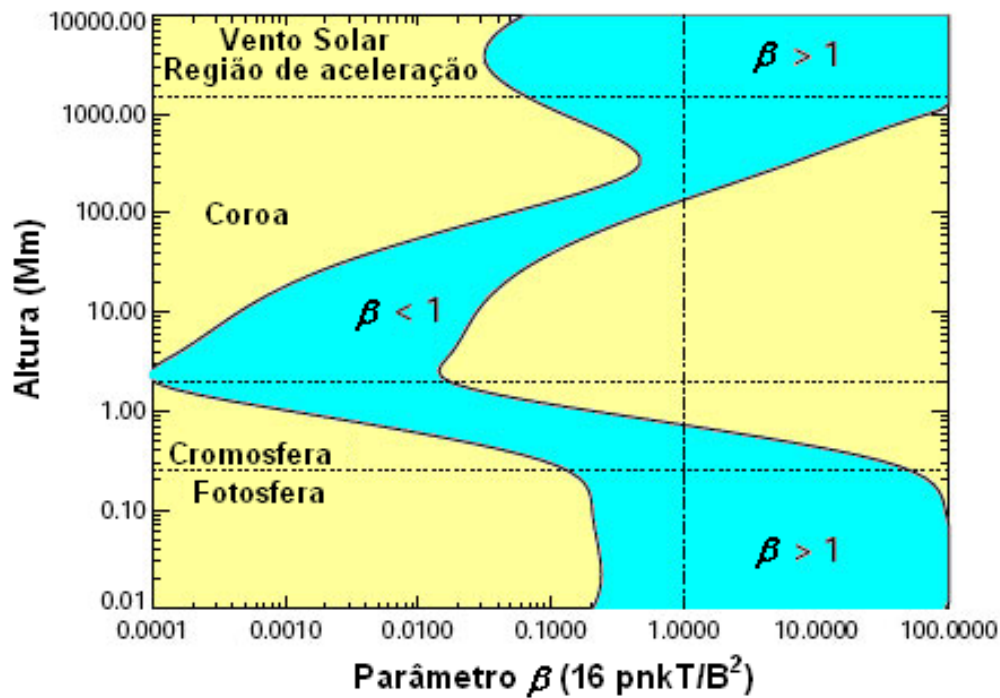


Figura 2.7 - Variação do parâmetro  $\beta$  de Plasma em função da altura na atmosfera solar.  
 Fonte: Adaptado de Aschwanden (2005).

A densidade de partículas na coroa solar, e mesmo na cromosfera, é muito menor que o melhor vácuo que pode ser gerado em um laboratório na Terra. A densidade eletrônica é na faixa de  $\approx 10^6 \text{ cm}^{-3}$  na coroa superior e  $\approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$  na base de regiões calmas, e pode aumentar a  $\approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  nos arcos magnéticos e plasma confinados (ASCHWANDEN, 2005).

A Figura 2.8 ilustra a distribuição de densidade e temperatura na cromosfera e baixa coroa solar.

Como na coroa a pressão térmica é geralmente menor que a pressão magnética ( $\beta < 1$ ), o transporte de plasma acontece somente ao longo das linhas de campo, enquanto que a difusão transversal ao campo é fortemente inibida. Desta forma, cada arco coronal representa um sistema termicamente isolado. Uma consequência disto é que a coroa pode apresentar muitos arcos com diferentes temperaturas (ASCHWANDEN, 2005).

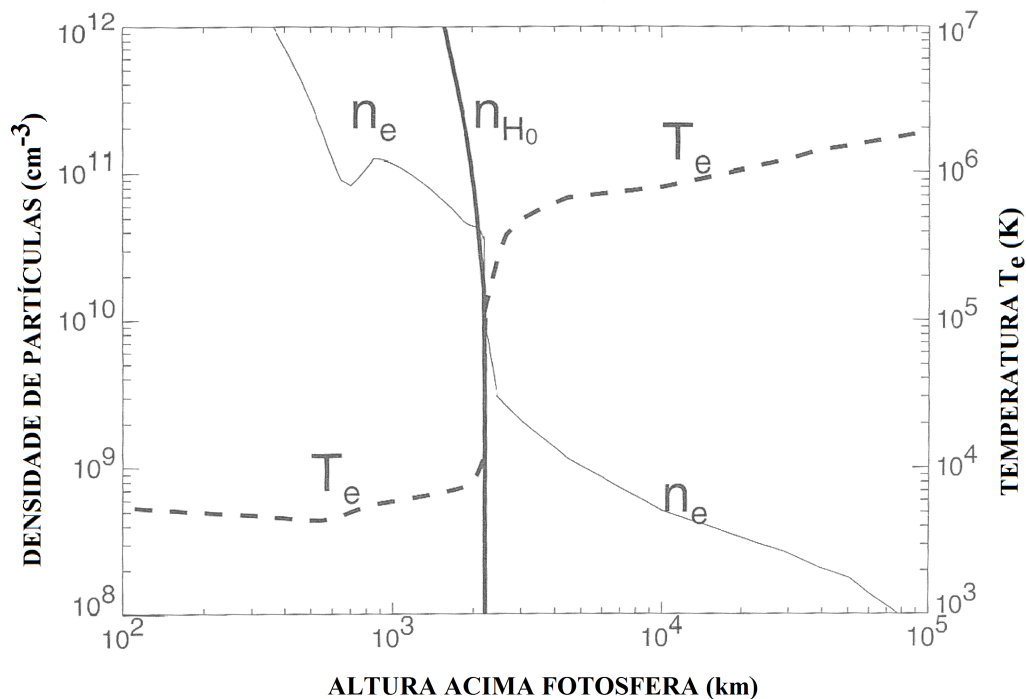


Figura 2.8 - Distribuição de Densidade e Temperatura na Cromosfera e Baixa Coroa Solar.  
 Fonte: Adaptado de Aschwanden (2005).

### 2.4.1 O Ciclo Solar

A maioria das características da emissão solar está diretamente relacionada à atividade solar. O aspecto mais marcante da atividade é o ciclo de aproximadamente 11 anos, período no qual o número de manchas solares varia, oscilando entre períodos de mínimo e máximo (CECATTO, 2003). A Figura 2.9 mostra a evolução dos ciclos solares desde 1700 até o presente ano.

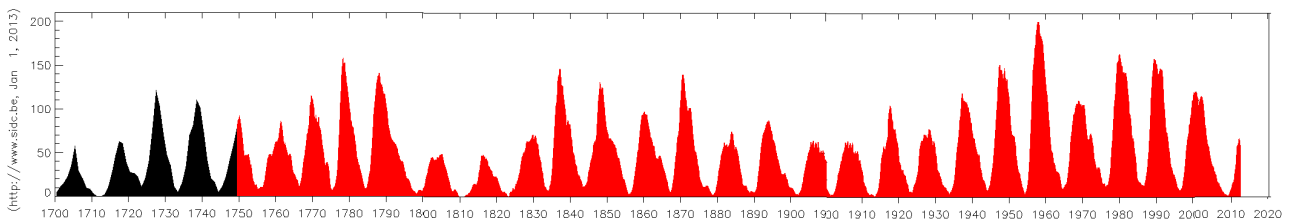


Figura 2.9 - Diagrama da evolução dos ciclos solares desde 1700 até o presente. O diagrama relaciona o número de manchas solares (eixo vertical) com o tempo (eixo horizontal).

Fonte: <http://www.sidc.be>

Muitas propriedades do Sol variam de acordo com o período do ciclo solar. Além das variações bem conhecidas nos padrões de campo magnético (por exemplo, a deriva equatorial da zona de manchas solares, inversão dos campos magnéticos polares), variam também a ocorrência dos eventos energéticos e eruptivos, a forma do espectro da coroa, o fluxo de raios cósmicos na heliosfera interna, e também as frequências acústicas dos modos próprios do Sol (SCHUSSLER, 2005).

Por conta dessa variabilidade, durante o máximo do ciclo ocorre um grande aumento na ocorrência de fenômenos energéticos que têm lugar nas regiões ativas associadas às manchas. Estes fenômenos são chamados de explosões, que são súbitas liberações de energia magnética que estavam concentradas nas regiões ativas, e que acontecem por 3 processos possíveis: aquecimento do plasma, ejeção de matéria e emissão de radiação (PRIEST, 1995).

Assim, devido ao fato dessa variabilidade afetar diretamente a forma do espectro da coroa, e como já mencionado, os eventos analisados neste trabalho acontecerem nesta região do Sol, é destacado a seguir algumas características da coroa em cada fase do ciclo solar.

#### 2.4.1.1 A Características da Coroa Durante as Fases do Ciclo Solar

As características básicas da coroa são controladas pelo dínamo magnético e pelas variações do ciclo solar. Algumas características da coroa na fase de alta atividade do ciclo solar (máximo) são (GOLUB; PASACHOFF, 2009):

- a fração da superfície solar coberta por regiões ativas são relativamente abundantes;
- as regiões ativas são identificadas como *entidades distintas*, e aparecem em duas bem definidas bandas de latitude acima e abaixo do equador solar e
- regiões ativas emergidas estão conectadas ao nível coronal por arcos interconectados, de modo que, cada banda de latitude nos hemisférios norte e sul aparenta ser um único e longo fluxo emergido.

No mínimo solar a coroa tem um aspecto completamente distinto do período de máximo. Nesta fase do ciclo solar as regiões ativas estão praticamente ausentes, com pequenas regiões isoladas e ocasionais. Tipicamente as regiões ativas que estão presentes durante o período de mínimo solar, ocorrem a altas latitudes, e representam o primeiro fluxo magnético a emergir no novo ciclo solar, que já começa quando o ciclo anterior está terminando. A principal característica da coroa no mínimo solar é que ela se encontra

mais tênue do que no período de máximo, devido à ausência de grandes regiões ativas. Nas pequenas e ocasionais regiões ativas, principalmente a altas latitudes, a polaridade do campo magnético é reversa à do ciclo solar prévio (GOLUB; PASACHOFF, 2009).

Durante as fases ascendente e descendente do ciclo solar, a caracterização nem sempre é precisa, pois conta com contribuições de regiões ativas e de remanescentes de regiões ativas do ciclo prévio, que se difundem através da superfície, e, agora aparecem como uma extensa e fraca estrutura em quantidades aproximadamente iguais (GOLUB; PASACHOFF, 2009).

A Figura 2.10 mostra a coroa solar em extremo ultravioleta, durante um ciclo solar (23), evidenciando a variabilidade da coroa durante as fases do ciclo.

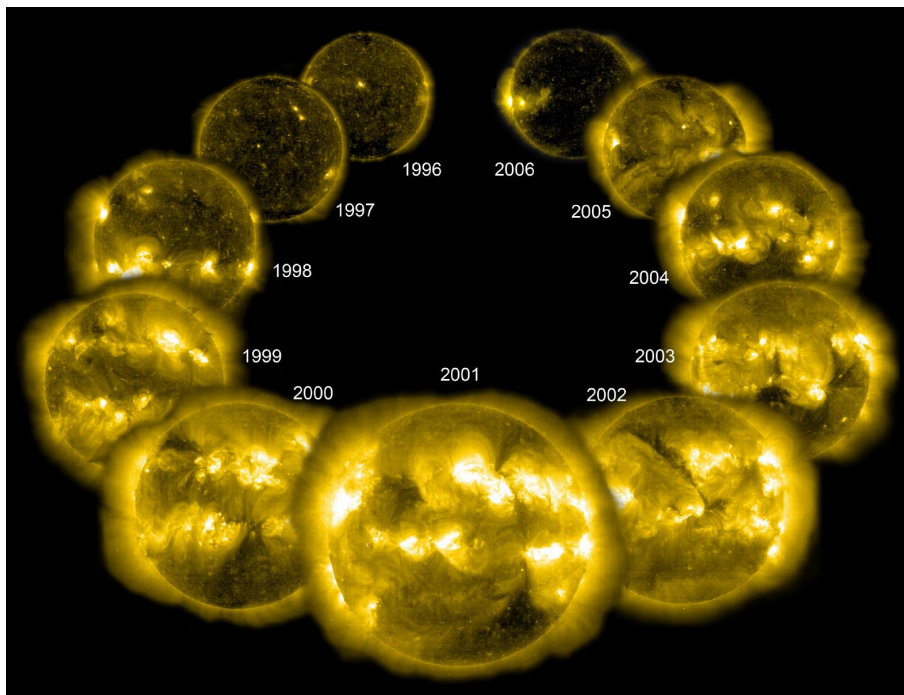


Figura 2.10 - Coroa em extremo ultravioleta durante um ciclo solar, próximo ao mínimo em 1996, passando pelo máximo em 2001, e iniciando um novo mínimo em 2006.

Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/284cycle.jpg> .

A influência dessa variabilidade nos dados analisados na presente Dissertação serão discutidos no Capítulo 5.

## 2.5 Rádio Emissão Solar

O plasma possui uma frequência característica denominada *frequência de plasma*, que são oscilações de elétrons livres em torno de suas respectivas posições de equilíbrio.

O plasma oscila em inúmeras outras frequências, sendo que cada uma é o resultado da presença ou não de campos magnéticos externos, da geometria destes mesmos campos, da temperatura dos íons e também da propagação de ondas eletromagnéticas que viajam pelo plasma, entre elas as ondas de *Alfvén*<sup>2</sup> (KAI et al., 1985).

Em rádio há uma variedade de mecanismos de emissão que irradiam em frequências características:

- Emissão Giromagnética (ROSAL, 2003): é a radiação emitida por partículas carregadas quando estão espiralando num campo magnético; é classificada de acordo com a velocidade das partículas em:
  - a) ciclotrônica: para partículas não relativísticas;
  - b) girossincrotrônica: para partículas semi-relativísticas;
  - c) sincrotrônica: para partículas ultra-relativísticas.
- *Bremsstrahlung*: também conhecido como emissão livre-livre (*free-free emission*), vem do alemão e significa *radiação de freamento*; essa emissão ocorre devido à desaceleração causada pelo campo de uma carga sobre outra (RYBICKI; LIGHTMAN, 1979) e
- Emissão de Plasma: processo de emissão em que a energia das ondas de Langmuir (detalhadas a seguir) é parcialmente convertida em radiação (KAI et al., 1985; MCLEAN; LABRUM, 1985).

Nas ondas de Langmuir os elétrons do plasma são deslocados de sua posição de equilíbrio em relação aos íons, que, devido à inércia, permanecem praticamente estacionários. Isso gera uma diferença de potencial, que por sua vez, gera campos elétricos restauradores, que tendem a trazer novamente os elétrons para a posição de equilíbrio inicial. No entanto, devido à força restauradora, os elétrons sofrem um movimento oscilatório em torno da posição de equilíbrio. Esta oscilação recebe o nome de *onda de Langmuir* e sua frequência de oscilação é igual à frequência de plasma, sendo dependente apenas da densidade do plasma local (CHEN, 1983).

A emissão de plasma é o processo dos eventos solares apresentados neste trabalho; suas características observacionais são a banda estreita de emissão, próxima à frequência de plasma (KAI et al., 1985).

---

<sup>2</sup>Ondas de Alfvén são ondas transversais que se propagam ao longo das linhas de campo magnético e podem ser geradas em qualquer fluido eletricamente condutor permeado por um campo magnético (COSTAJR et al., 2011)



Uma emissão isolada, chamada comumente de *burst* é o fenômeno de menor duração observado em uma emissão solar em ondas de rádio. É também o fenômeno básico em uma tempestade de ruído (ELGARROY, 1961). Assim, como utilizado por Elgaroy (1961), os termos emissão tipo I, *burst* tipo I ou simplesmente *burst* será utilizado no presente trabalho, significando um fenômeno individual de curta duração, banda estreita, e que tem essencialmente um aumento e uma diminuição na sua intensidade. Se um distúrbio viaja em direção ao exterior do Sol e cada altura gera radiação na frequência de plasma local, então o movimento vertical será detectado em um *espectro dinâmico de rádio* apresentando taxa de deriva a uma razão que depende da velocidade do distúrbio (DULK, 1985). Um espectro dinâmico é o registro de uma rádio emissão em tempo x frequência x intensidade. Historicamente, o eixo das frequências, representado na vertical, é invertido, ou seja, apresenta crescimento para baixo. Isto se deve ao fato de que a frequência da emissão registrada é diretamente proporcional à densidade eletrônica do plasma da atmosfera solar, que, por sua vez, é inversamente proporcional à altura (distância a partir da fotosfera solar). Assim, para as rádio-emissões representadas em espectros com o eixo de frequência invertido, fica mais evidente o deslocamento da fonte na atmosfera solar, associado à deriva em frequência mostrada no espectro (DUTRA, 2010). Um espectro dinâmico pode ser observado na Figura 2.11.

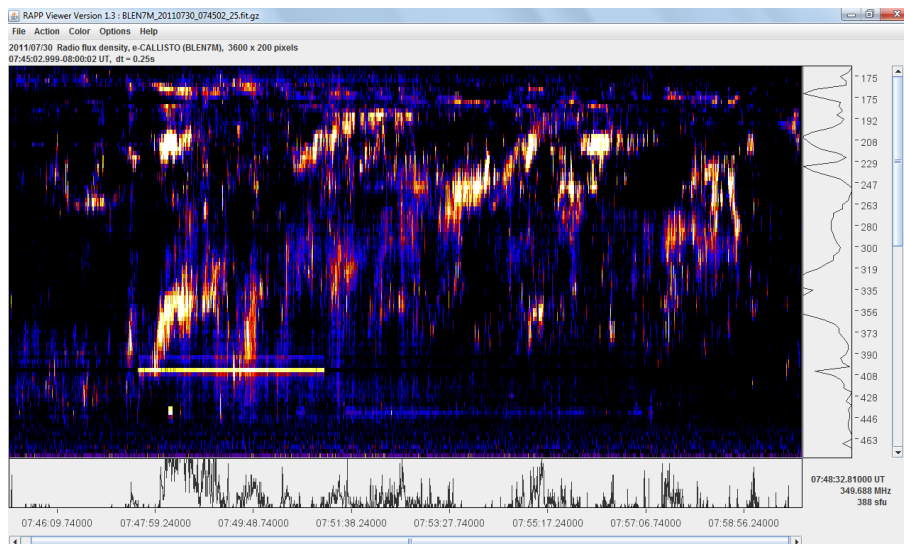


Figura 2.11 - Exemplo espectro dinâmico com representação eixo frequência invertido.

