



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-10048-TDI/885

**MODELO DE ATMOSFERA SOLAR COM INCLUSÃO DE
ESPÍCULAS APLICADO ÀS OBSERVAÇÕES EM
RÁDIO FREQUÊNCIAS**

Caius Lucius Selhorst

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada pelos
Drs. Adriana Válio Roque da Silva e Joaquim Eduardo Rezende Costa, aprovada em
21 de fevereiro de 2003.

523.9

SELHORST, C. L.

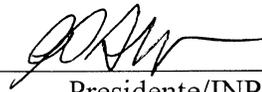
Modelo de atmosfera solar com inclusão de espículas aplicado às observações em rádio frequências / C. L. Selhorst – São José dos Campos: INPE, 2003.

129p. – (INPE-10048-TDI/885).

1.Atmosfera solar. 2.Abrilhantamento de limbo. 3.Raio solar. 4.Modelo atmosférico. 5.Espículas. 6.Radio frequências. I.Título

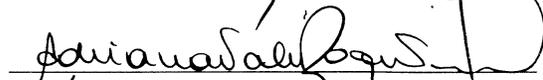
Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Astrofísica.**

Dr. Carlos Alexandre Wuensche de Souza



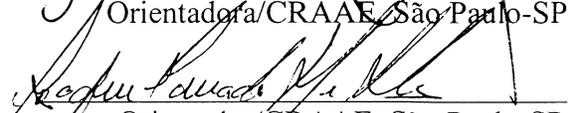
Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr^a Adriana Válio Roque da Silva



Orientadora/CRAAE, São Paulo-SP

Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa



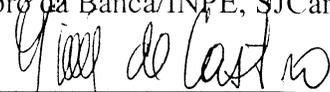
Orientador/CRAAE, São Paulo-SP

Dr. José Roberto Cecatto



Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Carlos Guillermo Gimenez de Castro



Membro da Banca
Convidado Mackenzie, São Paulo-SP

Candidato: Caius Lucius Selhorst

São José dos Campos, 21 de fevereiro de 2003.

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil -
e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos”

Albert Einstein (1879-1955)

A meus pais,
à minha avó,
com carinho.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Adriana Válio Roque da Silva e ao Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa por terem orientado este trabalho e proporcionado meu crescimento científico.

Aos amigos que me ajudaram durante a elaboração do trabalho. Em particular à Tatiana Ferraz Laganá pelas sugestões ao texto e a Carlos Guillermo Giménez de Castro pelo auxílio técnico.

Aos membros da banca pela análise e pelas sugestões apresentadas a esta dissertação.

Ao Rádio Heliógrafo de Nobeyama (NoRH) pela disponibilidade dos mapas solares em 17 GHz que foram utilizados neste trabalho.

À Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie pelo apoio. Agradeço também à Fundação de Auxílio à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro.

E, em especial, à minha família que me apoiou durante todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Em atividade desde junho de 1992, o Rádio Heliógrafo de Nobeyama (NoRH) obtém mapas diários do Sol em 17 GHz. Estes mapas refletem a estrutura da cromosfera e da base da coroa solar, devido à emissão nesta frequência ser formada nesta região da atmosfera. Esta dissertação de Mestrado tem dois objetivos distintos, sendo o primeiro deles analisar e caracterizar o abrilhantamento do limbo e o raio solar durante o ciclo de atividade solar. Este estudo mostrou que o abrilhantamento do limbo polar está anticorrelacionado com o número de manchas solares, enquanto o raio solar está correlacionado com este. O abrilhantamento do limbo não está distribuído uniformemente ao redor do Sol, sendo mais intenso na região polar que na equatorial. Uma das possíveis causas desta distribuição não ser uniforme é a influência de estruturas cromosféricas chamadas espículas. Nosso segundo objetivo é modelar, através de simulações numéricas, a distribuição de brilho do centro ao limbo do Sol. Para tanto, foi construído um modelo para a atmosfera solar (baseado nos modelos propostos na literatura), que reproduzisse quantitativamente as observações citadas acima. Este modelo de atmosfera incluiu também a presença de espículas a fim de estudarmos sua influência na distribuição centro-limbo de brilho. As espículas tiveram suas características físicas (temperatura, densidade, altura, inclinação, posição) atribuídas aleatoriamente, utilizando-se o método Monte Carlo. Os resultados mostraram que uma atmosfera sem espículas renderia um abrilhantamento de 36 %, compatível apenas com as observações dos pólos do Sol, enquanto o raio medido (970") seria ~6" menor que a média dos dados observacionais. Porém, os resultados com a inclusão de espículas, mostraram que de acordo com a constituição física destas, podemos obter um abrilhantamento do limbo e raio solar compatíveis com os resultados obtidos para a região equatorial, neste caso o abrilhantamento pontual observado nos pólos seria gerado por regiões com ausência de espículas.

SOLAR ATMOSPHERIC MODEL WITH SPICULES APPLIED TO RADIO FREQUENCY OBSERVATIONS

ABSTRACT

Since June 1992, daily maps of the Sun at 17 GHz were obtained by the Nobeyama Radioheliograph (NoRH). These maps reflect the chromosphere and low corona structure, since the emission at this wavelength originates from these atmospheric layers. The main goals of this work are twofold. (i) Analyse and characterize the limb brightening and the solar radius throughout the solar cycle. This study showed that the polar limb brightenings are anti-correlated with the sunspot number, while the solar radius is correlated with the solar cycle. Also, the limb brightening is not uniformly distributed around the limb, being more intense in the polar regions than in the equatorial ones. One of the possible causes for this non-uniform distribution is the influence of chromospheric structures called spicules. (ii) Model the center-limb brightening distribution using numerical simulations. For this, we have constructed a two dimensional solar atmospheric model (based in models available in the literature) in order to reproduce quantitatively the observations. This atmospheric model included spicules in order to study their influence in the center-limb brightening distribution. Spicules had their physical characteristics (temperature, density, height, inclination, position) randomly attributed by the Monte Carlo method. The results showed that an atmospheric model without spicules is able to produce 36 % of limb brightening, which is near the brightening observed at the solar poles, however the solar radius measured (970") was ~6" smaller than the mean value of observational data. Nevertheless, the results with inclusion of spicules, showed that depending on their physical parameters limb brightening and solar radius values are obtained in agreement with the observational results for the equatorial region. Moreover, in this case the bright patches observed near the poles can be reproduced by regions without spicules close to the polar regions.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE SÍMBOLOS | |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS | |
| | |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 25 |
| | |
| 1.1 - Características observacionais do Sol..... | 28 |
| 1.1.1 - Abrilhantamento de limbo..... | 28 |
| 1.1.2 - Raio Solar..... | 34 |
| 1.1.3 - Espículas..... | 37 |
| 1.1.4 - Fáculas..... | 41 |
| 1.2 - Modelos da atmosfera solar..... | 45 |
| 1.2.1 - Modelos baseados em linhas de emissão..... | 45 |
| 1.2.2 - Modelos baseados em observações em rádio..... | 50 |
| 1.2.3 - Modelos com a inclusão de espículas | 54 |
| | |
| CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DOS DADOS OBSERVACIONAIS | 57 |
| | |
| 2.1 - Levantamento de dados..... | 57 |
| 2.2 - Abrilhantamento de limbo..... | 59 |
| 2.2.1 - Variação temporal do abrilhantamento do limbo polar..... | 64 |
| 2.2.2 - Variação angular do abrilhantamento do limbo..... | 72 |
| 2.2.3 - Comparação entre mapas nas faixas: rádio (17 GHz), óptico (H α ou 6563 Å) e raio X moles (0,25 - 4 keV)..... | 74 |
| 2.2.3.1 - Mapas no óptico H α | 74 |
| 2.2.3.2 - Mapas em raios X moles (0,25 - 4 keV)..... | 76 |

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.2.4 - Variação do raio solar..... | 79 |
| 2.3 - Conclusões da análise de dados..... | 83 |
| CAPÍTULO 3 - MODELO DE ATMOSFERA..... | 85 |
| 3.1 - Atmosfera sem estruturas cromosféricas..... | 94 |
| 3.2 - Atmosfera com a inclusão de espículas..... | 98 |
| CAPÍTULO 4 - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES..... | 115 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 123 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|------|--|
| 1.1 | Variação da temperatura e da densidade da atmosfera solar..... 25 |
| 1.2 | Espículas distribuídas sobre a superfície solar 37 |
| 1.3 | Espículas distribuídas sobre limbo do Sol..... 38 |
| 1.4 | Variação da temperatura na atmosfera solar (modelos VAL-C e FAL-C)..... 48 |
| 1.5 | Variação da densidade de elétrons na atmosfera solar (modelos VAL-C e FAL-C)..... 49 |
| 1.6 | Variação da temperatura na atmosfera solar para modelos baseados em observações rádio..... 52 |
| 1.7 | Variação da densidade de elétrons na atmosfera solar para modelos baseados em observações em rádio..... 53 |
| 2.1 | Mapa do Sol em 17 GHz..... 58 |
| 2.2 | Histograma da temperatura de brilho para um mapa..... 59 |
| 2.3 | Variação da temperatura de brilho do Sol calmo..... 60 |
| 2.4 | Exemplo de varredura no mapa 17 GHz e sua derivada..... 61 |
| 2.5 | Curva de intensidade média, com destaque para o abrilhantamento do limbo..... 65 |
| 2.6 | Ajuste sobre o abrilhantamento do limbo..... 66 |
| 2.7 | Comparação da variação temporal do abrilhantamento do limbo nos pólos e o número de manchas solares..... 67 |
| 2.8 | Comparação da variação temporal do abrilhantamento do limbo nos pólos e o número mensal médio de fáculas polares..... 69 |
| 2.9 | Variação temporal das larguras do abrilhantamento do limbo nos pólos..... 70 |
| 2.10 | Variação das diferenças em intensidades e larguras do abrilhantamento do limbo nos pólos norte e sul..... 71 |

| | <u>Pág.</u> | |
|------|--|----|
| 2.11 | Varição angular do abrilhantamento do limbo..... | 73 |
| 2.12 | Comparação entre as intensidades de limbo médias em 17 GHz, H α e em raios X moles..... | 75 |
| 2.13 | Varição temporal da distribuição angular do abrilhantamento do limbo em 17 GHz..... | 77 |
| 2.14 | Varição temporal da distribuição angular da intensidade média em raios X moles..... | 78 |
| 2.15 | Mapa do Sol em 17 GHz mostrando pontos sobre o limbo..... | 80 |
| 2.16 | Comparação da variação do raio solar em 17 GHz com o número de manchas solares..... | 81 |
| 2.17 | Varição angular do raio solar em 17 GHz nos períodos de mínima e máxima atividade solar..... | 82 |
| 3.1 | Varição da temperatura da atmosfera solar (modelo inicial)..... | 86 |
| 3.2 | Varição da densidade de elétrons da atmosfera solar (modelo inicial)..... | 87 |
| 3.3 | Comparação entre as variações da temperatura da cromosfera solar dos modelos utilizados como base e o modelo proposto..... | 90 |
| 3.4 | Comparação entre as variações das densidades de elétrons e prótons da cromosfera solar dos modelos utilizados como base e o modelo proposto..... | 91 |
| 3.5 | Modificações feitas na densidade de elétrons da região da coroa solar proposta por Gabriel (1992)..... | 92 |
| 3.6 | Ajuste das temperaturas de brilho prevista pelo modelo aos dados observacionais..... | 93 |
| 3.7 | Exemplo mostrando a distribuição das matrizes utilizadas em nosso trabalho..... | 95 |

| | <u>Pág.</u> | |
|------|--|-----|
| 3.8 | Variação centro-limbo da temperatura de brilho em 17 GHz para o modelo..... | 97 |
| 3.9 | Distribuição das espículas sobre o limbo solar (modelo)..... | 98 |
| 3.10 | Influência da altura, temperatura e densidade das espículas na temperatura de brilho do centro do Sol..... | 100 |
| 3.11 | Variação da temperatura de brilho do centro ao limbo do Sol para uma simulação de atmosfera com espículas..... | 102 |
| 3.12 | Resultado da média das simulações e convolução com o feixe..... | 103 |
| 3.13 | Variação centro-limbo da temperatura de brilho em relação à mudanças na temperatura das espículas..... | 105 |
| 3.14 | Variação centro-limbo da temperatura de brilho em relação à mudanças na densidade das espículas | 107 |
| 3.15 | Variação centro-limbo da temperatura de brilho em relação à mudanças na altura das espículas..... | 110 |
| 3.16 | Variação centro-limbo da temperatura de brilho devido à presença regiões sem espículas..... | 112 |
| 4.1 | Comparação entre dado observacional na região do equador e uma simulação..... | 118 |
| 4.2 | Comparação entre dado observacional na região do pólo e duas simulações..... | 120 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1.1 Medidas de abrilhantamento de limbo em relação à frequência observada..... | 32 |
| 1.2 Características físicas das espículas..... | 38 |
| 3.1 Simulações estudando o efeito da temperatura das espículas..... | 104 |
| 3.2 Simulações estudando o efeito da densidade das espículas..... | 106 |
| 3.3 Simulações estudando o efeito da largura das espículas..... | 108 |
| 3.4 Simulações estudando o efeito da altura das espículas..... | 109 |
| 3.5 Simulações estudando o efeito de regiões sem espículas..... | 111 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

| | |
|-------------------------|---|
| A | - constante (Eq. 1.1), $\text{K GHz}^{-2.1}$ |
| B_0 | - latitude heliográfica do equador solar vista da terra, adimensional |
| g | - fator de Gaunt, adimensional |
| N_e | - densidade de elétrons, cm^{-3} |
| N_i | - densidade de íons, cm^{-3} |
| P | - ângulo polar do Sol, adimensional |
| R_\odot | - raio solar, m |
| s | - distância, m |
| T | - temperatura efetiva, K |
| T_0 | - temperatura de brilho no centro do disco do Sol (Eq. 2.1), K |
| T_B | - temperatura de brilho, K |
| $T_{\text{cromosfera}}$ | - temperatura da cromosfera (Eq. 1.1), K |
| Z | - número atômico, adimensional |

Gregos

| | |
|---------------|--|
| β | - quantidade de abrlhantamento (Eq. 2.1), adimensional |
| κ | - coeficiente de absorção, cm^{-1} |
| λ | - comprimento de onda, m |
| ν | - frequência, GHz |
| θ | - ângulo medido a partir do centro do disco solar (Eq.2.1), adimensional |
| τ | - opacidade, adimensional |
| τ_{5000} | - medida da opacidade em relação à 5000 Å |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| ACRIM | - Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor |
| CICM | - Caltech Irreference Chromosferic Model |
| CRAAM | -Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie |
| EUV | - ultra-violeta extremo |
| FAL | - modelo proposto por Fontenlla, J. M.; Avrett, E. H.; Loeser, R. |
| HPBW | - Half-Power Beam Width |
| HSRA | - modelo Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere |
| I.D.L. | - Interactive Data Language |
| MDI | - Michelson Doppler Imager |
| NoRH | - Nobeyama Radioheliograph |
| OVRO | - Owens Valley Radio Observatory |
| SMM | - Solar Maximum Mission |
| SOHO | - Solar and Heliospheric Observatory |
| VAL | - modelo proposto por Vernazza, J. E.; Avrett, E. H.; Loeser, R. |
| VLA | - Very Large Array |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Quando imaginamos a atmosfera de um astro em equilíbrio hidrostático, esperamos que à medida que nos afastamos deste ocorra uma diminuição da temperatura e da densidade. Porém, as observações da atmosfera solar mostram que esta possui uma estrutura extremamente complexa, que está em constante mudança. Um modelo didático de atmosfera solar mostra que ela está estruturada da seguinte forma (Figura 1.1):

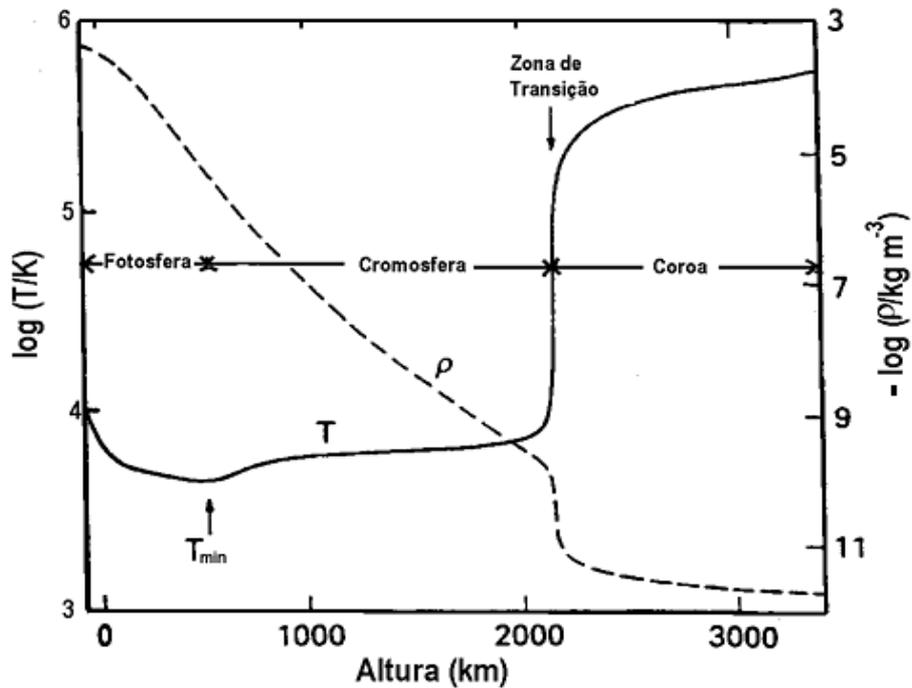


FIGURA 1.1 - Variação da temperatura (contínuo) e da densidade (tracejado) da atmosfera solar.

FONTE: UFRGS (2002).

_Fotosfera: região que vai da superfície solar até um ponto onde a temperatura é

mínima. Nesta região a temperatura e a densidade diminuem com a distância da superfície.

- Cromosfera: região que vai do ponto de mínima temperatura até a região de transição. Observe que existe um pequeno gradiente positivo de temperatura nesta região, enquanto a densidade continua a cair com a distância da superfície.

- Região de Transição: região extremamente estreita onde a temperatura aumenta de $\sim 10^4$ K para $\sim 10^6$ K, enquanto a densidade diminui aproximadamente duas ordens de grandeza.

- Coroa: região pouco homogênea de baixa densidade e alta temperatura, que se estende por vários raios solares.

Um efeito previsto por esse gradiente positivo de temperatura na região da cromosfera é o chamado abrilhantamento de limbo (borda) que deveria ser observado em todas as frequências cuja emissão é formada nesta região, ou seja, observações nas frequências em rádio. Apesar de previsto teoricamente, os primeiros trabalhos tentando comprovar a existência deste abrilhantamento de limbo fracassaram, porém com a melhoria da resolução angular destes instrumentos e das técnicas de análise de dados sua existência já está bastante fundamentada.

Apesar do sucesso de grande parte das observações recentes, o abrilhantamento de limbo muitas vezes é bem menor do que o esperado. Este fato vem sendo atribuído à presença de estruturas cromosféricas chamadas espículas, que são observadas em $H\alpha$, como jatos de matéria densos, quentes e extremamente finos que emergem da

cromosfera e atingem alturas coronais (Zirin 1988).

Nosso trabalho será dividido em duas partes, a primeira será a análise de mapas em 17 GHz obtidos pelo Rádio Heliógrafo de Nobeyama (NoRH), com os seguintes objetivos:

- a) estudar a variação temporal da intensidade e da largura do excesso de temperatura polar e sua correlação com indicadores da atividade solar;
- b) medir a distribuição do brilho em função da posição angular junto ao limbo e comparar com imagens em $H\alpha$ e raios X moles ao longo do ciclo solar;
- c) estudar o comportamento do raio solar em relação à evolução do ciclo de atividade solar.

A segunda parte tem como objetivo propor um modelo de atmosfera solar baseado nos modelos conhecidos na literatura, que se ajuste às características observacionais obtidas pela análise de dados em 17 GHz. Os parâmetros usados para a elaboração deste modelo serão: o raio solar, a temperatura de brilho do centro do disco solar e o brilho de limbo observado. Neste estudo será incluída a presença de espículas na atmosfera a fim de estimar sua influência em relação aos parâmetros utilizados como base para o modelo. Este modelo é um aprimoramento com relação aos anteriores, uma vez que estes basearam-se somente na temperatura de brilho do centro do disco solar.

1.1 CARACTERÍSTICAS OBSERVACIONAIS DO SOL

1.1.1 ABRILHANTAMENTO DE LIMBO

O estudo da variação da temperatura de brilho (temperatura de um corpo negro que gera o mesmo brilho em uma dada frequência que o observado) do centro ao limbo do Sol, obtida a partir de observações em rádio (milimétrico e submilimétrico) tem implicações fundamentais na determinação da estrutura da cromosfera e base da coroa. Estas variações são observadas como abrilhantamento próximo ao limbo do Sol, o que é previsto teoricamente pelo gradiente positivo da temperatura na cromosfera. Neste capítulo faremos uma revisão das observações em rádio que resultam em uma caracterização do abrilhantamento do limbo em rádio.

As observações tentando comprovar a existência do gradiente positivo de temperatura da cromosfera através de um aumento da temperatura de brilho próximo ao limbo solar tiveram início no final da década de 60. Porém falharam nesta tentativa, reportando que o abrilhantamento era menor que o predito ou estava dentro da incerteza da medida (Simon e Zirin 1969, Joensen et al. 1974). A partir de meados da década de 70, muitos autores reportaram sucesso ao observar o abrilhantamento do limbo, principalmente devido ao emprego de antenas com melhor resolução angular e ao uso de novas técnicas para diminuir os efeitos gerados pela falta de homogeneidade dos feixes. Abaixo citamos, em ordem cronológica, algumas destas observações:

- Fürst et al. (1974) observaram o Sol em 5, 10,7, 17 e 24 GHz com o objetivo de determinar a variação da temperatura de brilho do centro ao limbo do Sol, sendo a resolução angular de 2,5', 1,25', 50" e 42", respectivamente. Os resultados mostraram que em 5 GHz existe um abrilhantamento de 15 % para latitudes maiores que 65°, enquanto nas demais frequências a variação da temperatura no limbo foi de ± 1 %. Os autores sugerem que o abrilhantamento do limbo em ondas centimétricas é reduzido pela presença de espículas.