Fonte: Adaptado de: <http://www.e-callisto.org/>

A partir do estudo das morfologias dos espectros dinâmicos de emissões, Wild e McCready (1950), dividiram *bursts* de ondas métricas em três classes que eles chamaram tipos I, II e III, a saber:

- tipo I: apresentam banda estreita em frequência e curta duração, que ocorrem devido à aceleração local dos elétrons até energias de algumas vezes a energia térmica e são acompanhadas por uma emissão contínua de banda larga  $\approx 50 - 100$  MHz.
- tipo II: caracterizadas por apresentar um par de emissões harmônicas (no fundamental e segundo harmônico) com taxa de deriva lenta e largura de banda instantânea estreita. A emissão harmônica ocorre provavelmente devido à emissão de plasma dos elétrons acelerados dentro da frente de choque; a presença da deriva, de alta para baixa frequência, está associada ao movimento de uma onda de choque se propagando para fora, gerada pela liberação de energia durante um *flare* solar ou aos efeitos de propagação de *CME* (do inglês Coronal Mass Ejection);
- tipo III: representam emissões intensas com altas taxas de deriva em frequência (positiva ou negativa); geralmente acontecem em grupos, com duração total de minutos.

Existem ainda outros dois tipos de *bursts*:

- tipo IV: são divididas em dois grupos distintos: tipo IV estacionário e tipo IV não-estacionário. A emissão classificada como estacionária representa uma emissão contínua intensa de banda larga, que sucede um grande *flare* solar. Já uma emissão tipo IV não-estacionária corresponde a uma fonte de emissão contínua em movimento;
- tipo V: são emissões contínuas, geralmente na faixa de frequências entre 10 e 100 MHz, com duração de cerca de 2 minutos, que ocorrem durante ou logo após um grupo de explosões tipo III.

A Figura 2.12 mostra os espectros dinâmicos com exemplos típicos dos tipos de emissão registradas em ondas métricas e um resumo das propriedades das emissões métricas é dado na Tabela 2.2.

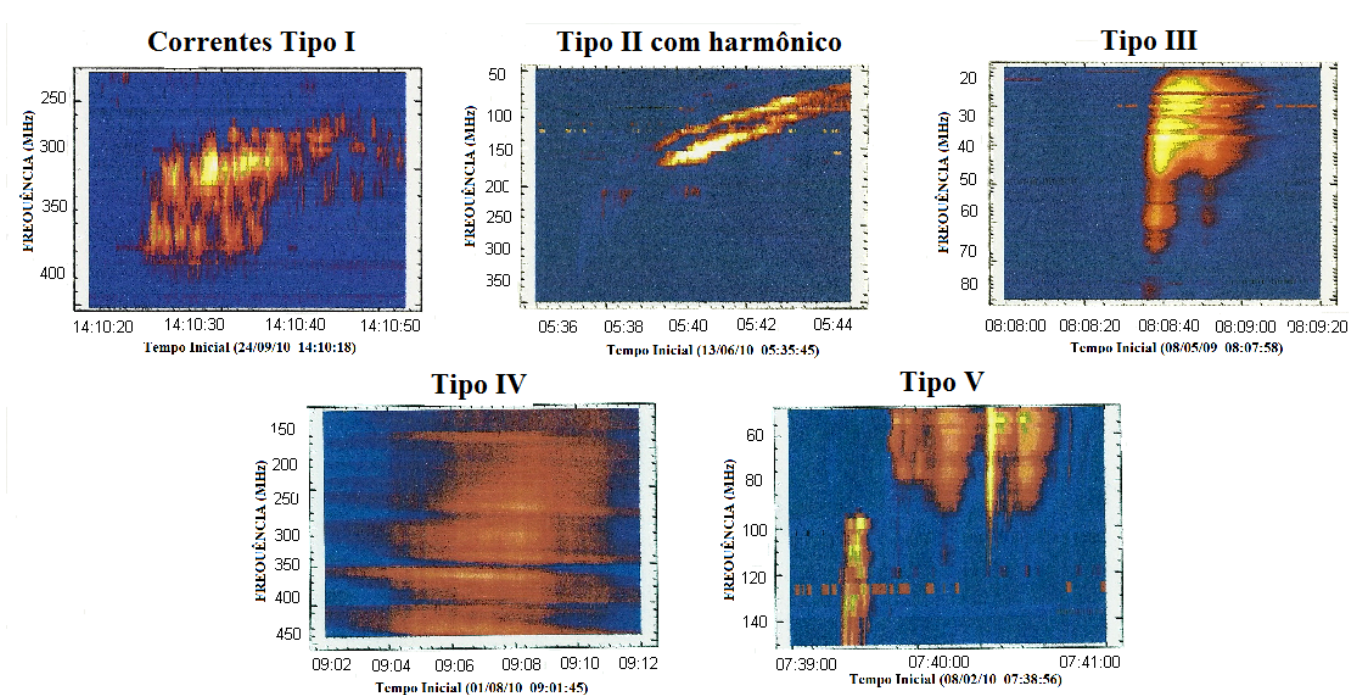


Figura 2.12 - Espectro dinâmico de emissões em ondas métricas: da esquerda para a direita superior: emissão tipo I, tipo II e tipo III. Na parte inferior: tipo IV e tipo V.

Fonte: Adaptado de Monstein (2011)

Tabela 2.2 - Rádio emissões solares em ondas métricas .

Fonte: Adaptado de Benz et al. (2009).

Tipo	Largura de Banda (MHz)	Duração (s)	Fonte provável de energia	Mecanismo de emissão sugerido
I	4*	1*	dinâmica coronal	turbulência ondas plasma
II	4	300	ondas choque	turbulência choque
II	20	2	feixe elétrons	instabilidade <i>bump on tail</i>
III	100	2	feixe elétrons	instabilidade <i>bump on tail</i>
IV	200	1000	-	instab. cone perda (inconclusivo)
V	30	20	instab. de feixe	não conclusivo

\* Largura de banda e duração típicas para uma frequência média de 200 MHz.

Exceto para as emissões tipo III, os mecanismos de emissão para os *bursts* métricos ainda apresentam incertezas, apesar de serem geralmente assumidos como não térmicos. Detalhes podem ser obtidos nas referências de revisão: Kundu (1965), Krüger (1979), McLean e Labrum (1985) e Benz (2002).

## 2.6 Emissão Tipo I

Elgaroy (1961) estudando emissões tipo I, encontrou propriedades espectrais distintas para as mesmas. Assim, as dividiu nas seguintes subclasses:

- tipo I(s): *burst* estável, sem deriva em frequência;
- tipo I(d): *burst* com deriva de frequência de alta para baixa;
- tipo I(r): *burst* com deriva em frequência reversa, isto é, de baixa para alta frequência;
- tipo I(c): *burst* curvado, deriva de frequência irregular;
- tipo I(o): *burst* com oscilação de frequência média;
- tipo I(f): *burst* de banda estreita com deriva de frequência rápida. Tipo I(fd) significa deriva rápida, enquanto I(fr) significa deriva rápida reversa;
- tipo I(x): casos dúbios, não passíveis de classificação.

Em 1976, Mangeney e Veltri sumarizaram as principais características de *bursts* tipo I:

- curta duração de 0,1 a 3 s, diminuindo com a frequência;
- largura de banda estreita (diminui com a frequência);
- sobrepostos em um contínuo de banda larga;
- alta polarização circular;
- variação da intensidade de 1 a 100 sfu;
- dimensão aparente nos rádio telescópios atuais de até poucos minutos de arco. A correspondente temperatura de brilho atinge valores maiores que  $10^9$  K;
- em alguns casos, a frequência deriva para alta ou para baixa frequência a uma razão de poucos décimos de MHz/s até 200 MHz/s;
- algumas vezes, *bursts* tipo I tendem a se agrupar em aglomerados de dezenas ou centenas formando *correntes* de banda estreita, que geralmente derivam lentamente em frequência.

## 2.7 Tempestades

Rádio emissão solar de longa duração em comprimento de onda métrico (30 MHz a 300 MHz) ou decamétrico (3 MHz a 30 MHz) composta de milhares de *bursts* de curta duração sobrepostos a um contínuo de variação lenta é frequentemente observada, e muitas vezes é conhecida como **tempestade** (KAI et al., 1985).

A longa duração é uma das características que distingue tempestades de outros tipos de emissão solar em rádio. Elas consistem de numerosos *bursts* de curta duração e é plausível que se suponha que cada um desses *bursts* corresponda a uma aceleração de elétrons supratérmicos (KAI et al., 1985).

Essas tempestades aparecem somente numa limitada faixa de frequências, que, segundo Malville (1962), raramente está acima de 350 MHz ( $\lambda = 0,8$  m) ou abaixo de 150 MHz ( $\lambda = 2,0$  m). Assumindo que a frequência de emissão das fontes de tempestades tipo I está próxima do nível de plasma local correspondente, esta distribuição indica que tempestades tipo I são um fenômeno da média coroa (KAI et al., 1985).

Os principais parâmetros observacionais de uma tempestade tipo I são:

- largura de banda: desde algumas dezenas de MHz até aproximadamente um máximo de 100 MHz, o que sugere que a fonte da tempestade está confinada em um intervalo de altura relativamente pequeno na coroa solar. A largura de banda extremamente estreita de *bursts* individuais pressupõe que a aceleração de elétrons ocorre sobre uma distância muito pequena dentro da região de origem da tempestade (KAI et al., 1985);
- tempo de vida: o tempo de vida médio de *bursts* individuais aumenta com a diminuição da frequência. Tanto o tempo de vida curto quanto a largura de banda estreita sugerem que elétrons acelerados perdem sua energia numa curta distância. O aumento do tempo de vida com a diminuição da frequência central sugere que o aumento de altitude na coroa corresponde a um aumento no tempo de relaxamento de feixes de elétrons ou ondas de plasma excitados pelo feixe (KAI et al., 1985);
- deriva de frequência: Elgaroy (1961) encontrou que *bursts* tipo I podem apresentar deriva de frequência positiva ou negativa, e uma única tempestade pode conter uma mistura de *bursts* com deriva positiva ou negativa. Estes resultados sugerem que os elétrons acelerados responsáveis pelos *bursts* podem fluir para cima ou para baixo na região de origem, ou podem ser aprisionados num nível de frequência de plasma constante.

De acordo com o modelo de McLean (1981), a região fonte de tempestades tipo I é em forma colunar, emitindo diferentes frequências em diferentes alturas na coluna. A Figura 2.13 apresenta um modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar.

Sabe-se que tempestades tipo I são muitas vezes, talvez sempre, iniciadas pela introdução de novas estruturas magnéticas em campos magnéticos coronais pré-existentes; isto significa que os campos magnéticos coronais mudam muito rapidamente na direção de fora para dentro da nova estrutura magnética.

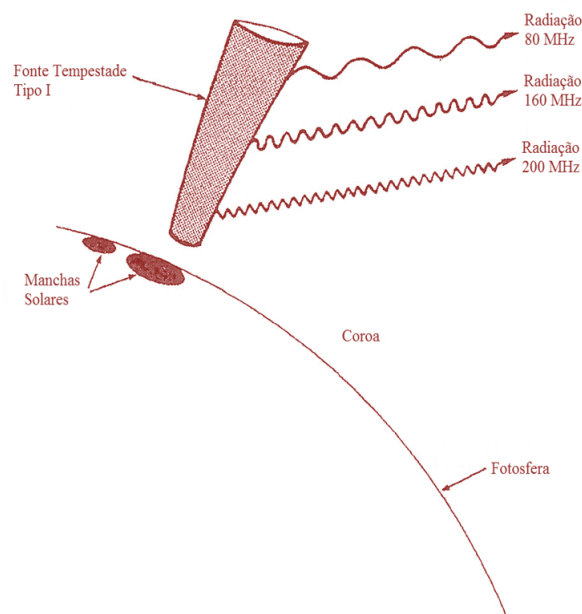


Figura 2.13 - Modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar.

Fonte: Adaptado de McLean (1981)

No entanto, não está claro como a energia responsável pelas tempestades é criada e liberada na coroa. A idéia corrente pode ser sumarizada em três cenários:

- campos magnéticos recém emergidos podem interagir com campos coronais pré-existentes e a reconexão pode liberar energia magnética livre (BENZ; WENTZEL, 1980);
- campo magnético emergindo e regiões fonte de energia podem mover-se na coroa por choques propagando-se aproximadamente à velocidade de Alfvén. Elétrons podem ser acelerados na frente de choque e emitir *bursts* de radiação em regiões de instabilidade cinética (SPICER et al., 1981; BENZ; WENTZEL, 1981);

- a energia pode ser liberada na baixa coroa e ser transportada por partículas ou ondas (KRUCKER et al., 1995).

A Figura 2.14 mostra um modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I, baseado na interação de campos magnéticos emergentes e campos/arcs magnéticos pré-existentes.

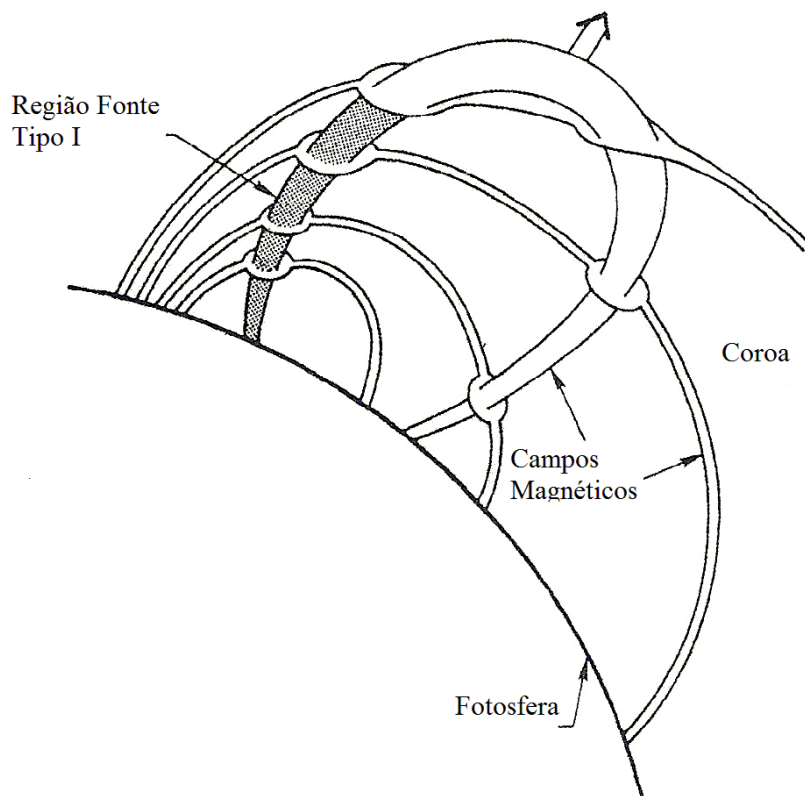


Figura 2.14 - Modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I. Um novo arco magnético move-se num campo magnético coronal pré-existente. Os campos novo e antigo serão separados por uma região de alta densidade de corrente. Onde os campos são fortes a densidade de corrente atingirá o valor crítico para a geração da turbulência íon-som que em última instância resulta na emissão de radiação eletromagnética.

Fonte: Adaptado de McLean (1981)

Melrose (1980) desenvolveu uma teoria para emissão tipo I baseado nas seguintes teorias:

- o mecanismo de emissão é a emissão fundamental do plasma, e é devido à coalescência das ondas de Langmuir com ondas de baixa frequência;

- o agente excitador das ondas de Langmuir são uma população de partículas energéticas aprisionadas em estruturas de campo magnético fechadas sobre uma região ativa.

Diversos outros autores têm sugerido modelos para explicar as particularidades registradas nas observações de emissões tipo I e tempestades tipo I, entre eles estão os trabalhos de:

- (MELROSE, 1973): emissão fundamental de plasma;
- (MELROSE, 1980): coalescência das ondas de Langmuir com ondas de baixa frequência;
- (BENZ; WENTZEL, 1980): espalhamento das ondas de Langmuir por ondas íon-acústicas;
- (BENZ; WENTZEL, 1981): coalescência das ondas plasma com ondas íon-acústicas;
- (WENTZEL, 1981): combinação ondas híbrido-inferior com ondas híbrido-superiores e
- (THEJAPPA, 1991): emissão espontânea de ondas de Langmuir por distribuição anisotrópica de elétrons em campos magnéticos fechados acima de regiões ativas.

## 2.8 Correntes Tipo I

Wild e Tlamicha (1964;1965) reportaram as características espectrais de rádio emissões que encontraram repetidamente durante o ciclo solar 20 (que teve início em outubro de 1964), que chamaram de *CORRENTES*. A Figura 2.15 mostra um espectro esquemático para ilustrar o *burst* tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade de ruído.

Tempestades de ruído, quando observadas por instrumentos com alta resolução espectral e temporal, apresentam uma aparência complexa. Para distinguir uma corrente tipo I de um aglomerado de *bursts* aleatórios, Elgaroy e Uglund (1970) adotaram algumas características como regras para sua identificação:

- uma corrente não pode conter menos que 4 *bursts* individuais;
- uma corrente deve ter duração de 2 segundos ou mais;
- o tempo de separação entre *bursts* sucessivos em uma mesma corrente deve ser é menor que 1 segundo;



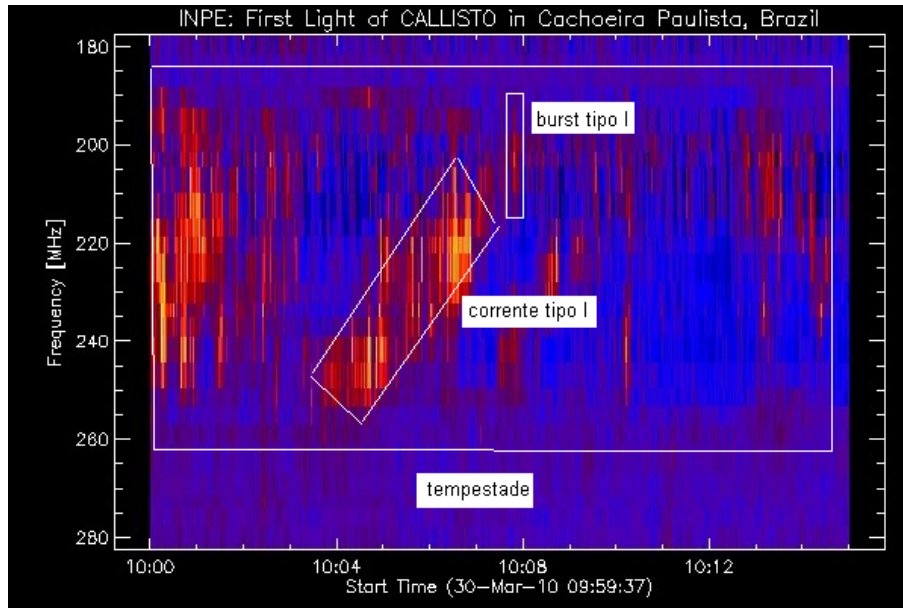


Figura 2.15 - Espectro dinâmico ilustrando burst tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade.  
 Fonte: Adaptado de: [http://e-callisto.blogspot.com.br/2010\\_04\\_01\\_archive.html](http://e-callisto.blogspot.com.br/2010_04_01_archive.html).