- Shimabukuro et al. (1975) publicaram suas observações em 91 GHz (resolução angular de 14") durante o eclipse total de 1973, onde obtiveram um abrilhantamento de 20% em relação à temperatura do centro do disco do Sol, dentro de 30" de arco próximo à borda do Sol. Um fato a ser salientado é que observações durante eclipses trazem um grande aumento na resolução angular obtida, visto que a antena utilizada de apenas 92 cm de diâmetro tinha uma resolução angular muito baixa;

- Kundu et al. (1977) usando uma antena de 26 m de diâmetro, fizeram varreduras da Lua para caracterização do feixe e encontraram ~10% de abrilhantamento em 33 e 37 GHz, tanto na direção leste-oeste, quanto na norte-sul. A Antena utilizada possuía resolução de 1,6' em 33 GHz e 1,4' em 37 GHz;

- Lindsey et al. (1981) reportaram um abrilhantamento gradual de 3-5% em 857 GHz (resolução angular de 29") de 1 minuto de arco de largura próximo ao limbo;

- Horne et al. (1981) detectaram em 235 GHz, com resolução angular de 28 segundos de arco, um aumento de brilho próximo ao limbo de $10\% \pm 5\%$;

- Marsh et al. (1981) observaram um abrilhantamento de limbo de ~80% em 4,9 GHz, utilizando dados do interferômetro VLA durante um eclipse solar, o que permitiu uma resolução angular de 13,8". Porém, também reportaram a não observação de um abrilhantamento em 10,7 GHz, utilizando o interferômetro OVRO com resolução angular de 7,4" para o mesmo eclipse.

- Gómez-González et al. (1983) compararam varreduras do Sol e da Lua em 89

GHz (HPBW=1') e obtiveram um brilho além de $\sim 0,6 R$ com intensidades de $\sim 6-10\%$ acima da temperatura do centro do disco do Sol;

- Lindsey et al. (1984) estimaram um brilho de $10-13\%$ em 366 GHz, com resolução angular de $93''$;

- Kosugi et al. (1986) encontraram um brilho de $3-7\%$ em 36 GHz (HPBW= $46''$) para latitudes maiores que 65° , enquanto nenhum brilho maior que 1% foi observado na região do equador. Porém, as observações em 98 GHz (HPBW= $17''$) não mostraram brilho;

- Ewell et al. (1993) observaram o Sol em 350 GHz (HPBW= $20,6''$) durante o eclipse total de 1991, como a velocidade da Lua foi de $\sim 0,5 \text{ arcsec s}^{-1}$, que em princípio resultou em uma resolução angular de $\sim 0,5''$ para a resolução temporal que utilizaram, mediram um brilho de 10 a 35% ;

- Bastian et al. (1993) mediram na frequência de 350 GHz (HPBW= $20,6''$) aproximadamente 12% de brilho para a região estudada (até $0,94 R_\odot$), o que resulta em $\sim 16\%$ extrapolando para $1 R_\odot$;

- Lindsey et al. (1995) observaram um brilho de limbo em 1 minuto de arco próximo ao limbo, em 250, 350 e 860 GHz com as respectivas intensidades de $\sim 25\%$, $\sim 27\%$ e $\sim 30\%$. Neste trabalho foram feitos dois dias de medidas para cada frequência, sendo estas bastante afetadas pelas condições da atmosfera resultando em variações na resolução angular. A resolução em 250 GHz variou de $14-16,8''$ nas direções norte-sul (y) e leste-oeste (x), enquanto em 350 GHz a variação foi de

18,4-20,2" em x e de 14-20,2" em y. Em 860 GHz o intervalo de resolução ficou entre 6,8-17,6" e entre 5,5-9, em x e y, respectivamente;

- Shibasaki (1998) analisou mapas diários em 17 GHz (HPBW=10") entre 1992 e 1997 obtidos pelo NoRH através de uma varredura norte-sul, visando estudar apenas o abrilhantamento polar dos mapas. Seus resultados mostram que existe um aumento gradual do brilho a partir de 50° de latitude atingindo intensidades de até 40% acima do Sol calmo. Ele concluiu, que o abrilhantamento polar nesta frequência é a soma do abrilhantamento de limbo (~10%) e da emissão de estruturas intrínsecas aos pólos;

- Pohjolainen (2000) observou um abrilhantamento de ~0,5-2% em 87 GHz, com resolução angular de 1 minuto de arco.

Na Tabela 1.1 os resultados foram agrupados em função da frequência de onda observada. Podemos notar que os resultados mostram um excesso na temperatura de brilho do limbo variando de 0,5 a 80% acima do nível do Sol calmo, aparentemente, sem qualquer dependência em relação ao comprimento de onda. Apesar destes resultados darem respaldo observacional ao abrilhantamento de limbo em rádio, muitos autores também reportaram sua ausência em várias frequências, entre eles estão: 25 GHz (Furst et al. 1979), 35 GHz (Kawabata et al. 1980), 88 GHz (Simon e Zirin 1969, Joensen et al. 1974), 98 GHz (Kosugi et al. 1986), 100 GHz (Belkora et al. 1992), e 114 GHz (Wannier et al.1983).

Muitos autores justificam a não observação ou o pequeno excesso de brilho no limbo pela presença de espículas (Simon e Zirin 1969, Fürst et al. 1974, Marsh et al. 1981, Wannier et al. 1983), embora não exista um consenso sobre esta influência. Por exemplo, Lindsey et al. (1981) argumentaram que o abrilhantamento gradual observado

em 860 GHz provinha de material cromosférico abaixo da altura das espículas. Porém em 235 GHz, Horne et al. (1981) propuseram que as espículas são opticamente espessas e por isso aumentam o raio aparente do Sol, fazendo com que o abrilhantamento medido seja proveniente das espículas.

TABELA 1.1 - Medidas de abrilhantamento de limbo em relação à frequência observada.

| <i>Frequência (GHz)</i> | <i>Abrilhantamento do limbo (%)</i> | <i>Largura (minuto de arco)</i> | <i>Referência</i> |
|-----------------------------|---|-------------------------------------|--|
| 5 | 15-80 | | Fürst et al. 1974, Marsh et al. 1981 |
| 17 | 10 | | Shibasaki 1998 |
| 33-37 | 3-10 | | Kundu et al. 1977, Kosugi et al. 1986 |
| 87-89 | 0,5-10 | 2 | Gómez-González et al. 1983, Pohjolainen 2000 |
| 91 | 20 | 0.5 | Shimabukuro et al. 1975 |
| 230-250 | 5-25 | 1 | Lindsey et al. 1995, Horne et al. 1981 |
| 350-366 | 10-27 | 1-2 | Lindsey et al. 1995, Lindsey et al. 1984, Bastian et al. 1993, Ewell et al. 1993 |
| 857-860 | 3-30 | 1 | Lindsey et al. 1995, Lindsey et al. 1981 |

A grande maioria dos trabalhos acima foi feita com dados esporádicos tomados durante um curto período de tempo e não permitem um estudo quanto à dependência do

abrilhantamento do limbo ao longo do ciclo solar. Em um dos poucos trabalhos com esse objetivo, Efanov et al. (1980) analisaram observações em 22 GHz e 37 GHz entre 1968 e 1972 (período de máximo) e estas não mostraram abrilhantamento nos pólos. Porém este abrilhantamento apareceu nas observações após este período durante o mínimo de atividade solar. Com base nestas evidências observacionais, Efanov et al. (1980) propuseram a anticorrelação entre a atividade solar e o abrilhantamento do limbo próximo aos pólos.

Outra questão carente de análise é a distribuição angular do excesso de brilho do limbo solar, ou seja, se existem diferenças nos abrilhantamentos medidos em posições diferentes do limbo solar (pólos, equador, regiões intermediárias). Entre os trabalhos com esta proposta estão: Kundu et al. (1977) e Bastian et al. (1993) que não observaram diferenças entre as distribuições de brilho na direção norte-sul e leste-oeste. Nos mapas em 17 GHz obtidos pelo NoRH, é visível que os pólos do Sol possuem um abrilhantamento do limbo maior que o restante do Sol, exceto pelas regiões ativas. Este abrilhantamento polar é visto como pontos brilhantes nos mapas e levou Shibasaki (1998) a sugerir que esta é uma propriedade intrínseca da região. Porém, este trabalho baseou-se apenas em varreduras na direção norte-sul, o que não permite um estudo conclusivo da distribuição angular do anel de abrilhantamento nesta frequência.

1.1.2 RAIOS SOLAR

A determinação precisa do raio óptico solar é de suma importância para um melhor ajuste dos modelos de estrutura solar. Variações no raio solar podem acarretar mudanças na irradiância solar, que podem afetar o clima na terra. Pelo fato da emissão em frequências em rádio (microondas) ser formada principalmente por emissão térmica proveniente da cromosfera e das regiões acima desta, o estudo da variação do raio solar nestas frequências nos permite determinar as condições da camada atmosférica onde a emissão é formada. Neste capítulo fazemos uma revisão bibliográfica dos estudos sobre o raio solar e sua variação.

Vários autores têm estudado as variações do raio solar ao longo dos anos, principalmente em comprimentos de ondas no óptico, porém não existe um consenso sobre a dependência do raio do Sol em relação ao ciclo de atividade solar. Alguns autores concluem que o raio solar está correlacionado com o ciclo de atividade solar, dentre eles estão:

- Ulrich e Bertello (1995) reportaram observações em $\lambda=525\text{nm}$ (Fe I) entre 1967 à 1995, mostrando variações com amplitude máxima de $\sim 0,35''$ e correlação com a atividade solar. O raio solar foi definido no ponto onde a intensidade cai a 25% do valor do Sol calmo;
- Rozelot (1998) encontrou uma boa correlação entre a variação do raio do Sol, medida com astrolábio, e a variação da irradiância solar entre 1979 e 1992;
- Costa et al. (1999) observaram uma diminuição do raio solar em 48 GHz entre 1991 e 1993, período que corresponde ao decréscimo da atividade solar.

Extrapolando de forma linear o resultado obtido para um período de 5,5 anos concluem que o decréscimo no raio solar seria de 8" para todo o ciclo solar. Outro resultado importante do trabalho foi a boa correlação entre a variação do raio solar e a variação da constante solar;

- Emílio et al. (2000) analisaram dados do Michelson Doppler Imager (MDI) a bordo do satélite SOHO encontrando uma variação linear de $8,1 \pm 0,9$ mas/ano (mas=milésimos do segundo de arco) e correlação com o ciclo de atividade solar. Neste estudo o limbo do Sol foi definido no ponto de inflexão do perfil de intensidade.

Porém, outros autores encontraram anticorrelação entre o ciclo de atividade solar e o raio solar, alguns destes trabalhos são citados abaixo:

- Gilliland (1981) analisou dados de 265 anos feitos no óptico e propôs que o raio solar varia com dois ciclos, um de 76 anos e outro de 11 anos que está anticorrelacionado com as medidas do número de manchas solares;

- Wittmann et al. (1993) através de medidas feitas no óptico entre 1990 e 1992 e da comparação com medidas do mesmo sítio feitas em 1981 concluíram que houve anticorrelação entre a variação da atividade solar e as mudanças medidas no raio;

- Delache et al. (1993) concluíram que houve anticorrelação entre o número de manchas solares e o raio solar medido através de astrolábio, para o período 1985-1991;

- Laclare et al. (1996) utilizaram medidas feitas com astrolábio entre 1975 e 1994, onde o raio solar foi definido como o ponto onde a intensidade tem seu ponto de inflexão, concluindo que a variação temporal do raio solar está oposta em fase com relação à variação do número de manchas solares.

Como podemos ver o estudo da variação do raio solar e a sua correlação com o ciclo de atividade solar está longe de ser conclusivo. O estudo feito por Costa et al. (1999) apresentou um resultado muito interessante ao encontrar uma correlação entre as variações do raio solar em 48 GHz e da constante solar, sendo esta a medida do fluxo de fótons solares que atinge a Terra e tem como consequência produzir mudanças no clima terrestre. Neste trabalho estudaremos a variação do raio solar nos mapas 17 GHz, obtidos pelo NoRH, para o período 1992-2002 e sua correlação com os indicadores da atividade solar.

O raio solar também será usado como parâmetro de ajuste para o modelo atmosférico que iremos utilizar. Neste modelo serão incluídas espículas, as quais são apontadas como responsáveis pelo aumento do raio aparente do Sol, uma vez que são opticamente espessas em algumas frequências em rádio (Horne et al. 1981).

1.1.3 ESPÍCULAS

As espículas são componentes fundamentais da cromosfera solar e podem ser um dos responsáveis pela observação (ou não) do anel de abrilhantamento em rádio, visto que seu papel nestas observações ainda é bastante discutido. Elas são observadas em linhas espectrais cromosféricas há mais de 100 anos, principalmente na linha do átomo de hidrogênio com comprimento de onda 6563 \AA (Figuras 1.2 e 1.3). Ela são vistas como jatos de gás com fluxo de massa ascendente, aproximadamente 100 vezes maior que o do vento solar e por isso têm um importante papel no balanço de massa da atmosfera solar.

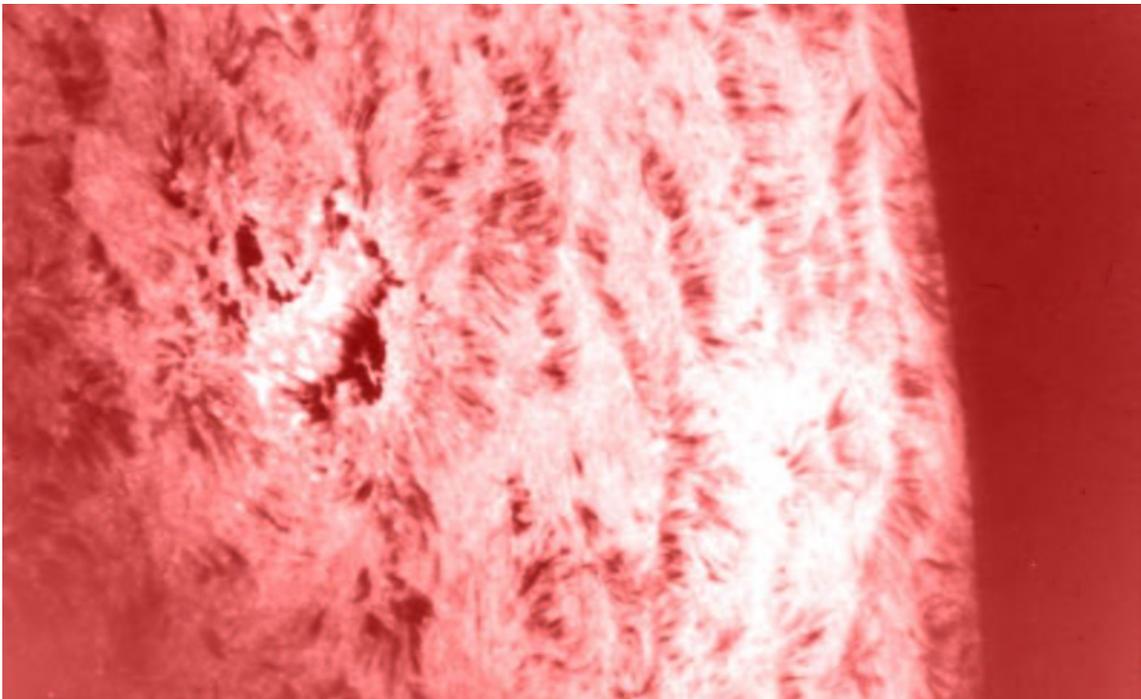


FIGURA 1.2 - Imagem de espículas distribuídas sobre a superfície solar.

FONTE: NASA (2002).

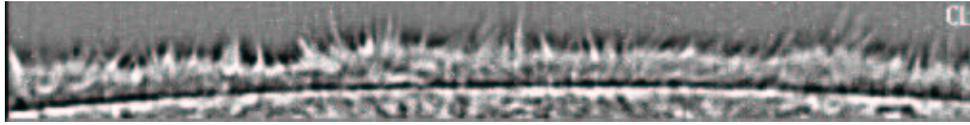


FIGURA 1.3 - Imagem de espículas sobre o limbo solar, observadas no centro da linha espectral $H\alpha$.

FONTE: Big Bear Solar Observatory (2002).

Ainda não existe um consenso a respeito das características físicas das espículas (temperatura, densidade, altura, diâmetro, velocidade de ascensão). Isto deve-se ao fato de terem a forma de um cilindro muito fino e por esse motivo, apesar de estarem distribuídas por toda a superfície solar, podemos estudá-las em detalhes somente quando projetadas no limbo do Sol. Na Tabela 1.2 são relacionadas algumas características observacionais presentes na literatura.

TABELA 1.2 - Características físicas das espículas

| <i>Diâmetro (km)</i> | <i>Altura (km)</i> | <i>Temperatura (K)</i> | <i>Densidade (g/cm³)</i> | <i>Referência</i> |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|---|---|
| ~400-1500 | 6500-9500 | 9000-16500 | $\sim 0.5-3 \times 10^{-13}$ | Beckers (1968,1972) |
| | 7000-13000 | | $\sim 1 \times 10^{-13}$ | Bray e Loughhead (1974) |
| ~300-1500 | 3000-18000 | 6400 | $\sim 0.5 \times 10^{-13}$ | Coates (1958) |
| ~300-1500 | | | | Lynch et al. (1973), Ajmanova et al. (1982), Nishikawa (1988) |
| | | 5000-15000 | $\sim 3 \times 10^{-13}$ | Sterling (2000) |
| | 6000-10000 | ~15000 | $\sim 1 \times 10^{-13}$ | Cheng (1992) |
| 300-1500 | 5000-7000 | ~10000 | $\sim 1 \times 10^{-13}$ | Saito et al. (2001) |

Apesar do curto período de duração das espículas, 1-20 minutos (Bray e Loughhead 1974, Zirin 1988, Pataraya et al. 1990, Cheng 1992, Saito et al. 2001), conclui-se que entre 1 e 10% da superfície do Sol está coberta por espículas a qualquer momento que o Sol é observado (Parker 1991, Zirin 1988). A velocidade de ascensão da espícula, é estimada entre 20 e 40 km/s (Zirin 1996, Sterling 2000, Saito et al. 2001), e grande parte delas retorna ao mesmo lugar de onde saem e com as mesmas velocidades, porém existem divergências quanto ao movimento ser balístico ou não.

As espículas estão intrinsecamente ligadas à rede magnética da cromosfera, pois emergem nas margens dos supergrânulos (raio ≈ 16000 km), onde o campo magnético é mais intenso. Devido ao tempo de vida do supergrânulo (tempo ≈ 30 horas) ser muito maior do que o da espícula, existe uma grande possibilidade de espículas subseqüentes emergirem no mesmo local, tendo em vista que existem cerca de 40 espículas para cada célula de supergrânulo (Pataraya et al. 1990).

O campo magnético também controla a inclinação da espícula em relação à normal à superfície. Mosher e Pope (1977) mediram a inclinação de mais de 5000 espículas e observaram que a maioria das espículas possuem inclinações de até 30° em relação à normal, sendo que quase nenhuma tem inclinação maior que 60° . Resultados similares foram encontrados por Coates (1958) e Heristchi e Mouradian (1992).

Existem vários modelos que tentam explicar o mecanismo de geração das espículas e o conseqüente fluxo de matéria que estende-se da fotosfera até a coroa. Dentre estes modelos Sterling (2000) revisou os seguintes casos possíveis:

- um pulso de pressão aplicado na fotosfera ou cromosfera próximo à base do tubo de fluxo magnético. Um pulso de pressão poderia ser uma conseqüência natural de

um fluxo convectivo manifestado em movimentos granulares interagindo com material na base do tubo de fluxo magnético, ou resultar da liberação de energia devido a reconexões entre campos magnéticos de pequena escala;

- um pulso de pressão liberado em uma região localizada num tubo de fluxo magnético na média ou alta cromosfera, novamente devido às reconexões magnéticas;

- ondas Alfvén (ondas hidromagnéticas longitudinais) geradas por torções ou distúrbios na base do tubo de fluxo magnético, como no primeiro caso, as perturbações podem ser resultado de grânulos que tocam o tubo de fluxo magnético.

1.1.4 FÁCULAS

Fáculas são áreas de gás quente observadas na fotosfera solar em luz branca. Ocorrem em torno de manchas solares, mas também podem aparecer antes ou após a formação da mancha. Apesar de serem observadas nestas regiões, as fáculas, podem ocorrer sobre toda a superfície solar, embora sejam observadas somente nas proximidades do limbo solar, devido ao obscurecimento de limbo que ocorre nas observações da fotosfera. Isto se deve ao seu baixo contraste de temperatura em relação a temperatura do centro do disco (~300 K mais quentes). Elas consistem de um alinhamento de regiões brilhantes com 5000 a 10000 km de largura e até 50000 km de comprimento, onde cada elemento da região possui um formato aproximadamente oval com até 5000 km de diâmetro. O tempo de vida médio destas fáculas é de aproximadamente 90 dias (Seal e Seal, 2003).

Outro tipo de fácula observada na fotosfera são as chamadas fáculas polares, que ocorrem aproximadamente acima de 50° de latitude. Estas fáculas são menores do que as que ocorrem nas regiões das manchas solares e são vistas com formas ovais ou apenas como pontos, com tamanhos de até ~2500 km de diâmetro. Seu tempo de vida varia de poucos minutos até poucas horas. Um aspecto bastante interessante em relação às fáculas polares é o fato de ocorrerem com maior frequência durante o mínimo da atividade solar (Janssens e Dubois 2003, Seal e Seal 2003).

Um fenômeno cromosférico similar às fáculas são as plages, que também são regiões mais brilhantes que o valor médio da região onde se encontram, possuem a mesma forma que as fáculas e ocorrem ao redor das manchas solares. Porém, os dois fenômenos não possuem uma correspondência um a um em relação à sua exata localização, indicando que são fenômenos diferentes. As fáculas cromosféricas (plages) são vistas sobre todo o disco solar enquanto as fotosféricas são observadas nas proximidades do limbo solar. Um aspecto relacionado às plages que será utilizado em nosso trabalho é a não ocorrência de espículas nestas regiões (Seal e Seal, 2003).

Os estudos das propriedades das regiões faculares têm sido feitos com vários objetivos diferentes entre eles estão a influência delas na irradiância solar e sua correlação com locais com regiões mais quentes em frequências em rádio. Abaixo apresentamos alguns trabalhos relacionados com as propriedades das fáculas.

Steinegger et al. (1996) estudaram a relação entre razão do déficit de radiação gerado pelas manchas solares e do excesso proveniente das fáculas com as medidas de irradiância feitas pelo SMM (Solar Maximum Mission) e pelo ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) e concluíram que existe uma boa concordância entre as medidas. Concluíram também que em regiões com manchas solares grandes o déficit em luminosidade gerado por estas, domina por um fator de 2 a 3 vezes o excesso de luminosidade gerado pelas fáculas, enquanto para regiões com manchas menores o excesso facular é maior por um fator semelhante.

Um trabalho semelhante ao anterior foi feito por Chapman et al. (1997) que concluíram que a razão entre as áreas das fáculas e manchas solares aumenta significativamente com o progresso do ciclo solar em direção ao máximo. Esta razão indica que o excesso de irradiância associado com fáculas supera o déficit associado com manchas solares por até ~50%.

Erofeev (2001) investigou a evolução da distribuição latitudinal das fáculas polares durante o ciclo solar, onde foram consideradas medidas em um intervalo de 10 anos. O autor sugere que o número de fáculas que aparecem durante um certo intervalo de tempo em uma área da superfície solar é uma medida do fluxo magnético através da área. Conseqüentemente a densidade superficial das fáculas polares é uma medida da densidade média do fluxo magnético. Os dados mostram que o campo magnético de

larga escala está fortemente concentrado nos pólos, durante vários anos nas proximidades do mínimo de manchas solares, enquanto que neste período a densidade de fáculas polares aumenta com o aumento da latitude.