- correntes sucessivas devem ter mais ou menos a mesma frequência central ( $\pm 5\%$ ).

Para De Groot et al. (1976), os critérios para definir uma corrente são:

- sequência aparentemente coerente de *bursts* no domínio espectro-temporal, em que frequências centrais são colineares;
- o tempo de separação entre *bursts* sucessivos deve ser menor que 3 segundos;
- uma corrente deve conter no mínimo 5 *bursts* tipo I.

Outras características importantes das correntes são (ELGARROY; UGLAND, 1970):

- *bursts* fortes podem ocorrer a qualquer momento em uma corrente, mas há uma tendência estatística para *bursts* no final das correntes serem menos intensos que aqueles próximos ao seu início;
- *bursts* individuais em uma corrente podem apresentar diferentes derivas em frequência;
- algumas correntes são muito complexas. Dois ou três *bursts* podem ser observados quase simultaneamente em frequências ligeiramente diferentes;

- *bursts* individuais nas correntes refletem as mesmas propriedades que aqueles que ocorrem fora das mesmas.

Para Elgaroy e Ugland (1970), correntes podem ser produzidas em três diferentes processos: por efeitos de propagação que limitem a emissão de escape de uma fonte de banda larga; por excitação de uma única região fonte; ou por excitações de regiões fonte que são sistematicamente deslocadas.

Ao investigar correntes tipo I, Hanasz (1966), analisou várias características, entre elas, sua distribuição com a frequência média, razão de deriva em frequência, posição no disco solar e tempo de vida, e não encontrou distinção entre propriedades físicas de correntes e *bursts* simples.

Sendo assim, Hanasz (1966) sugere que, primeiro se entenda os mecanismos de correntes tipo I, para então considerar *bursts* simples como um caso limite de correntes.

Sodré et al. (2011;2012) identificaram rádio emissões solares apresentando características de correntes tipo I (tendo como referência as características utilizadas por Elgaroy e Ugland (1970)) e apresentaram resultados preliminares da análise de seus espectros dinâmicos. Esta Dissertação dá continuidade ao estudo das correntes tipo I.



### 3 INSTRUMENTAÇÃO

A rede e-CALLISTO foi idealizada durante o Ano Internacional Heliosférico (2007) com o intuito de monitorar continuamente a atividade solar durante as 24 horas do dia. Para tanto, espectrômetros têm sido instalados em vários locais do mundo. De acordo com informações fornecidas pelo site da rede ([www.e-callisto.org](http://www.e-callisto.org)), em março de 2013, a rede e-CALLISTO contava com 56 espectrômetros em 30 localizações e usuários em mais de 80 países. Mais informações a respeito da rede, como a localização dos demais instrumentos podem ser vistas no Apêndice A. A Figura 3.1 ilustra a configuração da rede em março de 2013.

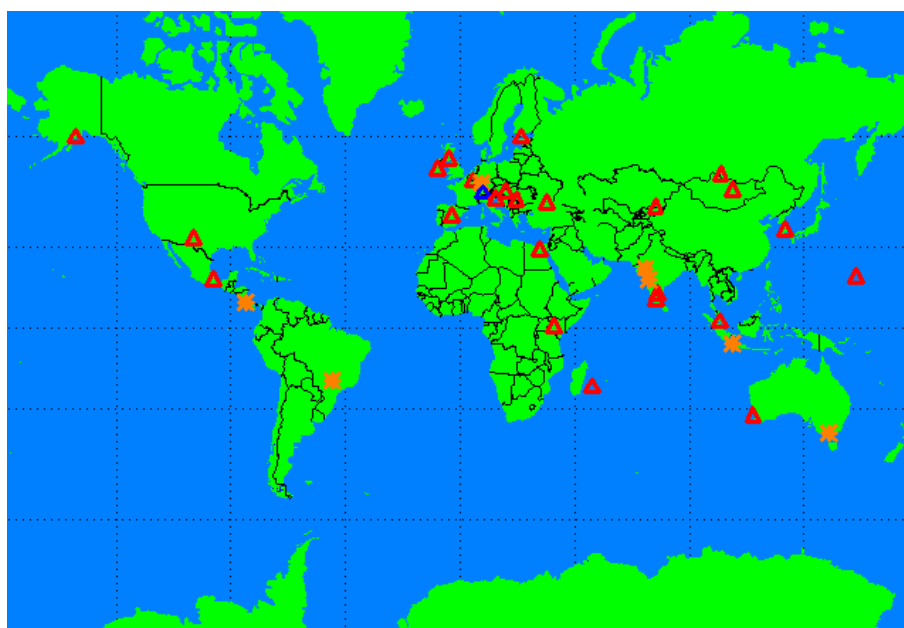


Figura 3.1 - Configuração Rede e-CALLISTO, em março 2013. Os triângulos em vermelho representam estações fornecendo dados, o triângulo em azul representa o CALLISTO-BLEN, instalado na Suíça e as estrelas as estações que ainda não fornecem ou não mais fornecem dados.

Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

### 3.1 O Espectrômetro CALLISTO

Cada espectrômetro CALLISTO é composto por um receptor de duplo canal baseado em eletrônica disponível comercialmente. Sua principal característica é o baixo custo do *hardware* e do *software* e o baixo tempo de montagem (BENZ et al., 2005). A largura de banda total de operação é 825 MHz. O horário do CALLISTO é controlado por um relógio *GPS* (do inglês Global Positioning System). A faixa de frequência total é de 45 - 870 MHz. Há um canal individual de largura de banda 300 kHz, que pode ser ligado por *software* em divisões de 62,5 kHz (resolução espectral). O número de canais de frequência para observação pode ser programado entre 1 e 500. O *software* é programado em linguagem C++ e opera com Windows 2000 ou XP. Os parâmetros relevantes são armazenados em arquivos de texto que podem ser facilmente adaptados a outras configurações de observação.

Com a distribuição dos diversos espectrômetros da rede, atualmente a cobertura para monitoramento solar é praticamente total ao longo do ano. Apenas nos meses de verão no hemisfério Sul (novembro a fevereiro) não existe cobertura entre aproximadamente 16 UT e 20 UT. A Figura 3.2 ilustra a cobertura anual da rede e-CALLISTO.

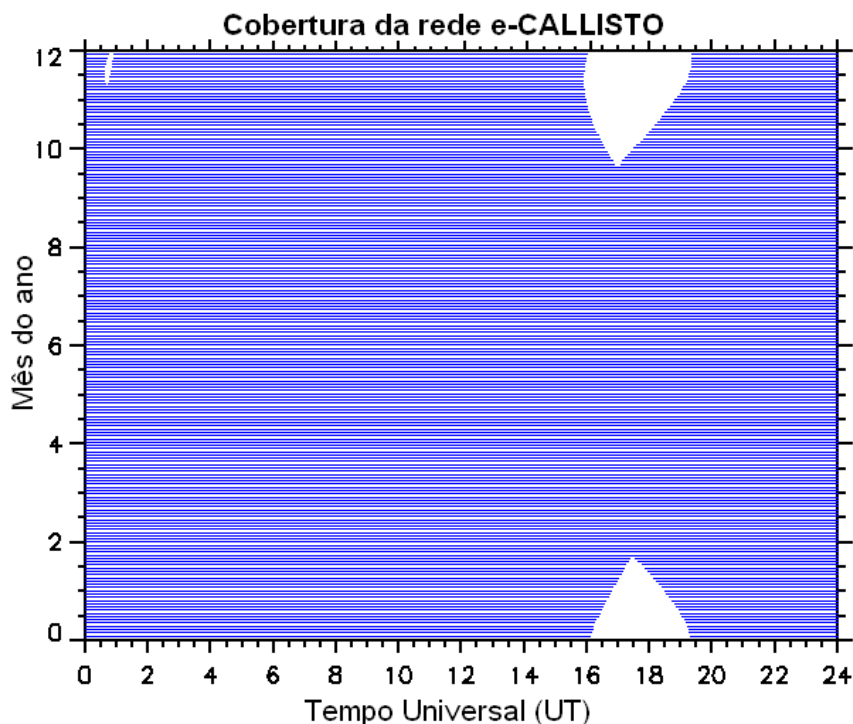


Figura 3.2 - Cobertura anual rede e-CALLISTO. A área em branco representa os meses do ano e o período do dia em que não existe cobertura da rede.

Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

A Tabela 3.1 ilustra as principais especificações dos espectrômetros CALLISTO.

Tabela 3.1 - Principais especificações dos instrumentos da rede e-CALLISTO.

Fonte: Benz et al. (2009).

Parâmetro	Especificação
Faixa de Frequência	45 - 870 MHz
Resolução em Frequência	62,5 kHz
Resolução Temporal	1,25 ms
Largura de Banda Radiométrica	300 kHz a -3 dB
Faixa Dinâmica	$\approx 50$ dB
Sensibilidade	25/1 mV/dB
Figura de Ruído	< 10 dB
Taxa de Amostragem	800 a 1000 medidas s <sup>-1</sup>
Número de Canais	Selecionável de 1-500
Dados de Saída	1 arquivo FITS (15 min) e 1 arquivo log (diário)

Os diversos espectrômetros que compõem a rede e-CALLISTO operam em conjunto com diferentes antenas e alimentadores, incluindo antenas parabólicas e log-periódicas. Portanto, devido às diferentes áreas efetivas (área coletora) cada instrumento apresenta uma sensibilidade (mínima intensidade de fluxo detectável) e conseqüentemente diferente relação sinal ruído.

### 3.1.1 Aquisição de Dados da rede e-CALLISTO

Os arquivos de dados (em formato FITS) e os arquivos de log de cada espectrômetro da rede e-CALLISTO gerados diariamente são primeiro armazenados em um disco de dados local. No caso do CALLISTO-BLEN, os dados são armazenados no Instituto de Astronomia de Zurique, Suíça, que também abriga o servidor geral dos dados da rede. Depois da observação e aquisição de dados em cada estação, um script PERL (*Practical Extraction and Report Language*) rodando no servidor conecta cada *host* em todas as estações e reúne os arquivos de dados disponíveis. Somente os arquivos de dados relativos aos tempos de *flares* como relatados na lista da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) são transferidos para o servidor, todos os demais dados são ignorados. Isso significa que apenas os dados com uma certa probabilidade de conter um evento solar em rádio são coletados pelo servidor. Os dados finalmente transferidos e armazenados são então classificados e arquivados no servidor e passam a ser de livre acesso. Isso não significa que os dados ignorados pelo servidor sejam descartados, ou seja, esses dados ficam armazenados na localidade em foram coletados. A Figura 3.3 ilustra as etapas do processo de transferência, armazenamento e disponibilização dos dados.

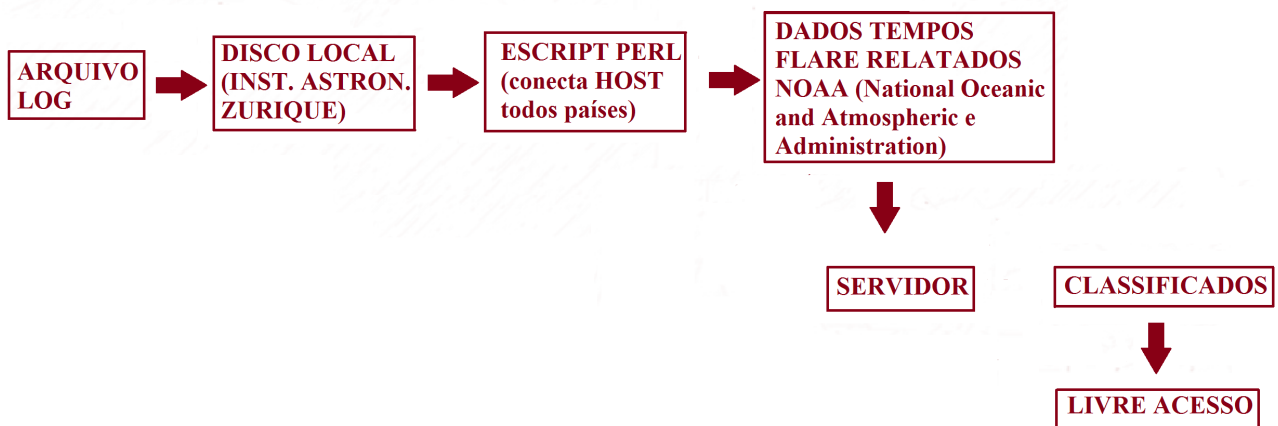


Figura 3.3 - Etapas de aquisição e disponibilização de dados dos espectrômetros da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar.

Todos os dados disponíveis são apresentados em um site usando um processo de JAVA, chamado *Controle Distribuído de Rádio Espectrômetro (DiRaC)* e pode ser selecionado com uma ou duas polarizações (Figura 3.4).

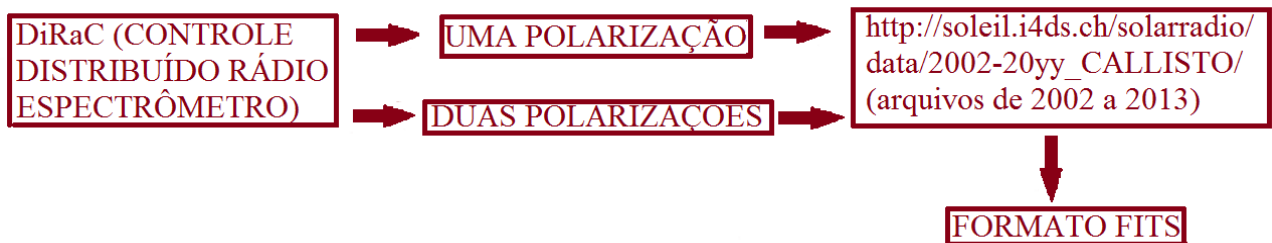


Figura 3.4 - Diagrama representando a disponibilização dos espectros dinâmicos da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar.

Existem duas maneiras de se acessar os espectrogramas disponibilizados pela rede, acessando os seguintes endereços eletrônicos:

- <http://www.e-callisto.org>, o link *Data and QuickLooks > 2002* direciona o usuário para a página com opções de dados do ano de 2002 ao atual (2013), em diretórios separados mês a mês e diários; os espectros podem ser visualizados (image) e/ou os dados baixados (FITS).
- [http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\\_Callisto](http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy_Callisto). Neste site, os dados também aparecem organizados em ano, mês e dia, porém cada arquivo disponível para *download* está compactado.

### 3.2 O CALLISTO-BLEN

O CALLISTO-BLEN está localizado em Zurique (Suíça), na latitude  $47^{\circ} 20' 23''$  N, longitude  $08^{\circ} 06' 41''$  L e altitude 495 m. O CALLISTO-BLEN opera com uma antena parabólica de 7 m de diâmetro em conjunto com um alimentador log-periódico no foco principal (Figura 3.5). Essa configuração faz com que o instrumento tenha boa sensibilidade, devido à área coletora da antena. Apesar desta antena permitir a operação em uma ampla faixa do espectro (100 MHz a 4 GHz), o CALLISTO-BLEN opera na faixa de 170 MHz a 870 MHz, com polarização vertical e horizontal.



Figura 3.5 - Antena de 7 m de diâmetro do CALLISTO-BLEN.

Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

A resolução em frequência deste equipamento é 62,5 kHz, sua largura de banda radiométrica é 300 kHz e o tempo de integração é de 1,25 ms. Os dados das observações solares registrados pelo CALLISTO-BLEN disponibilizados pela rede fornecem os espectros calibrados em unidades de fluxo solar (sfu). A Figura 3.6 apresenta a cobertura anual de observação solar do CALLISTO-BLEN.



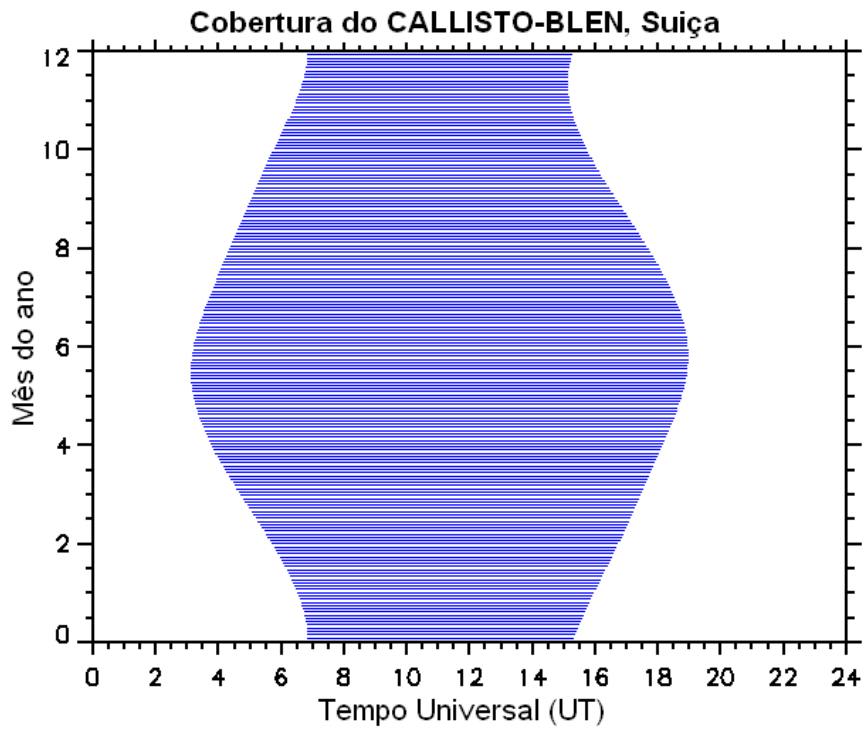


Figura 3.6 - Cobertura anual do CALLISTO-BLEN. Entre os meses de abril e agosto a cobertura estende-se aproximadamente das 04:00 UT às 18:00 UT; já entre setembro e março, essa cobertura concentra-se entre aproximadamente 06:00 UT e 16:00 UT.

Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

## 4 IDENTIFICAÇÃO, SELEÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

### 4.1 Identificação e Seleção de Dados

A seleção dos dados de emissões solares tipo I na faixa métrica (45 - 870 MHz) analisadas no presente trabalho envolveu diversas etapas, descritas a seguir.

A identificação de dados de emissões tipo I, associadas a tempestades de ruído do ano de 2011, consistiu no levantamento da ocorrência de tempestades de ruído identificadas pelos serviços de monitoramento da atividade solar disponibilizados pelo Centro de Previsão de Clima Espacial (*Space Weather Prediction Center*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Na página da NOAA (<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>) são listados diariamente os eventos registrados em ondas de rádio por uma rede de instrumentos, incluindo rádio telescópios e rádio espectrógrafos. A listagem informa os horários de início, de máxima intensidade e de fim de cada evento, a estação de observação, a frequência de registro (frequência fixa, identificada com a sigla RBR ou várias frequências, identificadas por RSP) e também a associação destes eventos com *flares* em raios-X moles, identificados pela classe de intensidade.

A partir desta listagem diária, foram então identificados todos os eventos para o ano de 2011 reportados como tempestades de ruído (com a sigla RNS, do inglês *Radio Noise Storm*). A Figura 4.1 apresenta um fragmento da listagem da NOAA para o dia 30 de julho de 2011, no qual foi identificada a ocorrência de 5 tempestades de ruído.

Assim, chegou-se a um total de 64 dias com registro de 75 eventos identificados como tempestades de ruído para todo o ano de 2011.

Conforme mencionado na seção 3.2 desta Dissertação, os dados de eventos solares registrados pela rede e-CALLISTO estão disponíveis para visualização e para *download* pela Internet. Desta forma, foi então feito um levantamento para identificar os dados de emissões métricas tipo I registradas pelos espectrógrafos da rede e-CALLISTO possivelmente associadas às tempestades de ruído. Tomou-se como ponto de partida, os 75 eventos de tempestades de ruído já identificados anteriormente e tendo como referência as características espectro-temporais para identificação de uma rádio emissão tipo I (ou corrente tipo I).

Mesmo considerando que a rede e-CALLISTO é composta de vários espectrógrafos, como já mencionado, optou-se por selecionar os dados de emissões métricas possivelmente associados às tempestades apenas para um único instrumento da rede, com

```

:Product: 20110730events.txt
:Created: 2011 Aug 02 0332 UT
:Date: 2011 07 30
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather
Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 30 minutes.
#
# Edited Events for 2011 Jul 30
#
#Event      Begin      Max      End Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars
Reg#
#-----
-----
620 +      0000      0057      0302 LEA  G  RNS  245      390
710 +      0000      ////      0945 LEA  C  RSP  075-180  CTM/1
590        0011      ////      0045 PAL  C  RSP  025-051  VI/1
600        0050      0053      0056 G15  5  XRA  1-8A     B5.3
1.2E-04
610 +      0204      0209      0212 G15  5  XRA  1-8A     M9.3
2.0E-02  1261
610 +      0207      0208      0210 LEA  G  RBR  4995     330
1261
610 +      0207      0207      0209 LEA  G  RBR  8800     550
1261
610        0207      0207      0208 LEA  G  RBR  15400    480
1261
610 +      0208      0208      0209 LEA  G  RBR  2695     180
1261
610        0208      0209      0209 LEA  G  RBR  1415     74
1261
610 +      0211      ////      0211 LEA  C  RSP  025-120  III/1
1261
640        0316      0316      0316 PAL  G  RBR  245      100
650 +      0352      ////      0630 LEA  C  RSP  025-180  VI/1
820 +      0458      0504      0732 LEA  G  RNS  245      220
660        0504      ////      0607 SVI  C  RSP  025-152  VI/1
670 +      0654      ////      0655 SVI  C  RSP  025-131  III/2
680        0658      0659      0704 SVI  3  FLA  N18W30   SF      ERU
690        0753      0758      0758 LEA  G  RBR  245      230
700        0809      ////      0809 SVI  C  RSP  025-052  III/1
720        0943      ////      0945 SVI  C  RSP  025-053  III/1
780 +      0947      ////      1319 SVI  C  RSP  075-180  CTM/1
790 +      0951      1047      1224 SVI  G  RNS  245      330

```

Figura 4.1 - Reprodução da listagem do *Space Weather Prediction Center* da NOAA, dos eventos em rádio frequências registrados no dia 30 de julho de 2011. Foram assinalados os eventos correspondentes à ocorrência de tempestades de ruído identificados pela sigla RNS.

Fonte: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2011.html>

o intuito de evitar, neste primeiro trabalho, a necessidade de procedimentos adicionais na redução dos dados para padronização dos mesmos, visto que cada instrumento apresenta, por exemplo, diferentes resoluções, sensibilidade, nível de interferência e relação sinal/ruído.

O instrumento escolhido foi o CALLISTO-BLEN (descrito em detalhes no Capítulo 3), que apresenta dados bastante regulares e com baixo nível de interferência ou ruído. Além disso, devido a utilização da antena parabólica de 7 m de diâmetro, o CALLISTO-BLEN possui uma área efetiva maior, sendo possível captar eventos de menor intensidade, ou seja, este instrumento possui uma maior sensibilidade. Assim, estas características foram determinantes na escolha do CALLISTO-BLEN. Com a determinação do instrumento a ser utilizado, foram então selecionados todos os arquivos de dados, correspondentes aos horários das 75 tempestades de ruído anteriormente selecionados a partir da lista da NOAA, disponibilizados pelo CALLISTO-BLEN.

Considerando que as tempestades de ruído apresentam longa duração, muitas vezes, de dias, foi então escolhido um período de dados que apresentou um registro praticamente contínuo de emissões tipo I e correntes tipo I ao longo de 10 dias (de 30 de julho a 09 de agosto de 2011, excetuando-se o dia 06 de agosto no qual não houve registro de emissões tipo I).

Os espectros dinâmicos das emissões selecionadas para o período mencionado foram inspecionados na busca de identificação de correntes tipo I. Foram identificadas 225 correntes. Não foram incluídas as correntes tipo I identificadas que não apresentavam contornos (limites) bem definidos ou intensidade suficiente (no mínimo 25 SFU acima do *background*) para permitir a determinação dos parâmetros observacionais (temporais e espectrais) a partir do programa RAPP Viewer.

Para melhor compreensão das atividades realizadas para a identificação e a seleção dos dados de correntes tipo I analisadas, descritas acima, elas foram sumarizadas em etapas na Tabela 4.1.

A Tabela 4.2 apresenta detalhes dos dados selecionados para a análise e as Figuras 4.2 e 4.3 mostram exemplos de espectros dinâmicos de correntes tipo I selecionadas para a análise.

A análise das 225 correntes tipo I selecionadas constituiu-se na determinação dos parâmetros observacionais (a partir dos espectros dinâmicos) e dos parâmetros do agente emissor e da fonte emissora. Os procedimentos para estas determinações são descritos nas seções a seguir.

Tabela 4.1 - Etapas realizadas para identificação e seleção final das 225 correntes tipo I analisadas no presente trabalho.

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>	<b>Resultado/Seleção</b>
1	Identificação dos eventos de tempestades de ruído (RNS) tempestades de ruído	64 dias e 75 eventos de
2	Identificação de dados do CALLISTO-BLEN com registro de emissões tipo I ou correntes tipo I associados aos eventos de tempestades de ruído	4269 arquivos (espectros dinâmicos)
3	Seleção de período longo e contínuo com registro de emissões tipo I pelo CALLISTO-BLEN	10 dias (30/07/11 - 09/08/11)
4	Identificação das correntes tipo I a serem analisadas	225 correntes tipo I

Tabela 4.2 - Dados do CALLISTO-BLEN, no período de 30/07/11 a 09/08/11, apresentando correntes tipo I selecionados para a análise.

<b>Dia</b>	<b>Intervalo de Tempo com Correntes Tipo I</b>	<b>Arquivos</b>	<b>Correntes Selecionadas</b>
30/07/11	05:00-14:30 UT	112	51
31/07/11	05:45-15:30 UT	112	09
01/08/11	09:15-10:15 UT	112	08
02/08/11	05:00-17:00 UT	112	43
03/08/11	07:00-14:45 UT	112	61
04/08/11	05:30-16:15 UT	112	17
05/08/11	07:30-12:00 UT	111	10
06/08/11	—	111	0
07/08/11	08:00-16:45 UT	109	19
08/08/11	10:45-17:30 UT	110	05
09/08/11	07:30-07:45 UT	110	02
<b>Total</b>	—	<b>1223</b>	<b>225</b>

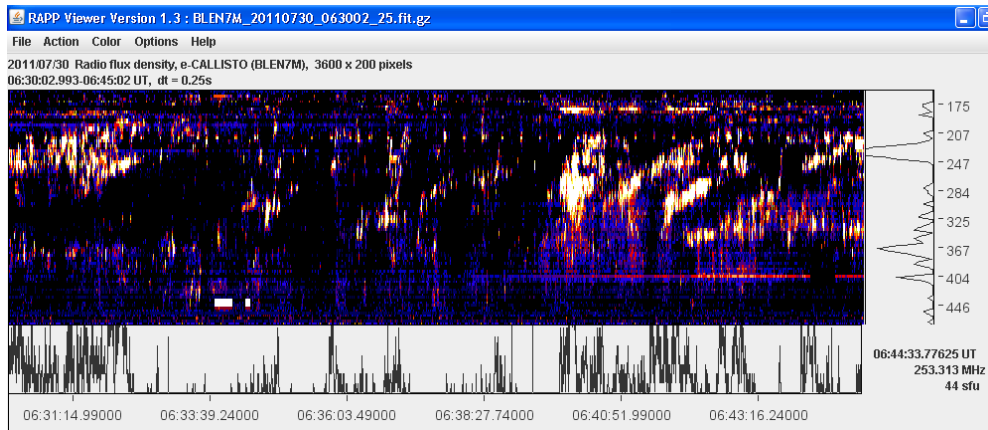


Figura 4.2 - Espectro dinâmico de correntes tipo I registradas pelo CALLISTO-BLEN em 30 julho de 2011 ( $\approx$  06:30 UT)

Fonte: Adaptado de <http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yyCallisto/2011>.

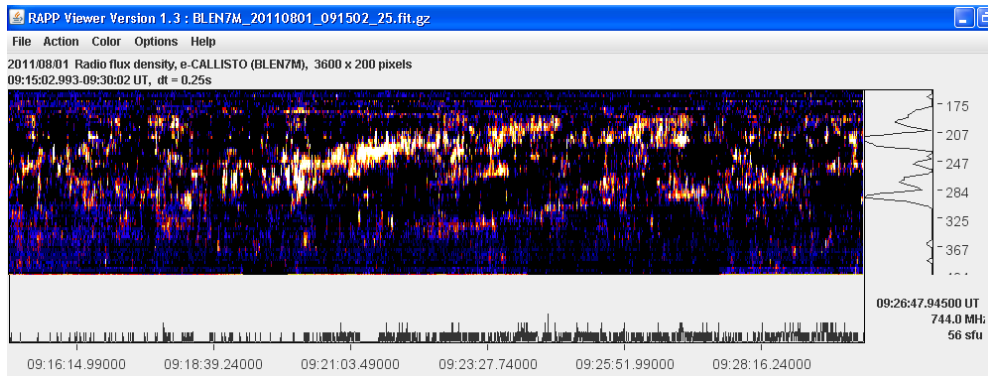


Figura 4.3 - Espectro dinâmico de correntes tipo I registradas pelo CALLISTO-BLEN em 01 agosto de 2011 ( $\approx$  09:15 UT)

Fonte: Adaptado de <http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yyCallisto/2011>.

## 4.2 Parâmetros Observacionais das Correntes Tipo I

A partir da visualização do espectro dinâmico de cada corrente tipo I, foram determinados os seguintes parâmetros observacionais, de acordo com o critério ilustrado na Figura 4.4:

- frequência inicial ( $f_i$ );
- frequência final ( $f_f$ );
- frequência central ( $f_c$ );
- largura de banda ( $\Delta B$ );
- instante de tempo inicial ( $t_i$ );

- instante de tempo final ( $t_f$ );
- duração total ( $\Delta t$ );
- intervalo total em frequência ( $\Delta f$ ) e
- taxa de deriva em frequência ( $\Delta f/\Delta t$ ).

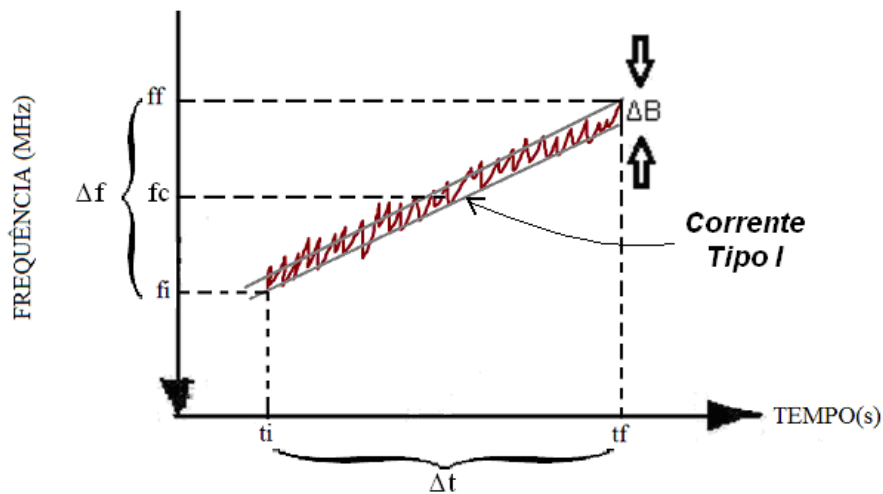


Figura 4.4 - Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando a determinação dos parâmetros observacionais: instantes de tempo de início ( $t_i$ ) e de fim ( $t_f$ ), duração total da corrente ( $\Delta t$ ), frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ), frequência central ( $f_c$ ) e largura de banda em frequência ( $\Delta f$ ).

Como a determinação dos parâmetros espectro-temporais das correntes tipo I foi feita diretamente a partir dos registros em canal de frequência e tempo do espectro dinâmico, visualizado por meio do programa RAPP Viewer, o erro de cada medida de frequência foi tomado como sendo a metade do intervalo de frequência entre dois canais sucessivos (equivalendo a 31,25 MHz), e, da mesma forma, a metade do intervalo entre duas varreduras sucessivas para as medidas de tempo (0,625 ms). Assim, os erros associados à determinação das frequências e tempos dependem, respectivamente, das resoluções espectral e temporal das observações.

Como mostrado na Figura 4.4, a duração total ( $\Delta t$ ) para uma corrente tipo I foi determinada diretamente da diferença entre os instantes final ( $t_f$ ) e inicial ( $t_i$ ) medidos para cada espectro, ou seja,  $\Delta t = t_f - t_i$ .

Da mesma forma, o intervalo total em frequência ( $\Delta f$ ) foi determinado como sendo o maior intervalo de frequência entre a frequência inicial ( $f_i$ ) e a frequência final

( $f_f$ ), ou seja,  $\Delta f = f_f - f_i$ . A frequência central ( $f_c$ ) por sua vez é tomada como sendo a média aritmética entre as frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ). Assim:  $f_c = \frac{f_i + f_f}{2}$ .

Para a determinação da largura de banda em frequência ( $\Delta B$ ), o critério adotado foi o mesmo utilizado por De Groot et al. (1976). Como sugerido por esses autores, foi ajustada uma reta na parte superior e uma outra na inferior de cada corrente, abrangendo pelo menos 90% do evento.

Considerando, como já mencionado que os espectros dinâmicos das emissões rádio solares são apresentados com o eixo em frequência (eixo vertical) invertido, ou seja, os valores de frequência crescem para baixo (e decrescem para cima), adotou-se a seguinte convenção para o sinal da taxa de deriva em frequência das correntes tipo I ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ):

- a) taxa de deriva positiva ( $\frac{\Delta f}{\Delta t} > 0$ ) para emissões *inversas*, que apresentam emissão de baixa para alta frequência (deslocamento para a fotosfera); e
- b) taxa de deriva negativa ( $\frac{\Delta f}{\Delta t} < 0$ ) para emissões *normais*, que apresentam emissão de alta para baixa frequência (deslocamento para a coroa).

A Figura 4.5 apresenta um esboço do espectro dinâmico de uma corrente tipo I apresentando derivas negativa e positiva.

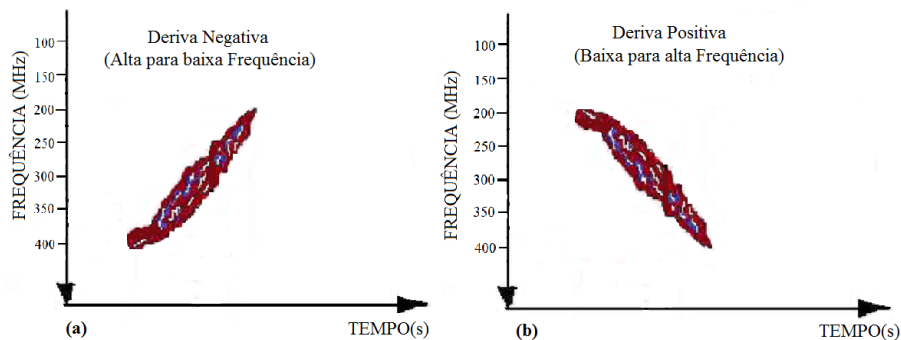


Figura 4.5 - Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando as derivas negativa (a) e positiva (b).