Riehkainen et al. (1998), utilizaram um radiotelescópio em 37 GHz com resolução de 2,4 minutos de arco e estudaram a distribuição das regiões com temperaturas de brilho maiores. Constataram que as regiões que aparecem em latitudes mais baixas parecem ter uma frequência que segue o ciclo de manchas, enquanto a frequência das que estão localizadas em altas latitudes estão correlacionadas com o ciclo das fáculas polares. Segundo os autores, estas observações suportam a sugestão de que o fenômeno do aumento de temperatura de brilho em rádio pode estar conectado com a presença de grupos de fáculas polares ou com o campo magnético local associado a fáculas.

Em Riehkainen et al. (2001) foram estudadas as relações entre as regiões de maior brilho em 37 e 87 GHz, com imagens no ultravioleta em 171 Å e fáculas polares. Os resultados mostraram que as regiões mais brilhantes em rádio correspondiam às regiões relativamente escuras nas imagens em ultravioleta, enquanto que estruturas brilhantes no ultravioleta são circundadas por grupos de fáculas polares e outras estruturas brilhantes, porém difusas, em luz branca. A relação entre as regiões mais quentes em rádio e as fáculas se mostrou bastante complicada, visto que algumas vezes, grupos de fáculas polares estão situados ao redor do máximo de brilho da região em rádio ou em suas bordas e outras vezes aparecem distribuídos sobre toda a área da região.

Gelfreikh et al. (2002) utilizaram mapas em 17 GHz do NoRH entre 1992 e 2001 para analisar o número e a área das regiões do aumento e também da redução da temperatura de brilho, concluindo que o aumento do brilho ocorre em duas regiões no Sol, a primeira próximo ao equador onde ocorrem as manchas solares e a segunda na região polar, enquanto que as regiões mais escuras do que a média estão distribuídas de

maneira uniforme até cerca de 40-50° de latitude. A comparação com as observações das fáculas polares mostram que as áreas do aumento de emissão em rádio imitam a região onde ocorrem as fáculas.

1.2 MODELOS DA ATMOSFERA SOLAR

Apesar da estrutura de atmosfera mostrada pela Figura 1.1 ser de grande valor didático, ela se mostra falha quando confrontada com as observações no contínuo de rádio. Na tentativa de se obter uma melhor compatibilidade entre a teoria e a observação, modelos empíricos e semi-empíricos têm sido formulados. Dentre eles estão a série VAL (Vernazza et al. 1973, 1976 e 1981) e os modelos FAL (Fontenla et al. 1990, 1991, 1993). Neste capítulo faremos uma breve introdução aos modelos atmosféricos.

1.2.1 MODELOS BASEADOS EM LINHAS DE EMISSÃO

Um dos primeiros modelos atmosféricos foi proposto por Gingerich et al. (1971) e ficou conhecido como HSRA (Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere), onde foram usadas observações em ultravioleta extremo para modelar a baixa cromosfera. Este modelo se estende de $\tau_{5000}=10^{25} \cong -150$ km e $\tau_{5000}=10^{-8} \cong 1900$ km, onde $\tau_{5000}=1$ é o ponto de origem e a medida da opacidade é feita em 5000 \AA . No estudo, a atmosfera é considerada homogênea, plano-paralela e em equilíbrio hidrostático. Os autores ressaltam que o modelo para a região acima da temperatura de mínimo deve ser considerado somente como uma representação média das condições do meio, devido à bem conhecida natureza não-homogênea da cromosfera. O modelo se ajusta muito bem com as observações entre $0,4$ e $10 \mu\text{m}$, porém é incompleto para o estudo da emissão em 17 GHz , pois modela somente uma região muito estreita da atmosfera, chegando somente até a baixa cromosfera.

O modelo VAL II (Vernazza et al. 1976) foi construído baseado em observações no contínuo com o intuito de modelar a região da fotosfera e da temperatura do mínimo da atmosfera solar, mostrando-se compatível com as intensidades observadas e com a distribuição de fluxos no intervalo $0,125\text{-}500 \mu\text{m}$. Neste trabalho são resolvidas as equações da transferência radiativa e do equilíbrio estatístico para Si I, C I, H e H,

outros átomos e íons foram tratados em equilíbrio termodinâmico local. A atmosfera foi considerada estar em equilíbrio hidrostático, mas não em equilíbrio radiativo. Apesar de ser um modelo bastante aceito pela comunidade científica, ele não será utilizado em nossas simulações pois modela somente uma região que está abaixo do local onde se forma a emissão em 17 GHz.

As observações do Sol obtidas pelo satélite *Skylab* em EUV (ultra-violeta extremo) com comprimentos de onda entre 40 e 140 nm mostraram a estrutura sem homogeneidade da cromosfera. Estas medidas foram usadas para a construção do modelo semi-empírico VAL III (Vernazza et al. 1981) e levaram à separação do modelo em seis componentes diferentes com as seguintes características: A) um ponto escuro dentro de um célula, que representa um elemento de área sobre o Sol; B) o valor médio do centro da célula; C) o valor médio do Sol calmo; D) o valor médio da rede cromosférica; E) um elemento brilhante da rede cromoférica; F) um elemento muito brilhante da rede cromosférica. Em cada caso foram resolvidas as equações da transferência radiativa, equilíbrio estatístico e equilíbrio hidrostático para uma atmosfera plano-paralela fora do equilíbrio termodinâmico local. O estudo teve o propósito de determinar a estratificação da temperatura e densidade da atmosfera, cujo resultado é um espectro em melhor acordo com o observado. A construção do modelo também levou em consideração as observações das seguintes linhas espectrais: H, H⁺, C, Si, Fe, Mg, Al, He, He II, Ca II, Mg II e vários outros átomos e íons. Os modelos VAL III (A-F) consideram a atmosfera desde a fotosfera até o início da região de transição que no modelo C está em ~2300 km. O modelo se mostra bastante confiável em relação às observações de linhas espectrais, porém a temperatura de brilho prevista para frequências rádio está acima do que mostram as observações, por exemplo, em 18 GHz a temperatura de brilho prevista pelo modelo seria ~40% maior do que é observado (Bastian et al. 1996). Daqui em diante este modelo será citado apenas como VAL.

Uma série mais recente de modelos atmosféricos foi feita por Fontenla et al. (1990,

1991 e 1993) e ficaram conhecidos como modelos FAL. Estes modelos, assim como os anteriormente citados, utilizaram observações de linhas espectrais no visível e no ultravioleta, bem como observações no contínuo. Nos artigos FAL I e II o objetivo foi explicar a origem das linhas de emissão do hidrogênio no ultravioleta, onde foi incluída a difusão de partículas que, segundo os autores, explica o equilíbrio de energia na baixa região de transição. No terceiro artigo da série (FAL III) continuaram a estudar a baixa região de transição avaliando os efeitos da difusão na formação do espectro de He I e He II e no equilíbrio energético. O estudo é feito numa atmosfera plano-paralela unidimensional em equilíbrio hidrostático, e com equilíbrio de energia aproximado entre fluxo descendente de aquecimento vindo das camadas mais externas da atmosfera, aquecimento e as perdas radiativas.

Assim como no modelo VAL, o estudo feito nos modelos FAL II e III foi separado em componentes diferentes, como se segue:

- A) representa uma região escura no Sol calmo;
- C) representa o valor médio do Sol calmo;
- F) corresponde a uma região brilhante do Sol calmo;
- P) representa uma típica área de plage;

Os autores chamam a atenção para o fato das regiões da fotosfera e da baixa cromosfera serem razoavelmente bem definidas, porém a parte da alta cromosfera não possui tal grau de confiança, já que existem poucas observações na região. O modelo FAL III se ajusta bem às observações no visível e no ultravioleta e está mais próximo dos valores de temperatura de brilho observados em rádio do que o modelo VAL (Bastian et al. 1996). Daqui em diante sempre que nos referirmos ao modelo FAL será ao FAL III.

Nas Figuras 1.4 e 1.5 são mostradas as curvas de temperatura e densidade de elétrons para os modelos VAL-C e FAL-C, que representam a temperatura média do Sol calmo, onde podemos ver que não existem grandes diferenças entre as curvas.

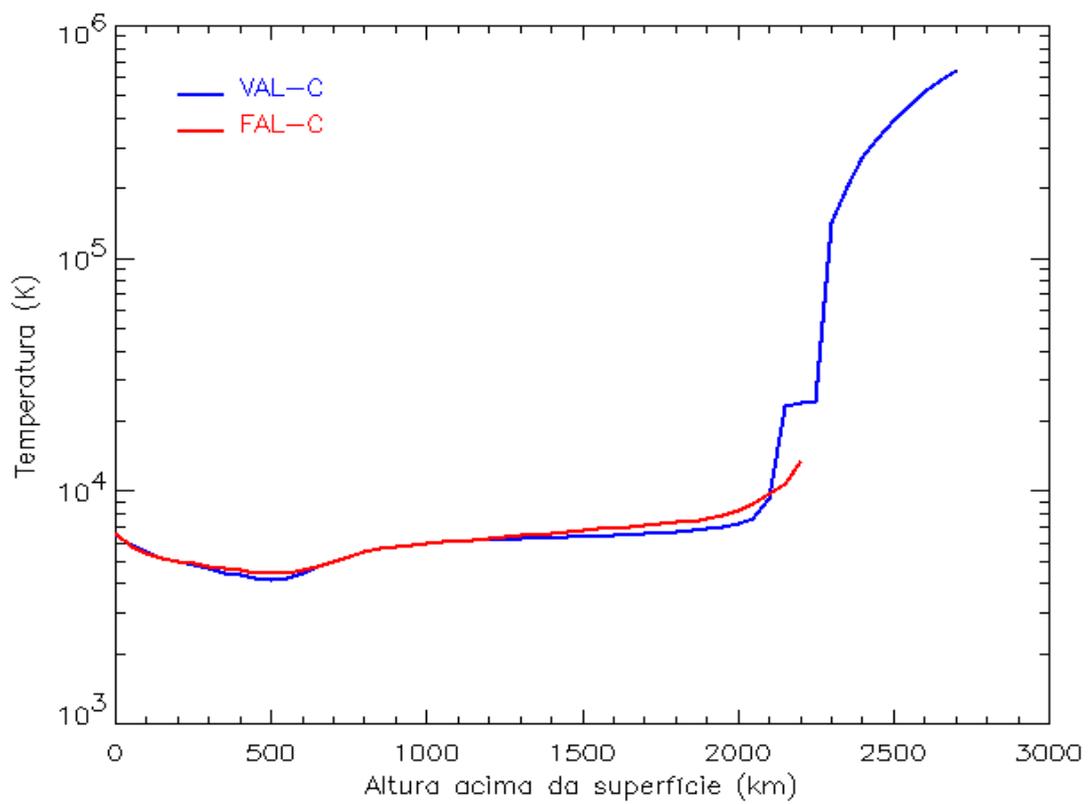


FIGURA 1.4 - Variação da temperatura na atmosfera solar para os modelos VAL-C e FAL-C.

FONTE: adaptação de Vernazza et al. (1981) e Fontenla et al. (1993).

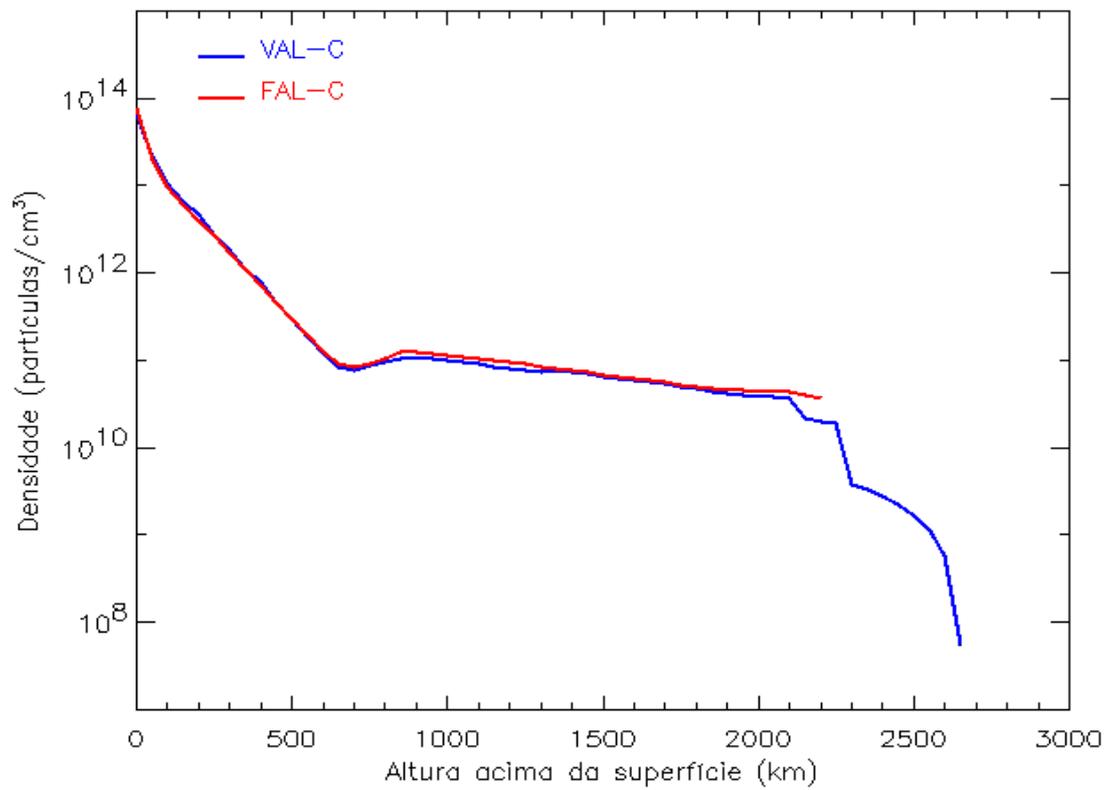


FIGURA 1.5 - Variação da densidade de elétrons na atmosfera solar para os modelos VAL-C e FAL-C.

FONTE: adaptação de Vernazza et al. (1981) e Fontenla et al. (1993).

1.2.2 MODELOS BASEADOS EM OBSERVAÇÕES EM RÁDIO

Em 1991, Zirin e colaboradores mediram a temperatura de brilho do centro do disco solar para 20 frequências no intervalo de 1,4 à 18 GHz e propuseram um modelo cromosférico com base nestas observações. Neste artigo, os autores argumentam que o gradiente positivo de temperatura da cromosfera é relativamente baixo, aproximadamente 3 K por km. Zirin já havia proposto em seu livro de 1988, que ~1800 km acima da fotosfera solar a temperatura é de ~6000 K, e aumenta para ~11000 K em ~3500 km. A altura de escala sugerida para a densidade nestas temperaturas é cerca de 700 km, ou seja, a densidade local é reduzida em um fator e^{-1} neste intervalo de distância. Devido ao pequeno aumento da temperatura de brilho em função da frequência observada, a região de transição deve contribuir apenas com ~1000-2000 K para a temperatura de brilho medida. As observações de temperatura de brilho em microondas foram ajustadas pela seguinte equação (Zirin et al. 1991):

$$T_B = A \nu^{-2,1} + T_{cromosfe} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

onde: T_B = temperatura de brilho em K

ν = frequência em GHz

$T_{cromosfera}$ = temperatura da cromosfera = 10880 K

A = constante = 140077 K/GHz^{2,1}

Este modelo tem grande importância para nosso trabalho, pois os mapas obtidos pelo NoRH em 17 GHz são normalizados para 10000 K com base neste artigo, como mostra o artigo de Shibasaki (1988).

Como as observações em frequências em rádio com comprimentos de onda

submilimétricos não são compatíveis com o previsto pelos modelos VAL, Ewell e colaboradores (1993) propuseram o modelo “Caltech Irreference Chromospheric Model” (CICM). Este modelo ajusta a altura do limbo observado no submilimétrico por um único parâmetro de ajuste, neste caso a altura de escala para a densidade de elétrons. O modelo inicia na posição da temperatura de mínimo predita pelo modelo VAL , a partir deste ponto a temperatura aumenta para 6400 K em 1200 km e a partir deste ponto aumenta linearmente até 7500 K em 5000 km. O modelo ajusta-se bem às alturas do limbo observadas em comprimentos de onda entre 200 μm e 3 mm.

Como podemos ver, os modelos citados acima estão restritos a uma faixa estreita da atmosfera solar entre a fotosfera e o início da região de transição, onde a maior parte da emissão solar é formada. Porém, nenhum deles estuda a distribuição de temperatura e densidade da alta região de transição e coroa solar. Apenas Zirin e colaboradores (1991) fizeram uma estimativa da contribuição da região de transição (~1000 - 2000 K) e da coroa, que em 17 GHz representaria apenas 365 K para a temperatura de brilho do centro do disco solar.

Nas Figuras 1.6 e 1.7 são mostradas as curvas da temperatura e densidade de elétrons para o modelo proposto para observações no submilimétrico por Ewell et al. (1993), e para o modelo proposto por Zirin (1988) e Zirin et al. (1991) para observações em frequências centimétricas, onde podemos ver que os modelos com base nas observações em frequências rádio variam bastante dependendo do comprimento de onda estudado.

Apesar das contribuições da região de transição e da coroa não serem importantes no cálculo da temperatura de brilho no centro do disco do Sol em 17 GHz, o mesmo não ocorre quando medimos a variação de brilho próxima ao limbo solar. Pois a quantidade de matéria destas regiões que contribui para a temperatura de brilho aumenta à medida que caminhamos em direção ao limbo, devido à curvatura do Sol que faz com que o caminho percorrido aumente.

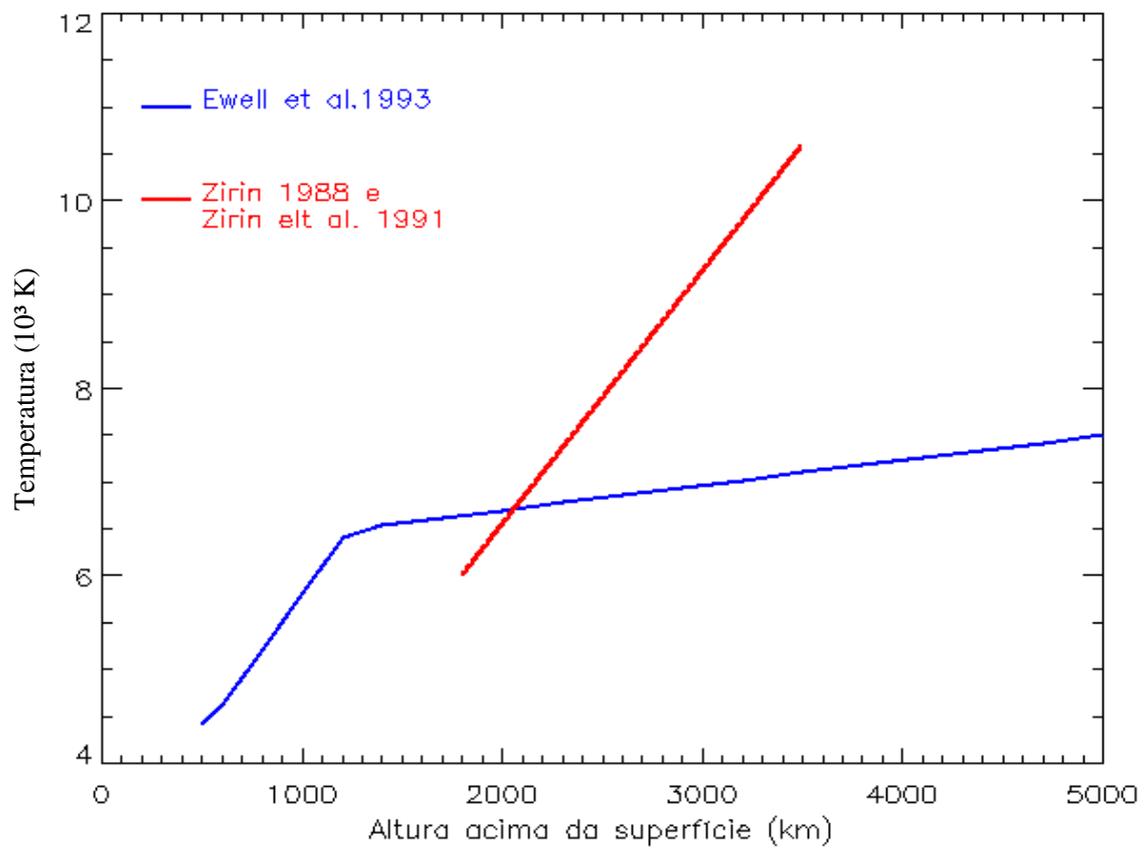


FIGURA 1.6 - Variação da temperatura na atmosfera solar para os modelos baseados em observações rádio.
 FONTE: adaptação de Ewell et al. (1993) e Zirin (1988) e Zirin et al. (1991).

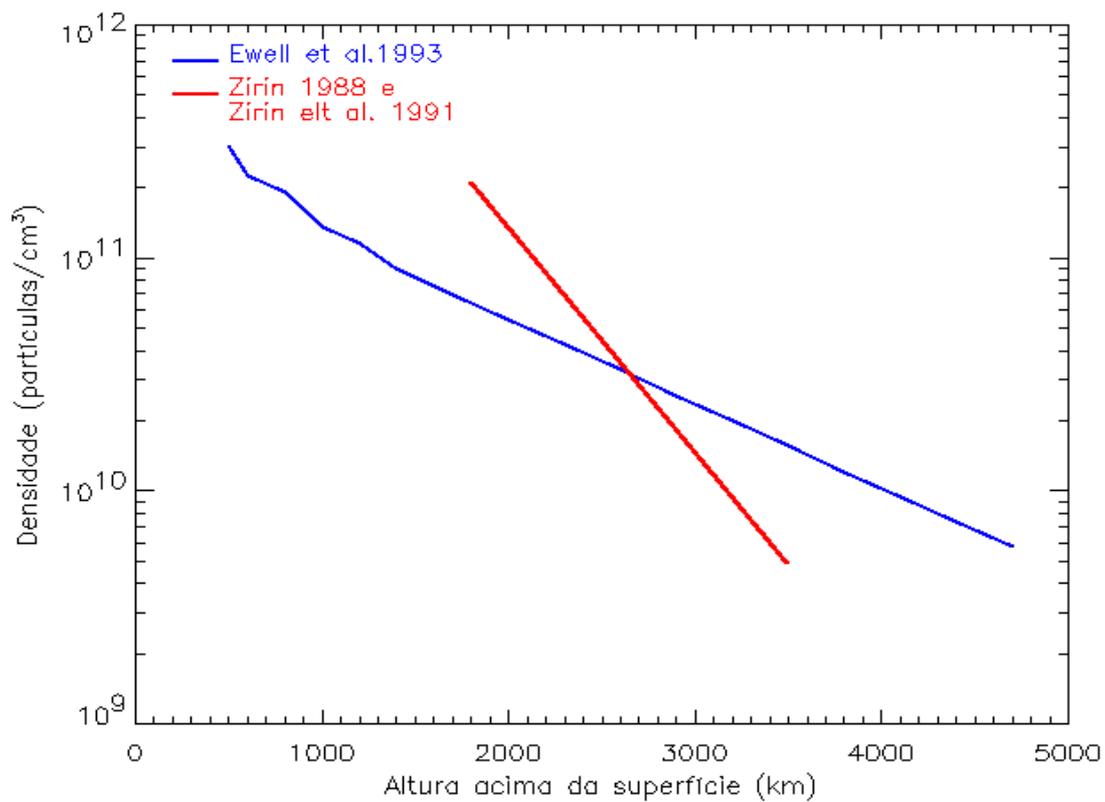


FIGURA 1.7 - Variação da densidade de elétrons na atmosfera solar para os modelos baseados em observações em rádio.
 FONTE: adaptação de Ewell et al. (1993) e Zirin (1988) e Zirin et al. (1991).