A determinação das taxas de deriva em frequência de cada corrente tipo I foi obtida a partir do ajuste linear entre os picos de emissão identificados nos extremos de cada corrente. Assim, a taxa de deriva em frequência foi obtida como a razão entre o intervalo total em frequência e a duração total ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ).



Este procedimento foi feito para todas as 225 correntes analisadas. A análise estatística dos parâmetros determinados é apresentada e discutida no Capítulo 5.

### 4.3 Parâmetros Físicos da Região Fonte das Correntes Tipo I

Como mencionado no Capítulo 2, é aceito que o mecanismo de emissão dos *bursts* tipo I seja de origem não térmica (BENZ, 2008), associado à emissão de plasma. A emissão ocorre devido à coalescência de ondas de Langmuir, amplificadas por elétrons energéticos aprisionados em estruturas magnéticas fechadas sobre uma região ativa, com ondas de baixa frequência (MELROSE, 1980). No caso da emissão de plasma, a frequência da rádio emissão detectada é considerada como a frequência de plasma ( $f_p$ ) da coroa solar, que por sua vez, está relacionada com a densidade eletrônica ( $N$ ) da atmosfera solar.

Além disso, as características observadas das emissões tipo I, como alta temperatura de brilho ( $> 10^9$  K) e alto grau de polarização ( $\approx 100\%$ ) (MANGENEY; VELTRI, 1976) suportam a hipótese de que a emissão predominante ocorre na frequência fundamental de plasma (MCLEAN, 1981). Assim, a partir da frequência de observação da emissão, em MHz, obtêm-se a densidade eletrônica (em  $\text{cm}^{-3}$ ) da região fonte ( $N$ ) pela equação (SARMA, 1994):

$$N = 1,24 \times 10^4 \times (f_p)^2, \quad (4.1)$$

sendo  $f_p$  a frequência de plasma, em MHz, assumida como a frequência central ( $f_c$ ) determinada para cada corrente tipo I.

O modelo de densidade de Newkirk, para a atmosfera solar superior relaciona a densidade eletrônica da região ( $N$ ) com a altura a partir da distância heliocêntrica ( $R$ ) pela relação (NEWKIRK, 1961):

$$N = 4,2 \times 10^4 \times 10^{4,32(R_\odot / R)}, \quad (4.2)$$

em que  $N$  é a densidade eletrônica,  $R_\odot$  é o raio solar ( $6,96 \times 10^5$  km) e  $R$  é a altura da fonte, dada em raios solares ( $R_\odot$ ).

Desta forma, a partir da densidade eletrônica da fonte emissora determinada pela Equação 4.1, a altura média da fonte de cada corrente tipo I foi estimada. Para tanto, foi adotado o modelo de Newkirk (NEWKIRK, 1961) multiplicado por um fator 2. A utilização deste fator 2, também adotada nas determinações de HANASZ (1966), ELGARROY; UGLAND (1970) e SARMA (1994), se justifica empiricamente pelo fato de

que para a faixa de frequência característica das emissões tipo I em questão, esse modelo é o que melhor representa a variação da densidade eletrônica na região da fonte em função da altura na coroa solar para emissões na faixa de ondas métricas entre 50 e 500 MHz.

Outros modelos de densidade, como os propostos por Aschwanden (1995) e Melendez-Moreno (1997), são mais indicados para a faixa de frequências decimétricas (acima de 1 GHz). Por sua vez, o modelo de Alvarez (1973), apesar de propor uma relação entre a taxa de deriva e a frequência para a faixa de 75 kHz a 550 MHz, que engloba a faixa de frequência das emissões tipo I, apresenta uma resposta melhor para frequências inferiores a 1 MHz, pois foi ajustada com poucos dados em frequências acima de 200 MHz. Além disso, estes 3 modelos baseiam-se em determinações a partir de análises de rádio emissões tipo III.

Uma característica predominante na maioria das correntes tipo I é a presença de deriva em frequência, também verificada no presente trabalho. Neste caso, se a frequência de emissão é igual à frequência de plasma na fonte, a presença de uma deriva na frequência observada sugere um deslocamento da fonte emissora através da coroa solar. Como já foi mencionado, taxas de deriva em frequência positivas representam movimento descendente da fonte e taxas de deriva em frequência negativas representam movimentos ascendentes na atmosfera solar.

Neste caso, a velocidade de deriva em frequência pode ser convertida em velocidade radial ( $v_r$ ) do agente excitador das correntes, dada em km/s, pela seguinte expressão (ELGARROY; UGLAND, 1970):

$$v_r = -\frac{3,5 \times 10^6}{(\ln f_c - 1,3)^2} \times \frac{1}{f_c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t}, \quad (4.3)$$

sendo  $f_c$  a frequência central (em MHz) e  $\frac{\Delta f}{\Delta t}$  a taxa de deriva em frequência (em MHz/s) determinadas para as correntes tipo I.

Baseado em análise de emissões tipo I obtidas por diversos trabalhos (WILD; TLAMICHA, 1964; ELGARROY; UGLAND, 1970; DEGROOT et al., 1976; AUBIER et al., 1978; KARLICKY; JIRICKA, 1981; AURASS et al., 1981; TLAMICHA et al., 1981), relacionando a intensidade do campo magnético e a altura da fonte de emissão tipo I correspondente ao nível de plasma relativo à frequência de plasma observada, Sarma (1994) obteve uma relação empírica para a relação entre o campo magnético e a distância radial da fonte das emissões tipo I. A relação pode ser escrita como (SARMA, 1994):

$$B = 41,26e^{(-2,56 \times \frac{R}{R_{\odot}})}, \quad (4.4)$$

em que  $B$  é dado em Gauss e  $\frac{R}{R_{\odot}}$  é a altura na coroa solar expressa em unidades de raio solar.

Assim, a partir desta relação, considerando a altura da fonte ( $R$ ) estimada por (4.2), foi determinada a intensidade do campo magnético, na fonte, das correntes tipo I.

Resumindo, seguindo a metodologia apresentada, os parâmetros físicos inferidos para as correntes tipo I analisadas foram:

- densidade eletrônica na fonte ( $N$ );
- velocidade radial ( $v_r$ ) do agente excitador;
- intensidade do campo magnético ( $B$ ) na fonte e
- altura da fonte ( $R$ ).

Os resultados das determinações dos parâmetros físicos das fontes de correntes tipo I analisadas são apresentados e discutidos no Capítulo 5, a seguir.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 225 correntes tipo I identificadas conforme descrito no Capítulo 3, registradas em ondas métricas pelo CALLISTO-BLEN, no período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011 foram analisadas. O objetivo da análise foi promover uma investigação estatística quantitativa dessas correntes tipo I. Desta forma, para cada uma delas foram determinados os parâmetros observacionais e parâmetros físicos da fonte também já citados. Tabelas com os valores dos parâmetros observacionais e físicos podem ser encontradas no Apêndice B. Nas seções do presente capítulo, os resultados obtidos desta análise são apresentados e discutidos.

### 5.1 Distribuição da Duração Total das Correntes

A duração total para cada corrente tipo I, também referida por diversos autores (HANASZ, 1966; ELGARROY; UGLAND, 1970) como tempo de vida da corrente, foi medida como sendo a diferença entre os instantes de início e fim da emissão possíveis de identificar com relação ao ruído de fundo.

Para todas as 225 correntes tipo I identificadas, foi possível determinar a duração total, pois todas apresentavam instantes de tempo inicial e final dentro do intervalo de frequência das observações. As correntes analisadas apresentaram duração total entre aproximadamente 20 e 600 segundos, distribuídas para intervalos de 50 segundos de duração total conforme apresentado no histograma da Figura 5.1.

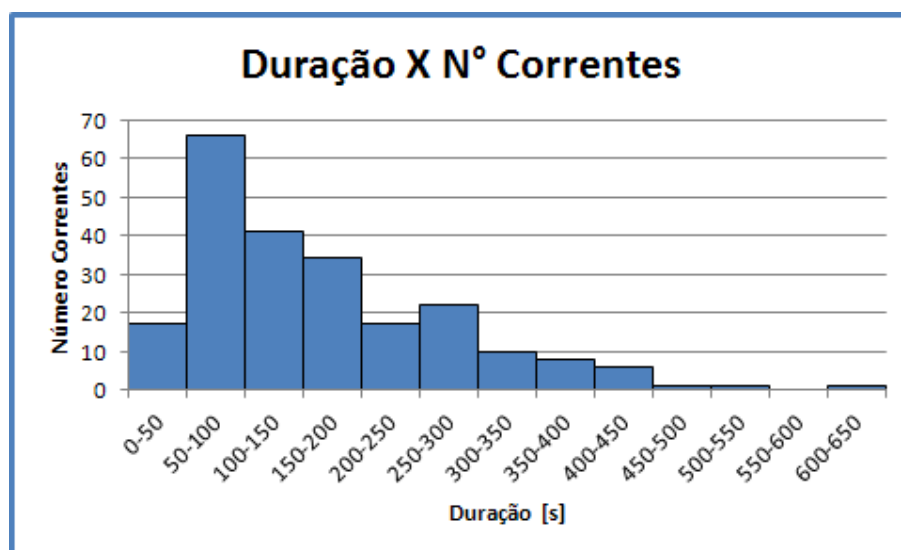


Figura 5.1 - Distribuição das correntes tipo I em função da duração total.

Os valores obtidos seguem uma distribuição semelhante à encontrada por Hanasz

(1966) ao analisar o tempo de vida de 1.000 correntes associadas a várias tempestades de ruído observadas durante a fase descendente do ciclo solar 20, entre 1 de dezembro de 1959 e 4 de abril de 1960. Para as correntes analisadas por Hanasz (1966), a duração variou entre 20 e 220 segundos. De Groot et al. (1976) encontraram que a duração da maior parte das correntes por eles analisadas, também durante a fase descendente do ciclo solar 20, apresentaram valores entre 20 e 30 segundos.

Por outro lado, os valores de duração encontrados no presente trabalho são superiores aos obtidos por Elgaroy e Ugland (1970) no estudo de 316 correntes, registradas durante a fase ascendente do ciclo solar 20. Tais autores encontraram que 60% das correntes apresentam duração inferior a 6 segundos, com uma duração média da ordem de 5,1 segundos e sendo a mais longa duração de 26 segundos. No entanto, estes autores chamam a atenção para o fato de que a distribuição por eles apresentada representa uma amostra de *curta duração* de uma distribuição mais ampla, como a reportada por Hanasz (1966). Segundo Elgaroy e Ugland (1970), a aparente discrepância (ausência de correntes de longa duração) é decorrente principalmente da adoção de critérios mais restritivos para identificação de correntes sucessivas, o que reduz consideravelmente o número de correntes de longa duração identificadas. Além disso, a menor banda em frequência de observação (de 140 MHz a 170 MHz), força a exclusão de correntes de longa duração, que eventualmente apresentam instantes inicial e/ou final fora da banda de observação, como registrado por aqueles autores.

O histograma da Figura 5.1 evidencia que a distribuição obtida apresenta um pequeno número de correntes (17) com curta duração ( $< 50$  s), quando o esperado era um maior número de correntes de curta duração. A explicação para tal discrepância decorre da metodologia de identificação das correntes aqui empregada. Foram descartadas na amostra de correntes aquelas cuja identificação dos limites não permitiram uma determinação precisa dos instantes de início e/ou fim e das frequências extremas. Nesta situação, estão principalmente as correntes de curta duração, inferiores a 50 segundos, difíceis de distinguir com relação ao ruído de fundo.

No entanto, como pode ser notado, 68 correntes (29%) apresentaram uma duração total entre 50 e 100 segundos, sendo que 63% delas se apresentam entre 50 e 200 segundos de duração. A partir de 50 segundos de duração, o número de correntes segue o comportamento esperado e decresce em função do tempo de vida. Para este intervalo, a distribuição das correntes pode ser ajustada pela seguinte relação exponencial, apresentada na Figura 5.2:

$$\eta(\Delta t) \approx 142,98 \exp(-0,4079\Delta t), \quad (5.1)$$

em que  $\eta$  é o número de correntes e  $\Delta t$  é a duração total, dada em segundos, no intervalo considerado. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,9173, que revela um alto grau de correspondência (de 0 a 1) entre os valores estimados para o ajuste e os dados reais.

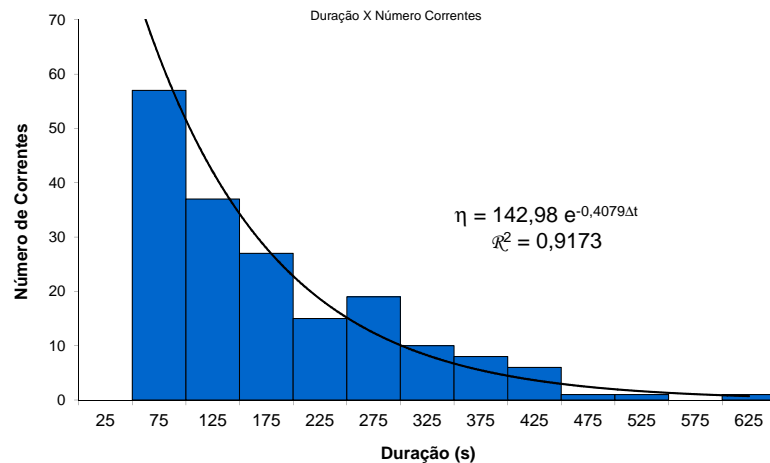


Figura 5.2 - Distribuição das correntes em função da duração total (superior a 50 segundos). A curva mostra o ajuste por uma lei de decaimento exponencial.

Este resultado concorda com a afirmação de Elgaroy e Ugland (1970), de que as correntes de longa duração são menos frequentes do que as de curta duração. Para as correntes analisadas por Hanasz (1966), com tempo de vida entre 20 e 200 segundos, a distribuição seguiu um decaimento exponencial dado pela relação  $\eta(\Delta t) \propto \exp(-0,0333 \Delta t)$ .

## 5.2 Características Espectrais (Frequência Inicial e Largura de Banda em Frequência)

O histograma da Figura 5.3 representa a distribuição das 225 correntes tipo I com a frequência inicial de observação. Nota-se que cerca de 83% das correntes apresentam frequência de início entre 225 e 350 MHz.

Segundo De Groot et al. (1976), a frequência inicial é o parâmetro mais apropriado para localizar uma corrente na banda de frequência. No entanto, é importante ressaltar que a comparação com diferentes estudos prévios devem levar em conta o intervalo em frequência de observação. Por exemplo, na análise de 1.577 correntes feita por De Groot

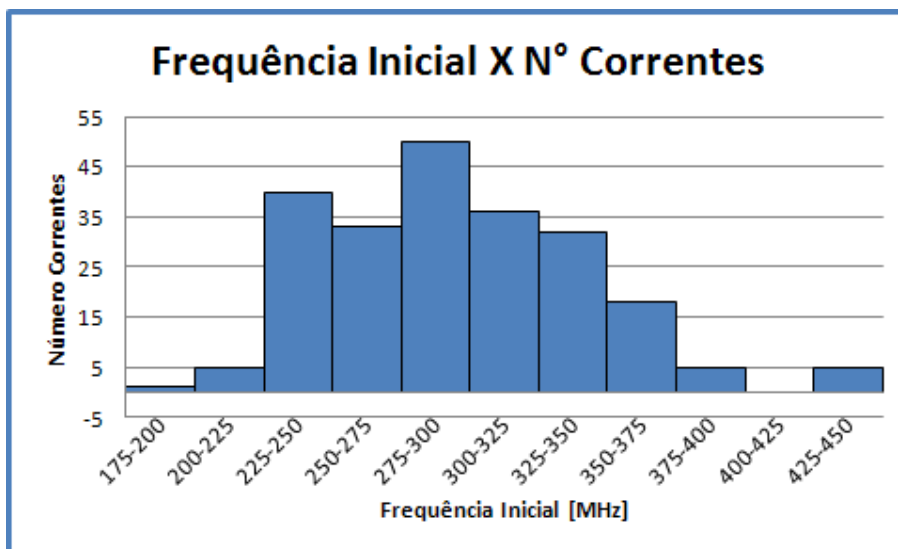


Figura 5.3 - Distribuição das correntes tipo I em função da frequência inicial.

et al. (1976), foi encontrado que menos de 10% delas tiveram início entre 240 e 280 MHz, sendo que a grande maioria (cerca de 90%) teve início em frequências abaixo de 240 MHz. Da mesma forma, o estudo de Hanasz (1966) mostrou que as correntes tipo I analisadas apresentam frequência inicial no intervalo de 30 a 200 MHz.

Esta diferença em relação ao presente estudo deve-se ao fato de que os demais instrumentos não cobriam observações em frequências acima de 280 MHz. Desta forma, o limite superior, de cerca de 200 - 280 MHz, para a frequência inicial das correntes reportado em trabalhos anteriores não representa um limite genuíno para o início da emissão. Este fato é verificado no presente trabalho. Apesar de uma diminuição em função da frequência, cerca de 48% das correntes apresentam início acima 300 MHz.

Devido ao mecanismo de emissão de plasma, o escape da radiação ocorre nas regiões em que a frequência de observação é igual ou é superior a frequência de plasma do ambiente e que as condições, principalmente da densidade eletrônica e do campo magnético da região, são fatores determinantes na manutenção e propagação da radiação, ou seja afetam a duração da corrente. Destas considerações, foi investigada a possível relação entre a duração total de uma corrente e sua frequência inicial (diretamente relacionada à densidade na região fonte). A Figura 5.4 mostra a distribuição obtida. Nota-se, no entanto, que os dados não apresentam uma tendência de diminuição da duração total com o aumento da frequência de observação. De novo, possivelmente devido a não inclusão de muitas correntes de curta duração na amostra.