1.2.3 MODELOS COM A INCLUSÃO DE ESPÍCULAS

Pelo fato de observações em diversos comprimentos de onda não serem bem ajustadas pelos modelos atmosféricos propostos, alguns autores propõem a inclusão de estruturas cromosféricas que alteram a atmosfera local. Dentre estas estruturas, as espículas têm sido usadas em modelos que tentam ajustar observações em comprimentos de onda no infravermelho e em rádio.

Elzner (1976) estudou a influência das espículas perpendiculares à superfície e distribuídas uniformemente na atmosfera solar. As espículas utilizadas eram cilíndricas de raio ~880 km e seu número decrescia com sua altura. O início da espícula foi definido no ponto onde sua temperatura fosse igual à temperatura local. Os resultados mostram que as medidas de abrlhantamentos obtidas para uma atmosfera sem espículas são muito maiores do que os valores observados. No entanto as curvas de brilho da atmosfera com espículas mostram que tanto a temperatura do centro quanto o abrlhantamento do limbo são visivelmente afetados por sua presença e que o aumento da temperatura da espícula não aumenta, necessariamente, o abrlhantamento. Foi mostrado, no trabalho, que espículas com densidade de elétrons $\geq 3 \times 10^{10}$ partículas/cm³ e temperatura de ~8000 K são opticamente espessas em frequências em rádio maiores que 60 GHz.

O trabalho de Elzner traz também uma comparação dos resultados obtidos por observações em 5 GHz onde o abrlhantamento medido para a atmosfera sem espículas seria de 43 %. Por outro lado, uma atmosfera com espículas de 6000 K e 7500 K renderiam abrlhantamentos de 23,5 e 25 % respectivamente. As medidas observacionais feitas por Fürst et al. (1974) nesta frequência teriam abrlhantamento de apenas 15 %. Em 17 GHz os resultados seriam de 25 % para uma atmosfera sem espículas e de 6 e 8,7 % para uma atmosfera com espículas de 6000 e 7500 K, respectivamente, porém o abrlhantamento observado foi de 1 % somente.

Braun e Lindsey (1987) propõem um modelo para solucionar a incompatibilidade das observações no infravermelho distante ($\lambda=50, 100$ e $200 \mu\text{m}$) com o modelo VAL. Uma vez que as observações mostram que o limbo se estende a uma altura além da prevista por este modelo. Isto implica a presença de material denso e relativamente frio acima das alturas previstas pelo modelo VAL. O modelo proposto pelos autores consiste em uma atmosfera plano-paralela, onde a região que se estende da fotosfera até a altura de 1000 km possui temperaturas e densidades iguais ao modelo VAL-C e acima desta região a atmosfera é constituída por espículas cilíndricas distribuídas aleatoriamente. A constituição física das espículas para uma dada altura é determinada apenas pela temperatura e densidade de elétrons. Sendo as espículas opticamente espessas, a forma do perfil do limbo é determinado somente pela queda exponencial do número de espículas com a altura e suas temperaturas. O melhor ajuste das observações foi obtido com espículas com temperatura de ~ 7000 K e alturas de até 7000 km.

Roellig et al. (1991) incluíram o cálculo da opacidade livre-livre de H e H⁻ no modelo proposto por Braun e Lindsey (1987), para ajustar observações entre 30 e 670 μm . Os autores também supõem equilíbrio de ionização do hidrogênio e equilíbrio termodinâmico local tanto nas espículas quanto na região entre espículas. As observações utilizadas no trabalho mostram que os limbos e os abrilhantamentos medidos aumentam com o aumento do comprimento de onda.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DOS DADOS OBSERVACIONAIS

2.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

O Rádio Heliógrafo de Nobeyama (NoRH) iniciou suas observações em junho de 1992 e desde então, todos os dias o Sol tem sido observado durante 8 horas. Este instrumento é um rádio interferômetro em 17 e 34 GHz (esta última a partir de novembro de 1995) dedicado à observações solares. Composto por 84 antenas de 80 cm de diâmetro dispostas na forma de "T", o arranjo estende-se por 490 m na direção leste-oeste e 220 m na norte-sul. A resolução espacial é de 10-18 segundos de arco e a temporal de 1 s e de 50 ms para eventos selecionados. O campo de visão é de 40', que é grande o bastante para cobrir todo o Sol. Após a síntese das imagens, a temperatura de brilho do Sol calmo é normalizada para 10^4 K, com base no artigo de Zirin *et al.* (1991). Os mapas do NoRH estão disponíveis na página da Internet <ftp://solar.nro.nao.ac.jp/>.

Os mapas utilizados são arquivos do tipo fits, que além de uma imagem de 512x512 pixels², apresentam um conjunto de informações a respeito da imagem observada, como por exemplo: data e hora da medida, raio óptico aparente, tamanho de cada pixel em segundos de arco, inclinação do Sol, etc. Um exemplo de mapa pode ser visto na Figura 2.1.

A fim de verificar se existe variação com o ciclo de atividade solar de 11 anos, comparamos os resultados obtidos com a variação do número de manchas solares neste período (obtido através da página de Internet <ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS>). Utilizamos também, mapas em raios X moles (1992-2000) obtidos pelo satélite Yohkoh, disponíveis na página da Internet <ftp://umbra.nascom.nasa.gov/> e imagens H α com alta resolução angular, obtidas pelo "Big Bear Solar Observatory" e disponíveis na

página <<http://www.bbso.njit.edu/>>. Tanto as imagens em $H\alpha$ quanto os mapas em raios X moles, serão utilizados para comparação com a variação angular do anel de abrilhantamento em 17 GHz.

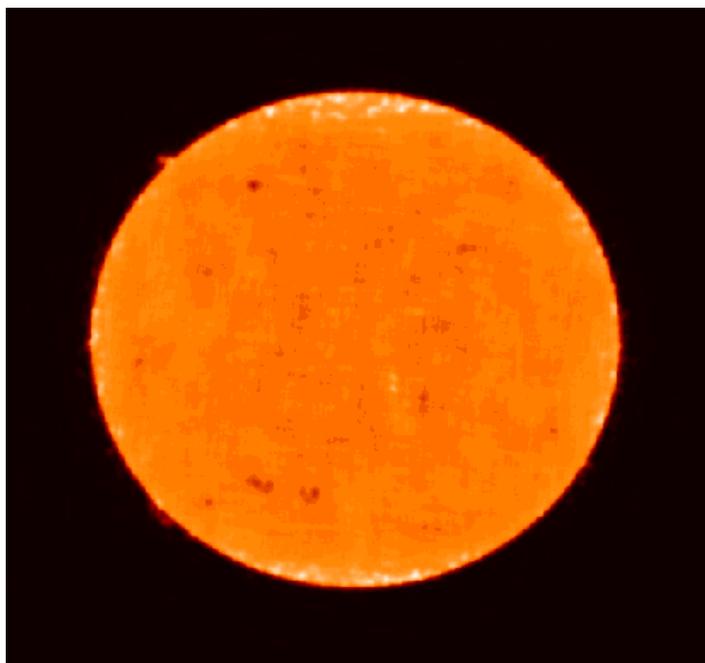


FIGURA 2.1 - Mapa do Sol em 17 GHz.

2.2 ABRILHANTAMENTO DE LIMBO

O estudo do abrilhantamento de limbo será feito através de duas maneiras distintas, a primeira delas visa estudar sua variação temporal em relação ao ciclo de atividade solar e a segunda tem o intuito de analisar a distribuição angular do anel. Para estas análises utilizaremos a linguagem de programação I.D.L. (Interactive Data Language), com técnicas de redução de dados e programação elaborados por nós.

Apesar da temperatura de brilho do Sol calmo ser automaticamente normalizada para 10^4 K, resolvemos verificar se havia uma grande variação na temperatura de brilho mais provável da imagem acompanhando o ciclo solar. Para tanto fizemos um histograma para cada mapa e definimos o Sol calmo como o ponto onde o valor do histograma era máximo, que é representado pela reta vertical em 10250 K mostrada na Figura 2.2.

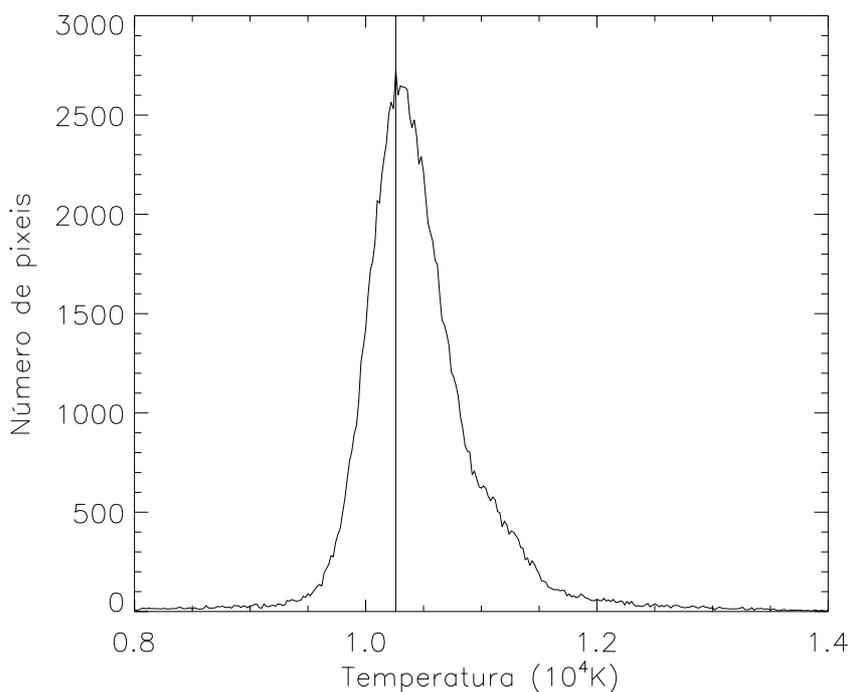


FIGURA 2.2 - Histograma da temperatura de brilho para um mapa.

Podemos ver que a temperatura de brilho do Sol calmo ao longo dos anos (Figura 2.3), para todos os mapas dispersa-se em torno de um valor médio (~ 10350 K). Esse desvio é menor no período de mínimo devido ao menor número de fenômenos observados em sua superfície (manchas solares, regiões ativas, plages, filamentos, etc.). Assim, o índice de correlação com o ciclo de atividade solar é baixo.