Com relação à frequência central, tomada como a média entre a frequência inicial e final, os valores obtidos estão no intervalo de aproximadamente 200 MHz a 400 MHz,

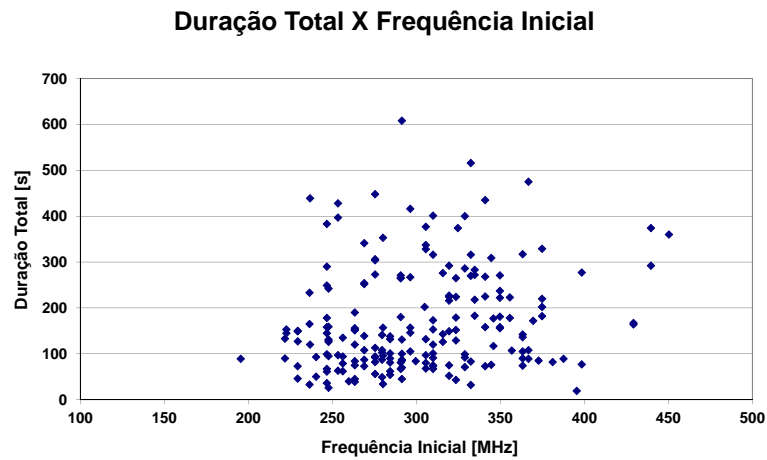


Figura 5.4 - Distribuição da duração das correntes tipo I em função de sua frequência inicial.

sendo o valor médio de  $\approx 270$  MHz. A Figura 5.5 apresenta a distribuição da frequência central das correntes analisadas.

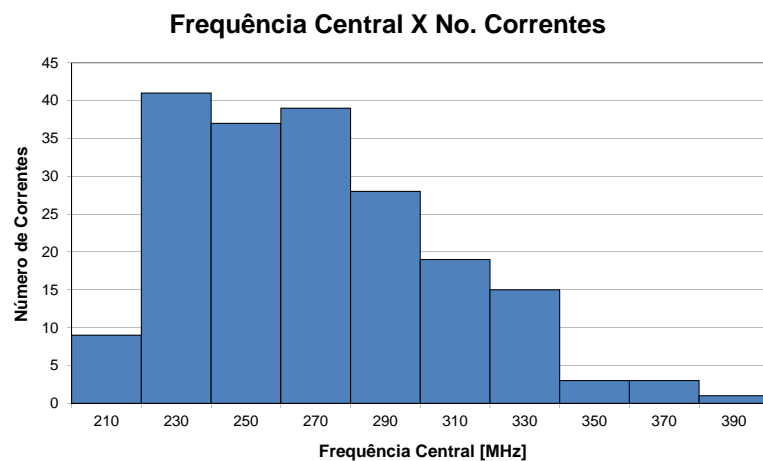


Figura 5.5 - Distribuição das correntes tipo I em função da frequência central.

Foi determinada a largura de banda em frequência de cada corrente tipo I, a partir da metodologia sugerida por De Groot et al. (1976). Os resultados são apresentados no



histograma da Figura 5.6. Os valores para a largura de banda estão distribuídos desde 1 MHz até 150 MHz, sendo que cerca de 60% das correntes apresentam largura de banda entre 15 e 35 MHz.

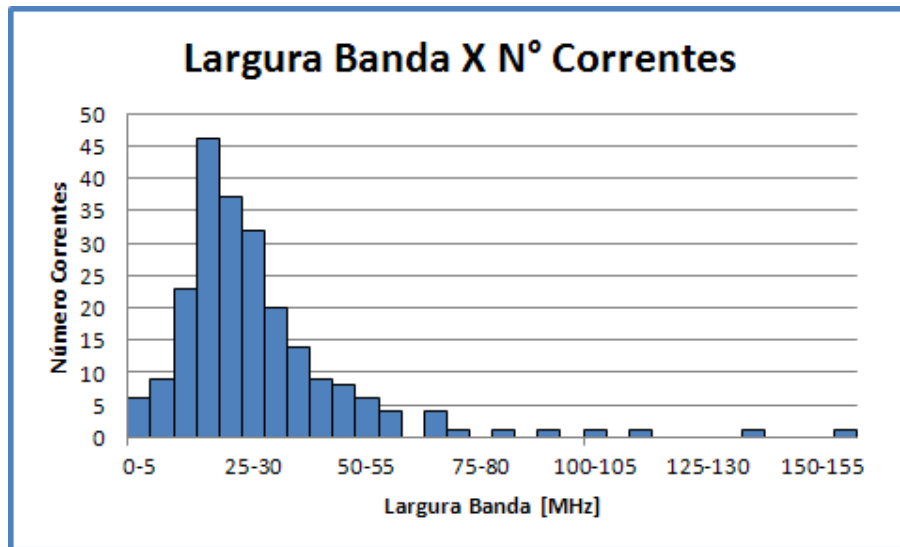


Figura 5.6 - Distribuição das correntes tipo I em função da largura de banda em frequência.

Elgaroy e Ugland (1970), analisando 316 correntes, encontraram valores concentrados entre 4 e 6 MHz, enquanto que para De Groot et al. (1976), de um total de 979 correntes analisadas, 80% encontram-se entre 5 e 15 MHz. Os valores determinados, quando confrontados com os determinados por Elgaroy e Ugland (1970), cuja análise foi feita com dados da fase ascendente do ciclo solar, como os aqui analisados, apresentam discrepâncias. Essas diferenças devem-se possivelmente ao uso de equipamentos com diferentes resoluções espectrais e temporais <sup>1</sup>, já que segundo Kai et al. (1985), a largura de banda de tempestades tipo I está entre algumas dezenas de MHz até 100 MHz.

De acordo com Elgaroy e Ugland (1970), a largura de banda pode apresentar um aumento (22 % dos casos estudados) ou uma diminuição (62 % dos casos) em função do tempo. No entanto, no presente trabalho, não foi possível determinar a variação da largura de banda ao longo da evolução temporal da corrente.

Por outro lado, não foi evidenciada uma dependência da largura de banda em frequência com a frequência inicial, como mostrado na Figura 5.7.

<sup>1</sup>(ELGARROY; UGLAND, 1970) analisaram correntes registradas pelo rádio espectrógrafo do Oslo Solar Observatory, operando entre 140 MHz e 170 MHz.

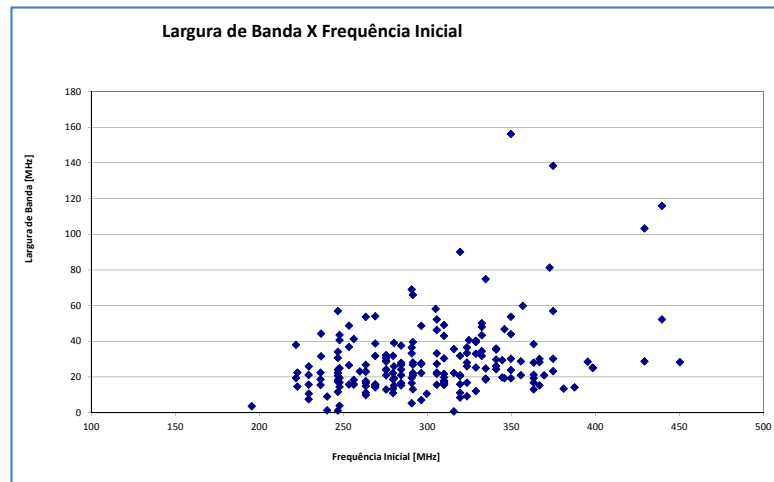


Figura 5.7 - Distribuição da largura de banda em frequência das correntes tipo I em função de sua frequência inicial.

### 5.3 Taxa de Deriva em Frequência e Velocidade da Fonte

Uma das principais características espectro-temporais apresentada pela maioria das correntes tipo I é uma sistemática taxa de deriva em frequência, deriva essa que pode ser tanto negativa quanto positiva, com predominância da negativa. A presença dessa deriva sugere que os elétrons acelerados, responsáveis pelos *bursts* que compõem as correntes tipo I, podem fluir para cima ou para baixo na região de origem, ou podem ser aprisionados num nível de frequência de plasma constante. A distribuição da deriva em frequência das correntes aqui analisadas é mostrada na Figura 5.8.

Das 225 correntes analisadas nesta Dissertação, 133 (59%) apresentam uma deriva de frequência entre  $-0,5$  MHz e  $0$  MHz/s. No trabalho de De Groot et al. (1976) de um total de 717 correntes por eles analisadas, a porcentagem maior (30 %) foi encontrada entre  $-0,4$  MHz/s e  $-0,1$  MHz/s. Em Elgaroy e Ugland (1970) a faixa de concentração ( $\approx 25$  %) foi de  $-0,3$  MHz/s a  $+0,1$  MHz/s. Seguindo a classificação de Elgaroy (1961), as 225 correntes tipo I analisadas neste trabalho podem ser classificadas segundo a deriva como: reversa (r)  $\approx 3,6\%$  (8 correntes), com deslocamento para a fotosfera; com deriva (d)  $\approx 96\%$  (216 correntes), com deslocamento para a coroa, e estável (s)  $\approx 0,4\%$  (aprisionadas num nível de plasma constante).

No trabalho de Hanasz (1966), devido aos critérios adotados, apenas para 207 correntes tipo I a determinação da deriva em frequência foi possível. Os resultados obtidos

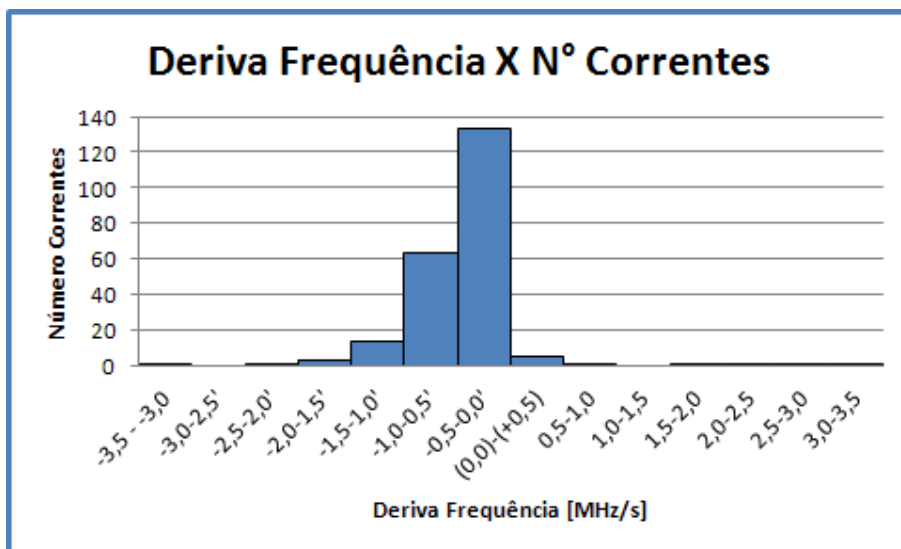


Figura 5.8 - Distribuição das correntes tipo I em função da taxa de deriva em frequência.

pele autor apontam que a maioria das correntes (74 %) apresenta deriva negativa entre  $-0,05$  e  $-0,01$  MHz/s, sendo que 26 % apresentam deriva positiva.

Sendo a frequência de emissão igual à frequência do plasma eletrônico na coroa solar, as taxas de deriva em frequência observadas foram convertidas em velocidades radiais das fontes excitadoras das correntes tipo I. A distribuição do número de correntes com a velocidade radial é apresentada nos histogramas das Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente para velocidade positiva e negativa.

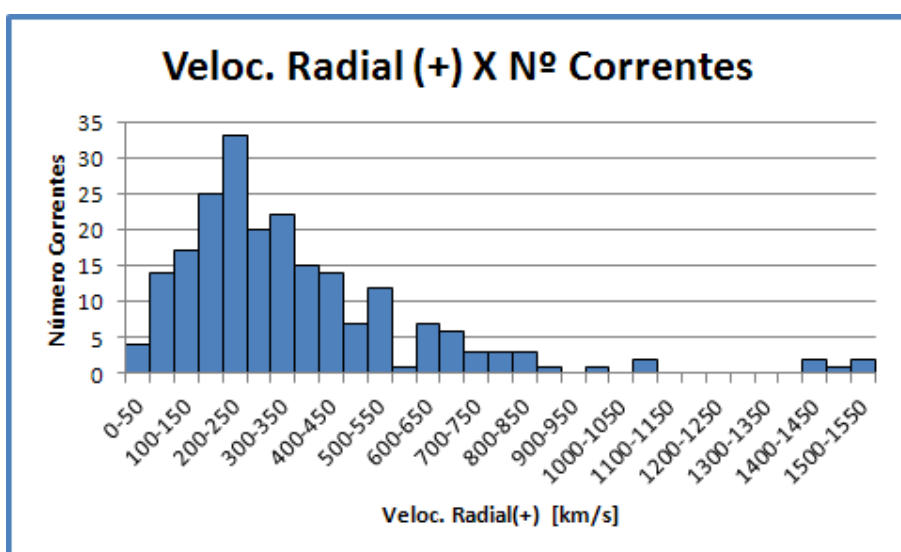


Figura 5.9 - Distribuição das correntes tipo I em função da velocidade radial positiva.

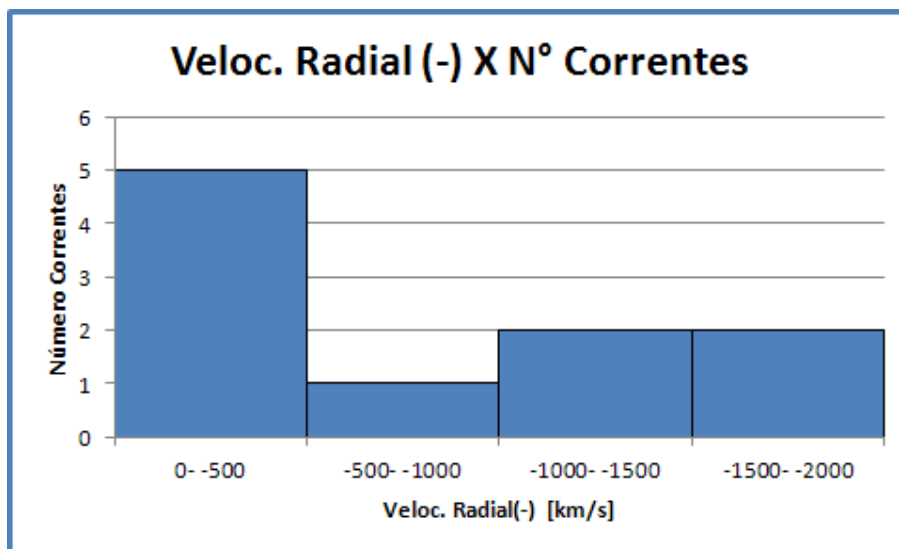


Figura 5.10 - Distribuição das correntes tipo I em função da velocidade radial negativa.

Considerando tanto as velocidades radiais positivas quanto negativas, a distribuição é ligeiramente assimétrica, sendo que o maior número delas (35) está entre +200 km/s e +300 km/s. Nota-se que 83,26% (179) das correntes analisadas têm velocidade radial entre +50 e +550 km/s.

Os valores de velocidade obtidos no presente trabalho concordam com resultados prévios descritos na literatura. Segundo os dados apresentados por Elgaroy e Ugland (1970), a velocidade radial obtida para os agentes responsáveis pelas correntes tipo I ocorrem entre aproximadamente  $-800$  km/s e  $+800$  km/s. Intervalo semelhante, entre  $-700$  km/s e  $+800$  km/s, foi encontrado por Hanasz (1966) para 207 correntes analisadas, com uma distribuição com pico em torno de  $+200$  km/s. Para Sarma (1994), a velocidade radial das emissões tipo I está no intervalo de  $+450$  km/s a  $+900$  km/s.

O valor absoluto médio obtido para a velocidade radial foi de aproximadamente  $+590$  km/s, que não reflete a veracidade da distribuição, com maior concentração de valores entre  $+200$  e  $+300$  km/s, sendo também muito superior ao valor médio absoluto apontado por Elgaroy e Ugland (1970), de  $+260$  km/s. Neste caso, valor da mediana é mais representativo. Considerando tanto os valores de velocidade radial positiva e negativa, o valor obtido foi de  $+270$  km/s, que concorda com o valor obtido por Elgaroy e Ugland (1970), cuja análise foi feita em uma fase do ciclo solar semelhante à dos dados analisados nesta Dissertação.

A velocidade radial pode ser considerada um limite inferior para a velocidade real ( $v_r$  é uma componente e  $v_r \leq v_{real}$ ).

## 5.4 Campo Magnético

A distribuição dos valores de intensidade do campo magnético (dado em Gauss) estimada a partir das características das correntes tipo I é apresentada na Figura 5.11.

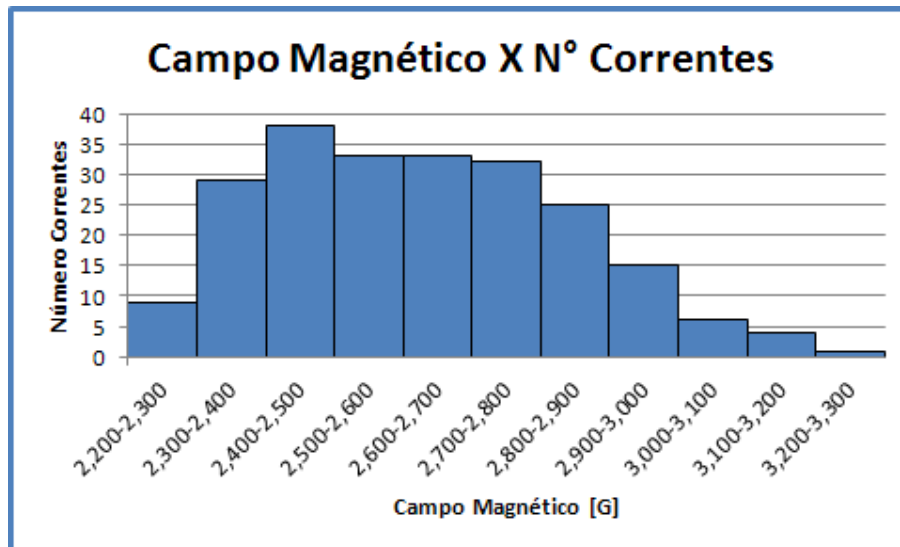


Figura 5.11 - Distribuição das correntes tipo I em função da intensidade do campo magnético.

Os valores de campo magnético obtidos estão no intervalo de 2,2 G a 3,3 G, sendo que cerca de 84% dos valores estão entre 2,3 e 2,9 G. Tais valores concordam com determinações anteriormente reportadas na literatura. Sarma (1994), obteve um valor de campo magnético para a região fonte de 3,2 G para um nível de 26,8 MHz. Elgaroy e Ugland (1970) obtiveram valores no intervalo de 5 a 10 G.