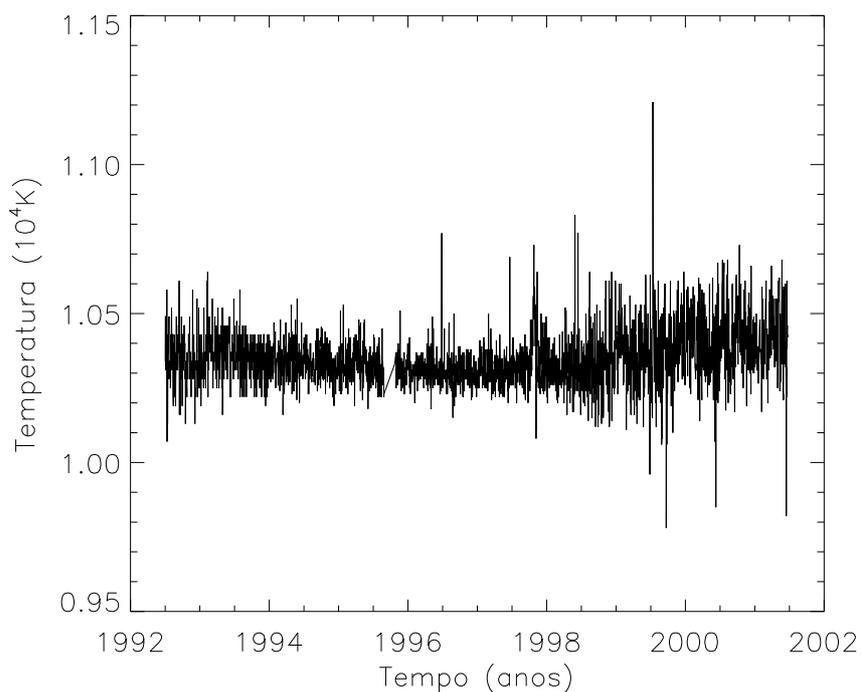


FIGURA 2.3 - Variação da temperatura de brilho do Sol calmo.

O primeiro passo para estudar a distribuição do anel de abrlhantamento foi a definição do centro do Sol em cada imagem, que obtivemos da seguinte forma:

- a) foram feitos cortes radiais passando pelo centro da imagem, com separação angular de 2° entre cada um deles, onde um perfil de temperatura é obtido para

cada corte. A Figura 2.4 mostra um exemplo deste perfis;

b) definimos o limbo solar, para cada perfil, como sendo os pontos em que a derivada era mínima e máxima (Figura 2.4);

c) ao final dos procedimentos acima, obtivemos 180 pontos do limbo Solar, aos quais foi ajustada uma circunferência e desta extraídos o centro e o raio do Sol.

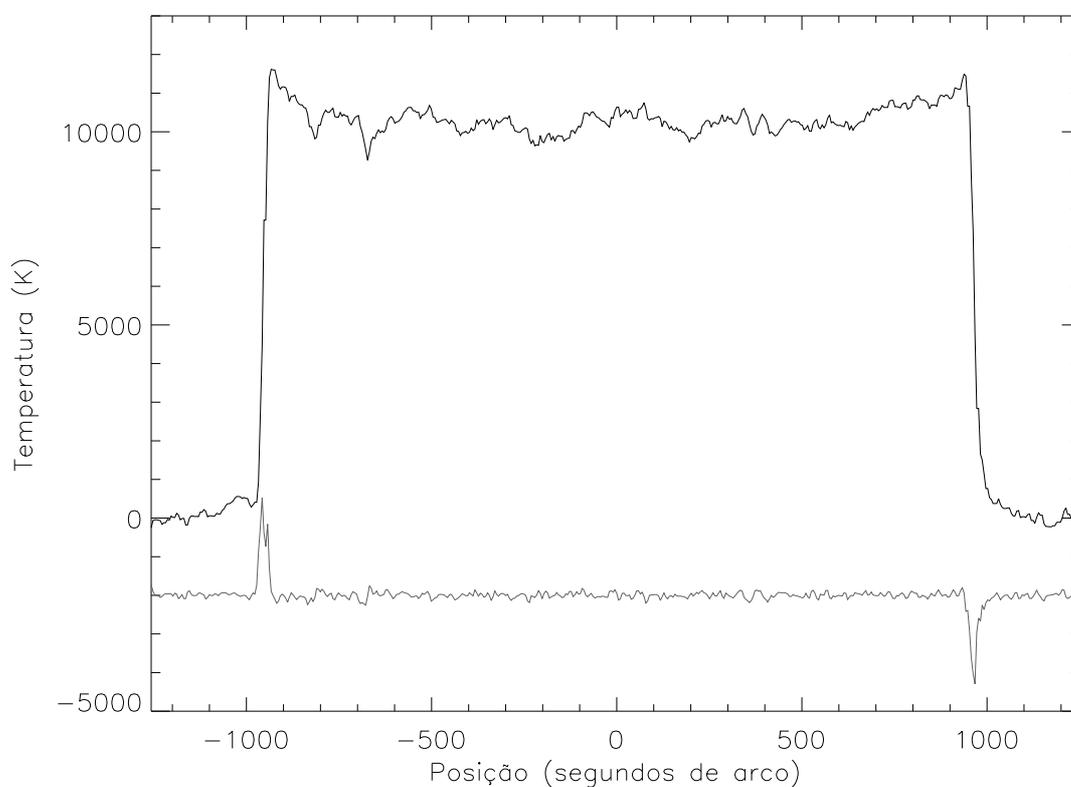


FIGURA 2.4 - Exemplo de corte radial no mapa 17 GHz e sua derivada numérica (escala arbitrária).

A definição do centro do Sol é importante para se ter uma melhor precisão em relação à posição angular dos pontos no limbo, uma vez que este estudo foi feito através da comparação das intensidades em relação a esta posição. A análise dos mapas foi feita através de cortes radiais no mapa com o mesmo espaçamento angular passando pelo centro do Sol. Podemos ver claramente a presença de abrlhantamento de limbo nos perfis de intensidades fornecidos por cada varredura (Figura 2.4).

A maioria dos trabalhos anteriores usa a equação 2.1 para estimar a quantidade de abrlhantamento existente. Porém optamos por definir a quantidade de abrlhantamento como a intensidade máxima na região próxima ao limbo, pois como foi estimado por Shibasaki (1998), o abrlhantamento polar em 17 GHz é a soma de duas componentes: uma que causa um abrlhantamento fixo nos pólos e outra devida ao gradiente de temperatura (~10%), que supusemos também estar presente nas outras regiões do Sol. Estas regiões mais brilhantes nos pólos fazem com que o abrlhantamento médio próximo ao limbo tenha um perfil exponencial.

$$T_B(\theta) = T_0(1 + \beta - \beta \cos\theta) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde: $T_B(\theta)$ = temperatura de brilho em uma determinada posição angular
 T_0 = temperatura de brilho no centro do disco do Sol
 β = quantidade de abrlhantamento
 θ = ângulo medido a partir do centro do disco solar.

Quanto à largura do anel de abrilhantamento, foi ajustada uma curva sobre o excesso de intensidade no limbo (equação 2.2), onde x é a posição ao longo do perfil radial. Definimos que a largura seria tomada no ponto onde a intensidade do anel caísse pela metade do seu valor de máximo.

$$f(x) = a x^b e^{-c x^d} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Os procedimentos descritos até este momento são comuns ao estudo da variação temporal e também da variação angular do anel de abrilhantamento. Nas próximas 2 seções descrevemos os métodos utilizados para os 2 estudos de variação do anel de abrilhantamento.

2.2.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DO ABRILHANTAMENTO DO LIMBO POLAR

É um fato conhecido que as regiões ativas do Sol estão concentradas em uma determinada região solar, que se estende entre $\pm 50^\circ$ de latitude aproximadamente. Também sabemos que os pólos norte e sul do Sol não estão sempre na mesma posição em relação à Terra devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da eclíptica. Esta inclinação é medida pelo ângulo polar (P), que se refere à inclinação do pólo norte solar em relação ao pólo norte celeste e já foi corrigida nos mapas de 17 GHz, e pelo ângulo B_0 , que é a latitude heliográfica do equador solar vista da Terra.

Como pretendíamos estudar regiões que estivessem livres da influência de zonas ativas em todos os mapas, consideramos somente a região acima do paralelo 60° ao norte e ao sul. Esta restrição se deve aos 50° de latitude onde se concentram as regiões ativas mais os 7° de variação do ângulo B_0 .

Fizemos cortes entre 60° e 120° do ângulo heliográfico com variação de 1° , sendo este ângulo medido a partir do limbo equatorial oeste no sentido anti-horário. As varreduras que mostravam influência de filamentos (regiões mais escuras do que o valor do Sol calmo) nas proximidades do limbo foram abandonadas e fizemos uma média com o restante, que foi sempre maior do que 40 varreduras. O resultado (Figura 2.5) foi analisado separando as intensidades do pólo norte (lado direito do gráfico) e do pólo sul (lado esquerdo do gráfico). Um exemplo do ajuste exponencial usado pode ser visto na Figura 2.6.

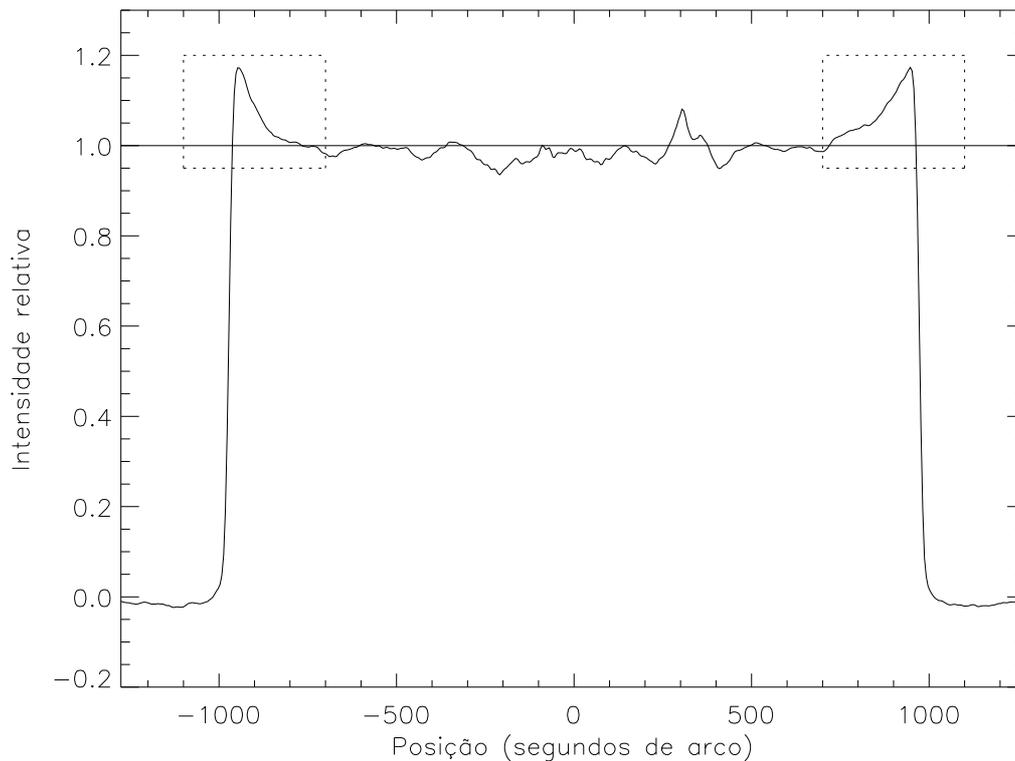


FIGURA 2.5 - Curva de Intensidade média, a reta representa o Sol calmo, as áreas em destaque mostram o abrihantamento do limbo nos dois pólos.

Menos de 1% dos mapas não tiveram uma das larguras medidas, pelo fato dos dados não serem bem ajustados pela equação 2.2. Isto ocorre ou pela falta de abrihantamento ou devido à presença de um filamento. Os ajustes mostraram que a constante “c” da equação 2.2 tem um valor próximo de 1 na grande maioria dos casos, indicando que a intensidade do anel aumenta exponencialmente à medida que se aproxima do