Na fase ascendente do ciclo solar, a coroa apresenta regiões ativas do ciclo que está iniciando, bem como regiões ativas remanescentes do ciclo anterior. Desse modo, é esperada uma presença moderada de regiões ativas, influenciando o campo magnético das correntes tipo I, já que a região fonte das emissões tipo I encontram-se acima das manchas solares (regiões ativas). Como evidenciado, os valores encontrados na distribuição apresentada na Figura 5.11, assemelha-se ao encontrado por Sarma (1994), apesar dos dados utilizados por esse autor encontrarem-se na fase descendente do ciclo solar 19. Devido ao fato dos dados aqui analisados serem de uma fase ascendente do ciclo, era de se esperar que estivessem mais próximos aos encontrados por Elgaroy e Ugland (1970), que analisaram também uma fase ascendente. Uma possível causa para essa discrepância, é o fato do presente ciclo solar (24) apresentar um número de manchas solares muito inferior ao de ciclos anteriores, incluindo o ciclo solar 20, analisado por Elgaroy e Ugland (1970). Na Figura 5.12 fica evidente que o número de manchas solares do período analisado neste

trabalho é comparável com os do período analisado por Sarma (1994), que usou dados de julho de 1962 a abril de 1963, do que com os dados de Elgaroy e Ugland (1970), referentes aos anos de 1967 e 1968.

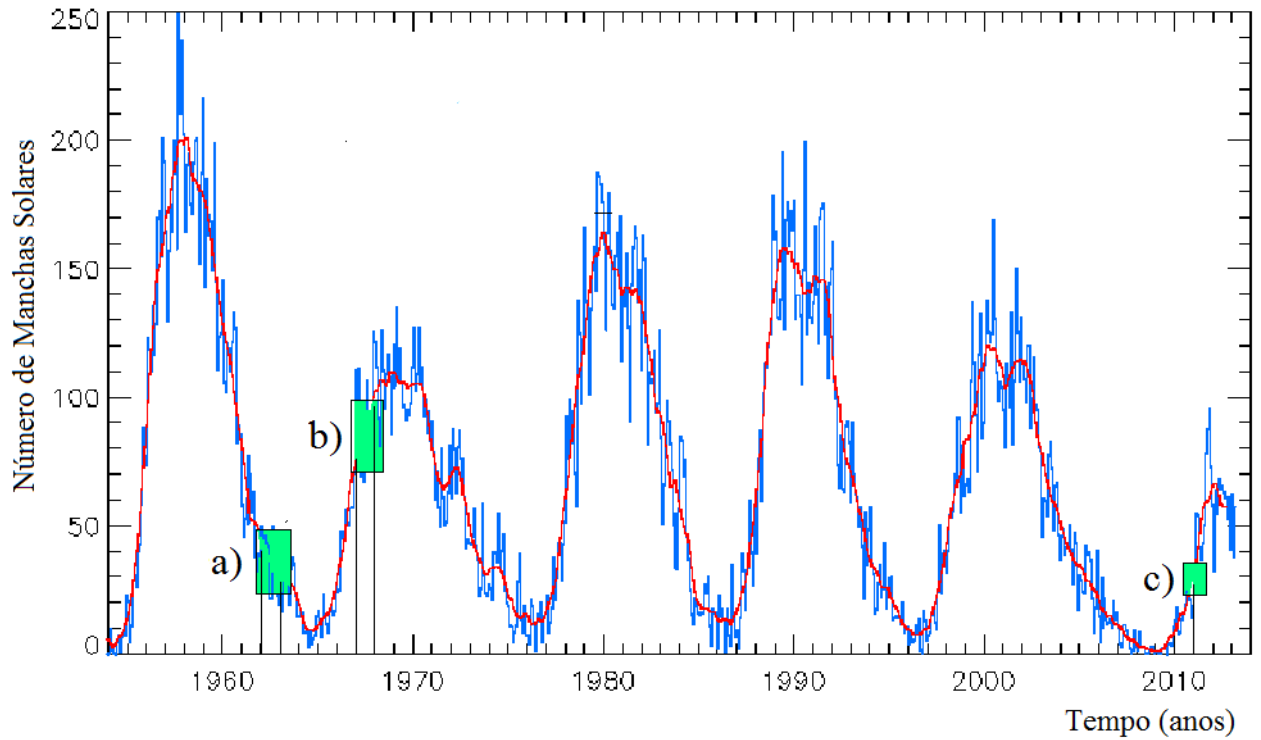


Figura 5.12 - Representação do número de manchas solares. As fases do ciclo solar em que se encontram os dados analisados neste trabalho são identificados por: a) Sarma (1994), b) Elgaroy e Ugland (1970) e c) este trabalho.

Fonte: Adaptado de <http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html>

## 5.5 Altura da Fonte

A distribuição dos valores da altura da fonte (dada em raios solares) estimada a partir das características das correntes tipo I é apresentada na Figura 5.13. Das 225 correntes tipo I analisadas, 89,2% (202) da fonte emissora encontram-se entre 1,025 e 1,125 raios solares acima da fotosfera.

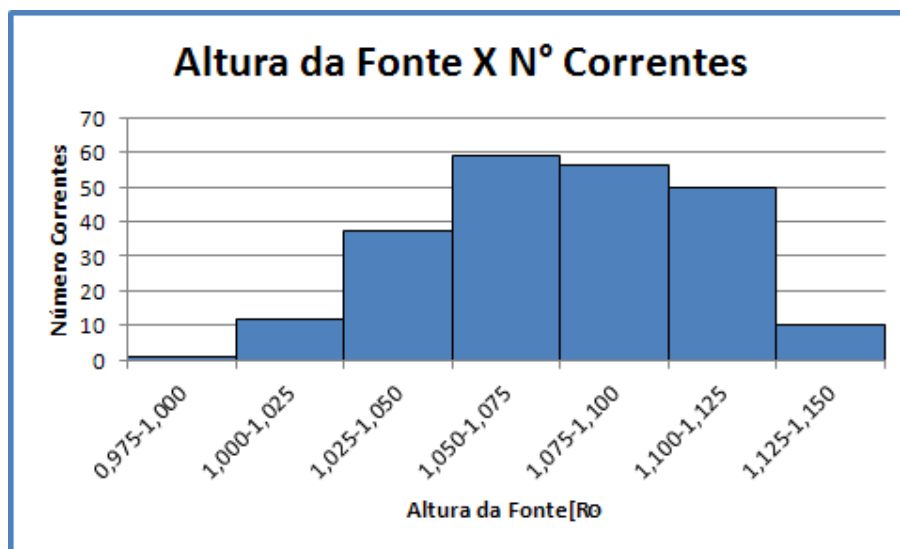


Figura 5.13 - Distribuição das correntes tipo I em função da altura da fonte.

Os valores encontrados para a altura da fonte, entre 0,9 e 1,1 raios solares, são comparáveis aos encontrados por Wild e Tlamicha (1965) entre 0,1 e 0,7 raios solares e aos reportados por Elgaroy e Uglund (1970), entre 0,3 e 1,0 raios solares. Assim como neste trabalho, os referidos autores derivaram a altura através do modelo de Newkirk (NEWKIRK, 1961) multiplicado por um fator 2.

Os resultados obtidos da análise das 225 correntes tipo I e sua comparação com resultados anteriores estão sumarizados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente para os parâmetros observacionais e físicos.

Tabela 5.1 - Comparação dos Parâmetros Observacionais obtidos no presente trabalho com Parâmetros Observacionais de trabalhos anteriores. Na tabela  $\eta$  é o número de correntes,  $\Delta t$  a duração, dada em segundos,  $\Delta B$  a largura de banda, em MHz, e,  $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ , a deriva em frequência, em MHz/s.

<b>Ciclo Solar/Fase</b>	$\eta$	$\Delta t$ (s)	$\Delta B$ (MHz)	$\frac{\Delta f}{\Delta t}$ (MHz/s)	<b>Referência</b>
<b>24/asc.</b>	<b>225</b>	<b>20 - 600</b>	<b>1 - 150</b>	<b>-3 - +3</b>	<b>Este Trabalho</b>
19/min/max	-	1 - 8	40 - 230	-	Wild e Tlamicha (1965)
20/desc.	1000	20 - 220	-	-0,5 - -0,01	Hanasz (1966)
20/asc.	316	20 - 30	4 - 6	-1,0 - +1,0	Elgaroy e Ugland (1970)
20/max.	1577	30 - 170	5 - 15	-0,4 - +0,1	De Groot et al. (1976)

Tabela 5.2 - Comparação dos Parâmetros Físicos obtidos no presente trabalho com Parâmetros Físicos de trabalhos anteriores. Na tabela  $\eta$  é o número de correntes,  $B$  o campo magnético, dado em Gaus,  $R$  a altura da fonte, em raios solares, e,  $v_r$  é a velocidade radial, em km/s.

<b>Ciclo Solar/Fase</b>	$\eta$	$B$ (G)	$R$ ( $R_{\odot}$ )	$v_r$ (km/s)	<b>Referência</b>
<b>24/asc.</b>	<b>225</b>	<b>2,2 - 3,3</b>	<b>0,9 - 1,1</b>	<b>+50 - +550</b>	<b>Este Trabalho</b>
19/min/max	-	0,2 - 3,0	0,1 - 0,7	+65 - +800	Wild e Tlamicha (1965)
20/asc.	316	5,0 - 10,0	0,3 - 1,0	-800 - +800	Elgaroy e Ugland (1970)
19/desc.	-	3,2	2,0	+450 - +900	Sarma (1994)





## 6 CONCLUSÃO

Os bursts tipo I presentes na rádio emissão solar em ondas métricas (geralmente entre 100 e 350 MHz) apresentam banda estreita em frequência (da ordem de 4 MHz) e curta duração (de cerca de 1 s) e ocorrem devido à aceleração local dos elétrons presentes na coroa solar.

Apesar de observadas desde a década de 1940, as emissões tipo I são ainda as menos estudadas. Entre os poucos trabalhos anteriores estão os relatados por (WILD; TLAMICHA, 1965; HANASZ, 1966; ELGARROY; UGLAND, 1970; SARMA, 1994). Desta forma, o conhecimento dos detalhes sobre os mecanismos físicos responsáveis por essas emissões ainda não são plenamente compreendidos e merecem novas investigações, principalmente baseada em observações com melhores resoluções e cobertura em frequência, como as realizadas no presente trabalho.

Grupos de emissões (ou *bursts*) tipo I formam uma tempestade tipo I, que pode durar horas ou até mesmo dias e são provavelmente o resultado de processos de reconexão de linhas de campo magnético, entre arcos magnéticos pré-existent e arcos emergentes. A longa duração é uma das características que distingue tempestades de outros tipos de emissão solar em rádio (KAI et al., 1985).

As tempestades tipo I são caracterizadas como correntes tipo I, quando observadas por instrumentos com alta resolução espectral e temporal, apresentam sequências com pelo menos 4 emissões tipo I individuais, separação inferior a 1 segundo e com aproximadamente a mesma frequência central ( $\pm 5\%$ ).

Neste trabalho, foram analisados dados de 225 correntes tipo I registradas pelo CALLISTO-BLEN no período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011. O CALLISTO-BLEN (localizado na Suíça) é um dos espectrógrafos da rede e-CALLISTO distribuídos ao redor do mundo para monitoramento contínuo da atividade solar na faixa de frequência de 45 a 870 MHz.

Para a análise das correntes tipo I, foi elaborada uma metodologia adaptada de estudos prévios descritos na literatura como os de (ELGARROY; UGLAND, 1970; DE-GROOT et al., 1976; SARMA, 1994), tendo como base a determinação das características espectro-temporais registradas na forma de espectros dinâmicos para as correntes tipo I e os parâmetros físicos da fonte emissora.

Os resultados obtidos da análise das 225 correntes tipo I foram:

a) Parâmetros observacionais determinados:

- frequência inicial ( $f_i$ ): 195 - 450 MHz;
- frequência final ( $f_f$ ): 175 - 380 MHz;
- frequência central ( $f_c$ ): 200 - 400 MHz;
- largura banda ( $\Delta B$ ): 1 - 150 MHz;
- duração total ( $\Delta t$ ): 20 - 600 s;
- taxa deriva frequência ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ):  $-3 - +3$  MHz/s.

b) Parâmetros físicos inferidos:

- densidade eletrônica ( $N$ ):  $(0,5 - 2,0) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ;
- velocidade radial ( $v_r$ ):  $+50 - +550 \text{ km/s}$ ;
- campo magnético ( $B$ ):  $2,2 - 3,3 \text{ G}$ ;
- altura fonte ( $R$ ):  $0,9 - 1,1 R_\odot$ .

Estes resultados, apesar de relativos a um período específico (10 dias durante fase ascendente do ciclo solar 24) de dados e para uma amostra não extensa (225 correntes tipo I), corrobora as evidências para a fenomenologia das tempestades de ruído registradas na rádio emissão solar e na geração de emissões tipo I e sua ocorrência na forma de correntes na faixa de frequências métricas (até cerca de 350 MHz).

Neste sentido, os parâmetros físicos inferidos por meio deste trabalho apontam que os eventos analisados devem ser decorrentes da presença de estruturas magnéticas na coroa solar (associadas às regiões ativas) em altitudes da ordem de  $1 R_\odot$  acima da fotosfera solar e com densidade eletrônica da ordem de  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Em tais regiões, com intensidades de campo da ordem de 2 a 3 G, ocorrem a aceleração e o aprisionamento de partículas do meio, preferencialmente elétrons energéticos (por meio de processos ainda não plenamente estabelecidos), que geram, por emissão de plasma, as correntes registradas na faixa de 150 a 350 MHz. As fontes de emissão apresentaram preferencialmente deslocamentos para mais altas altitudes na cora solar com velocidades de até 550 km/s.

A análise estatística dos resultados mostrou ainda que os valores determinados para os parâmetros observacionais e físicos concordam em grande parte com os reportados anteriormente na literatura como os de (WILD; TLAMICHA, 1965; ELGARROY; UGLAND, 1970; SARMA, 1994), entre outros. As pequenas discrepâncias encontradas nos valores

advém possivelmente destes trabalhos anteriores se basearem no uso de diferentes metodologias e equipamentos com resoluções espectrais, temporais e sensibilidades abaixo das usadas neste trabalho. Por exemplo Hanasz (1966) analisou correntes registradas por instrumento operando na faixa de 25 a 210 MHz; os resultados de Elgaroy e Ugland (1970) basearam-se em dados na faixa de 140 a 170 MHz, e amostra com poucos eventos tipo I acima de 250 MHz.

Tais diferenças instrumentais e metodológicas acarretam que os resultados obtidos no presente trabalho, apesar de menor amostra, mostram-se mais representativos para a faixa de ocorrência das emissões tipo I, até 350 MHz e registrados por instrumento com maior resolução e sensibilidade.

Outra consideração importante abordada no trabalho é a relação do período de dados analisados com a fase do ciclo solar. Devido ao fato dos eventos tipo I ocorrerem na coroa solar e a mesma apresentar grande variabilidade ao longo do ciclo solar, espera-se que as características desses eventos apresentem diferenças dependendo da fase do ciclo em que ocorram.

O período em que as correntes analisadas foram registradas (de 30 julho a 09 de agosto de 2011) situa-se na fase ascendente do atual ciclo solar 24. Os trabalhos anteriores, de Elgaroy e Ugland (1970) e Sarma (1994), referentes à análise de correntes tipo I, também estão relacionados à fase ascendente do ciclo solar, respectivamente, dos ciclos 20 (outubro de 1964 a junho de 1976) e 23 (maio 1996 a dezembro de 2008). No entanto, o presente ciclo solar (24) apresenta-se muito diverso dos demais, com um número de manchas solares durante a fase ascendente e de máximo muito inferior aos anteriores.

Desta forma, quando os resultados obtidos no trabalho foram confrontados com aqueles decorrentes das análises relatadas anteriormente, que analisaram também uma fase ascendente do ciclo solar, porém muito mais intenso, os valores apresentam pequenas diferenças.

Por exemplo, o valor do campo magnético na região da fonte emissora inferido (2 a 3 G) é inferior aos valores obtidos por Elgaroy e Ugland (1970), entre 5 e 10 G, a partir de dados que foram registrados durante a fase ascendente do ciclo 20, num período que apresentou um número de manchas muito superior (cerca de 3 vezes) ao do período em que foram registradas as 255 correntes aqui analisadas.

Outra evidência da provável influência da fase do ciclo está nos valores de velocidade radial inferidos. O limite superior para a velocidade obtido de 550 km/s está abaixo das determinações anteriores de Wild e Tlamicha (1965) de 800 km/s; de Elgaroy e Ugland (1970), de 900 km/s e de Sarma (1994), também de 900 km/s. Isto se deveu,

provavelmente, ao fato dos eventos anteriores terem ocorrido ou estarem relacionados a ciclos solares mais intensos, com maior ocorrência de mancha solares e conseqüentemente, maior complexidade magnética nas regiões ativas, o que aumenta a energia magnética *disponível* para as partículas aceleradas. Estas constatações carecem de aprofundamento, com investigações adicionais de eventos para períodos ao longo de todo o ciclo.

O presente estudo é ainda introdutório ao tema, não esgotando as pesquisas nesta área. Desse modo, algumas sugestões para complementação deste trabalho são feitas na seção a seguir.

## 6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta dissertação, algumas simplificações foram feitas, e devido à inspeção visual dos dados para determinação dos parâmetros observacionais das correntes tipo I, trabalhou-se com uma amostra de dados reduzida, pois eventos apresentando sobreposição e/ou intensidade comparável ao nível do ruído de fundo foram descartadas.

Assim, mesmo não excluindo a importância da experiência do observador na identificação das emissões, o uso de outras ferramentas e métodos computacionais pode permitir a ampliação das amostras de emissões tipo I e/ou correntes tipo I a serem analisadas, principalmente nos casos com sobreposição de emissão e/ou ruído de fundo, possibilitando mais subsídios para a melhor compreensão do fenômeno dessas emissões .

Observações espectrais simultâneas com imageamento das fontes de correntes tipo I por interferômetros em ondas métricas ou decamétricas são outra possibilidade de aprofundamento deste estudo, pois representam potencial diagnóstico do deslocamento das fontes na coroa solar exterior.

Outra análise possível diz respeito às características das correntes tipo I ao longo do ciclo solar, confrontando dados de períodos de máxima e mínima atividades, bem como a comparação de dados de ciclos que apresentem características equivalentes.

Como citado neste trabalho, a rede e-CALLISTO possui vários equipamentos ao redor do mundo, que cobrem praticamente as 24 horas do dia. Um desses equipamentos, instalado em Cachoeira Paulista (SP), o CALLISTO-BR, demonstra um grande potencial para as pesquisas solares, podendo assim contribuir para o avanço neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, H.; HADDOCK, F. T. Wind density model from km-wave type III bursts. **Solar Physics**, v. 29, n. 1, p. 197–209, 1973.

ASCHWANDEN, M. J. **Physics of the Solar Corona - an introduction with Problems and Solutions**. 2nd ed. Chichester, UK: Springer and Praxis, 2005. 27, 38, 39, 40, 41

ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Chromospheric evaporation and decimetric radio emission in solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 438, n. 2, p. 997–1012, 1995.

AUBIER, M. G.; LEBLANC, Y.; MOLLER-PEDERSEN, B. Type I and type III storm radiation: Summary of the observations and theoretical interpretation of the cut-off frequency. **Astron. Astrophys.**, v. 70, p. 685–693, 1978. 71

AURASS, H.; BOHME, A.; KRUGER, A.; FOMICHEV, V. V.; GENEZDILOV, A. A.; MERCIER, C.; TLAMICHA, A.; URPO, S. The radio emission and active region development during the may 15-25, 1981 period. In: AL., O. E. et (Ed.). **Supplement to Solar Radio Storms**. Trieste, Italy, 1981. v. 1, p. 17. 71

BENZ, A. O. Radio astronomical diagnostics. **Lecture Notes in Physics**, v. 468, p. 213, 1996. 28

BENZ, A. O. (Ed.). **Plasma Astrophysics**, v. 279 de **Astrophysics and Space Science Library**, (Astrophysics and Space Science Library, v. 279). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN .

BENZ, A. O. Flare observations. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 5, n. 1, p. 1, feb 2008. 70

BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H. Callisto a new concept for solar radio spectrometers. , v. 226, p. 143–151, jan 2005. 58

BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H.; MANOHARAN, P. K.; RAMESH, R.; ALTYNTSEV, A.; LARA, A.; PAEZ J.AND CHO, K.-S. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-callisto. **Earth Moon Planet**, v. 104, p. 277–285, 2009. 29

BENZ, A. O.; WENTZEL, D. G. Solar type I radio bursts: An ionacoustic wave model. **International Astronomical Union**, v. 86, p. 251–254, 1980. 51, 53

\_\_\_\_\_. Coronal evolution and solar type I radio bursts: An ion-acoustic wave model. **Astron. Astrophys.**, v. 94, p. 100–108, 1981. 51, 53

- CECATTO, J. R. **O Sol**. São José dos Campos: INPE-7177-PUD/38, 2003. 37, 38, 42
- CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. 2. ed. New York: Plenum Press, 1983. ISBN . 45
- COSTAJR, E.; CARDOSO, F. R.; JR., F. J. R. Simões; ALVES, M. V. Ondas de alfvén no meio interplanetário. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. , 2011. 45
- DEGROOT, T.; LOONEN, J.; SLOTTJE, C. Chains of type I stormbursts. **Solar Physics**, v. 48, p. 321–337, 1976. 29, 71, 87
- DULK, G. A. Radio emission from the sun and stars. **Ann. Rev. Astron. Astrophys.**, v. 23, p. 169–224, 1985. 46
- DUTRA, J. A. S. S. **Estruturas Finas Tipo U e J Presentes na Rádio Emissão Solar em Ondas Decimétricas**. Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Paraíba-UNIVAP, 2010. 46
- ELGARROY, O. Highresolution spectrometry of enhanced solar radio emission. **Astrophysica Norvegica**, VII, n. 5, p. 123–261, 1961. 46
- ELGARROY, O.; UGLAND, O. Characteristic properties of small chains of type I solar radio bursts. **Astron. & Astrophys.**, v. 5, p. 372–381, 1970. 29, 54, 71, 73, 78, 87, 88
- FORSYTH, B. **The Solar Wind and Heliosphere**. 2009. 39
- FREUDENRICH, C. C. **How Stuff Works - Como funciona o Sol**. october 2000. <http://ciencia.hsw.uol.com.br/sol2.htm>. 35, 36
- GOLUB, L.; PASACHOFF, J. **The Solar Corona**. [S.l.: s.n.], 2009. 43, 44
- HANASZ, J. Chains of type I solar radio bursts. **Aust. J. Phys.**, v. 19, p. 635–647, 1966. 29, 73, 87
- HATHAWAY, D. H. **The Solar Interior**. december 2011. <http://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>>. 36, 37
- KAI, K.; MELROSE, D.; SUZUKI, S. **Storms**. 1st. ed. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1985. 415-441 p. (Solar Radiophysics -Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths, v. 1). 29, 45, 50, 87
- KARLICKY, M.; JIRICKA, K. Drifting chains of type I radio bursts in the early stage of the two-ribbon flare of may 16, 1981. In: AL., O. E. et (Ed.). **Suplement to 'Solar Radio Storms'**. Trieste, Italy, 1981. p. 81. 71

- KRUCKER, S.; BENZ, A. O.; ASCHWANDEN, M. J.; BASTIAN, T. S. Location of type I radio continuum and bursts on yohkoh soft xray maps. **Solar Physics**, v. 160, p. 151–169, 1995. 28, 52
- KRUGER, A. **Introduction to solar radio astronomy and radio physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1979. ISBN .
- KUNDU, M. R. **Solar Radio Astronomy**. New York: Interscience Publication, 1965. ISBN .
- MALVILLE, J. M. Characteristics of type III radio bursts. **Astrophysics Journal**, v. 136, p. 266–275, 1962.
- MANGENEY, A.; VELTRI, P. On the theory of type I solar radio bursts. **Astron. & Astrophys.**, v. 47, p. 181–192, 1976. 70
- MCLEAN, D. J. Solar activity in the corona. **Astronomical Society of Australia**, v. 4, n. 2, p. 132–138, 1981. 37, 38, 70
- MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. **Plasma Emission Mechanisms**. 1st. ed. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1985. 177-210 p. (Solar Radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths, 1). 45
- MELÉNDEZ-MORENO, J. L. **Explosões solares decimétricas tipo III associadas com a fase impulsiva do *flare* solar**. Dissertação (mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-6382-TDI/601, 1997.
- MELROSE, D. B. The relevance of bipolar type I storm structures to the theory of mode coupling in the solar corona. **Astronomical Society of Australia**, v. 2, n. 4, p. 208–210, October 1973. 53
- \_\_\_\_\_. A plasma-emission mechanism for type I solar radio emission. **Solar Physics**, v. 67, p. 357–375, 1980. 29, 53
- MONSTEIN, C. Catalog of dynamic eletromagnetic spectra observed with callisto. **Physics Astronomy and Eletronics Work Bench**, v. 1, n. 1, p. 1–10, jun 2011.
- MORAES, E. C. **FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. 2002. [http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1\\_ECMoraes.pdf](http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf). 31
- NEWKIRK, G. J. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation. **American Astronomical Society**, v. 133, p. 983–1013, 1961. 70, 84



OLIVEIRA, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004. ISBN 8588325233. 34

PRIEST, E. R. **The Sun and its Magnetohydrodynamics**. 1st. ed. Cambridge: Oxford University Press, 1995. 58-90 p. (Introduction to Space Physics). 34, 43

RAMESH, R.; KATHIRAVAN, C.; SASTRY, C. Estimation of magnetic field in the solar coronal streamers through low frequency radio observations. **The Astrophysical Journal**, v. 711, p. 1029–1032, March 2010. 39

ROSAL, A. C. **Um Estudo em Microondas do Aprisionamento e Precipitação de Elétrons em Explosões Solares**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 45

RYBICKI, G. B.; LIGTHMAN, A. P. **Radiative process in Astrophysics**. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1979. ISBN . 45

SARMA, S. B. S. S. Estimation of magnetic field strength from enhanced solar radio emission. **Aust. J. Phys.**, v. 47, p. 811–815, 1994. 70, 71, 87, 88

SCHUSSLER, M. **The Sun and Its Restless Magnetic Field**. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 23-44 p. (Space Weather, Lect. Notes Phys., 656). 43

SILVA, A. V. R. **Nossa Estrela: O Sol**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 31, 32, 34, 36, 37

SODRÉ, Z. A. L.; MEIRA, D. D.; SILVA, R. D. C.; FERNANDES, F. C. R. Estruturas finas na rádio-emissão solar em ondas métricas registradas pelo callisto-br em 30 de março de 2010. In: UNITAU, X. M. de Pós-Graduação (Ed.). **Anais**. Taubaté - SP: UNITAU, 2011. 29

SPICER, D. S.; BENZ, A. O.; HUBA, J. D. Solar type I noise storms and newly emerging magnetic flux. **Astron. Astrophys.**, v. 105, p. 221–228, 1981. 51

SUNDARAM, G. A. S.; SUBRAMANIAN, K. R. Frequency and time profiles of metric wave isolated type I solar noise storm bursts at high spectral and temporal resolution. **Royal Astronomical Society**, v. 359, p. 580–588, Fevereiro 2005. 29

TABOADA, R. E. R.; BERHONDO, A. L. M.; ZLOBEC, P.; RODRÍGUEZ, A. K. D. Temporal characterization of solar noise storm burst components from signal variability analysis for the september 14, 2005 event. **Cent. Eur. Astrophys. Bull.**, v. 34, p. 135–146, 2010. 28

THEJAPPA, G. A self-consistent model for the storm radio emission from the sun. **Kluwer Academic Publishers**, v. 132, p. 173–193, 1991. 53

TLAMICHA, A.; KEPKA, O.; SNIZEK, V. Structure of solar radio type I bursts noise storms in the 100-130 mhz range in the may 17-24, 1981 period. In: AL., O. E. et (Ed.). **Supplement to 'Solar Radio Storms'**. Trieste, Italy, 1981. v. 1, p. 52. 71

WENTZEL, D. G. Solar type I radio bursts: Shock model. **Astronomy and Astrophysics**, v. 100, p. 20–23, 1981. 53

WILD, J. P.; MCCREADY, L. L. Observations of the spectrum of highintensity solar radiation at metre wavelengths. **CSIRO Australia**, v. 3, p. 387–398, Março 1950.

WILD, J. P.; TLAMICHA, A. Spectral evidence on the origin of type I solar radio storms and the coronal magnetic field. **Nature**, v. 203, p. 1128, 1964. 27, 71

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Academy of Sciences of the Czechoslovak**, v. 16, n. 2, p. 73–76, 1965. 27, 28, 87, 88



## A APÊNDICE A - Composição da Rede e-CALLISTO

Tabela A.1 - Espectrógrafos da rede e-CALLISTO em novembro de 2012.

Localização	Sigla	Antena	Freq. Obs.	Polarização
África do Sul	LA RÉUNION	em implantação	-	-
Alaska	ALASKA	log. per.	45-870 MHz	horizontal
Austrália	PERTH	log. per.	45-870 MHz	linear horiz.
Bélgica	ROB	log. per.	45-870 MHz	linear
Brasil	INPE	log per.	-	2 polar. lineares ortogonais
Cazaquistão	ALMATY	log per.	45-870 MHz	linear horiz.
Coréia Sul	KASI	log per. grande	45-870 MHz	horizontal
Costa Rica	CINESPA	parabólica	status desc.	-
Egito	SWMC	log per.	-	-
Escócia	GLASGOW	create LPDA	-	-
Eslováquia	HURBANOVO	CLP-5130	-	-
Finlândia	MRO	log per.	170-870 MHz	linear hor.
Ilhas Maurício	MRT	log per.	45-870 MHz	linear
Índia	AHMEDABAD	em implantação	-	-
Índia	GAURI	log per.	45-410 MHz	linear
Índia	OOTY	log per.	45-450 MHz	linear
Irlanda	BIR	TCD	45-870 MHz	linear horiz.
Irlanda	BIRO	TCD	20-90 MHz	linear horiz.
Malásia	MALAYSI	em implantação	-	-
Itália	TRIESTE	parabolóide	-	-
México	UNAM	log per.	170-450 MHz	linear horiz.
Mongólia	RCAG	log per.	175-450 MHz	horizontal
Quênia	KENYA	-	-	-
Rep. Tcheca	OSRA	original seg. guerra(7m)	150-870 MHz	-
Rússia	SSRT	log per.	45-450 MHz	rotaciona com mov. SOL
Sri Lanka	-	em implantação	-	-
Suíça	BLEN7M	log per.	170-870 MHz	LHCP e RHCP
Suíça	BLENSW	log per.	170-870 MHz	LHCP e RHCP
Suíça	PHOENIX2	log per.	170-870 MHz	LHCP e RHCP
Suíça	PHOENIX3	log per.	170-870 MHz	LHCP e RHCP
Ucrânia	KRIM	-	-	-
Pune	PUNE	-	-	-

Fonte: <http://www.e-callisto.org/coverage/coverage.html>. Dados de Novembro 2012.

A seguir encontram-se outras informações a respeito da rede e-CALLISTO.

Tabela A.2 - Países candidatos a se integrarem à rede e-CALLISTO.

<b>Possíveis Candidatos</b>
Cuba
Equador
Espanha
Etiópia
Nigéria
Peru
Turquia

Fonte: <http://www.e-callisto.org/coverage/coverage.html>. Dados de novembro 2012.

## B APÊNDICE B - Tabelas de Parâmetros Observacionais e Físicos da Fonte

Neste Apêndice são disponibilizados os dados de números de correntes tipo I distribuídos em relação aos diferentes parâmetros observacionais e físicos determinados.

Tabela B.1 - Largura Banda X Número Correntes.

Largura Banda	Nº Correntes	Largura Banda	Nº Correntes
0 - 5	06	80 - 85	01
5 - 10	09	85 - 90	00
10 - 15	23	90 - 95	01
15 - 20	46	95 - 100	00
20 - 25	37	100 - 105	01
25 - 30	32	105 - 110	00
30 - 35	20	110 - 115	01
35 - 40	14	115 - 120	00
40 - 45	09	120 - 125	00
45 - 50	08	125 - 130	00
50 - 55	06	130 - 135	00
55 - 60	04	135 - 140	01
60 - 65	00	140 - 145	00
65 - 70	04	145 - 150	00
70 - 75	01	150 - 155	00
75 - 80	00	155 - 160	01

Tabela B.2 - Deriva Frequência X Número Correntes.

Deriva Freq.	Nº Correntes	Deriva Freq.	Nº Correntes
-3,5 - -3,0	01	0,0 - 0,5	05
-3,0 - -2,5	00	0,5 - 1,0	01
-2,5 - -2,0	01	1,0 - 1,5	00
-2,0 - -1,5	03	1,5 - 2,0	01
-1,5 - -1,0	14	2,0 - 2,5	01
-1,0 - -0,5	63	2,5 - 3,0	01
-0,5 - 0,0	133	3,0 - 3,5	01

Tabela B.3 - Freq. Inicial X Número Correntes.

<b>Freq. Inicial</b>	<b>Nº Correntes</b>	<b>Freq. Inicial</b>	<b>Nº Correntes</b>
175 - 200	01	325 - 350	32
200 - 225	05	350 - 375	18
225 - 250	40	375 - 400	05
250 - 275	33	400 - 425	00
275 - 300	50	425 - 450	05
300 - 325	36	-	-

Tabela B.4 - Duração X Número Correntes.

<b>Duração</b>	<b>Nº Correntes</b>
0 - 50	17
50 - 100	66
100 - 150	41
150 - 200	34
200 - 250	17
250 - 300	22
300 - 350	10
350 - 400	08
400 - 450	07
450 - 500	01
500 - 550	01
550 - 600	00
600 - 650	01

Tabela B.5 - Altura Fonte X Número Correntes.

<b>Altura Fonte</b>	<b>Nº Correntes</b>
0,975 - 1,000	01
1,000 - 1,025	12
1,025 - 1,050	37
1,050 - 1,075	59
1,075 - 1,100	56
1,100 - 1,125	50
1,125 - 1,150	10

Tabela B.6 - Campo Magnético X Número Correntes.

<b>Campo Magnético</b>	<b>Nº Correntes</b>
2,200 - 2,300	09
2,300 - 2,400	29
2,400 - 2,500	38
2,500 - 2,600	33
2,600 - 2,700	33
2,700 - 2,800	32
2,800 - 2,900	25
2,900 - 3,000	15
3,000 - 3,100	06
3,100 - 3,200	04
3,200 - 3,300	01

Tabela B.7 - Velocidade Radial Positiva X Número Correntes.

<b>Velocidade Radial</b>	<b>Nº Correntes</b>	<b>Velocidade Radial</b>	<b>Nº Correntes</b>
0 - 50	04	700 - 750	03
50 - 100	14	750 - 800	03
100 - 150	17	800 - 850	03
150 - 200	25	850 - 900	01
200 - 250	33	950 - 1000	01
250 - 300	20	1050 - 1100	02
300 - 350	22	1400 - 1450	02
350 - 400	15	1450 - 1500	01
400 - 450	14	1500 - 1550	02
450 - 500	07	-150 - -200	02
500 - 550	12	-200 - -250	03
550 - 600	01	-650 - -700	01
600 - 650	07	-1350 - -1400	02
650 - 700	06	-1600 - -1650	01
-	-	-1650 - -1700	01





## C APÊNDICE C - Fases do Ciclo Solar

Tabela C.1 - O Ciclo Solar com as datas de início, máximo e fim.

<b>Ciclo Solar</b>	<b>Início</b>	<b>Máximo</b>	<b>Fim</b>
18	fev. 1944	mai. 1947	abr. 1954
19	abr. 1954	mar. 1958	out. 1964
20	out. 1964	nov. 1968	jun. 1976
21	jun. 1976	dez. 1979	set. 1986
22	set. 1986	jun. 1989	mai. 1996
23	mai. 1996	mai. 2000	dez. 2008
24	dez. 2008	-	-

Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_cycles](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles).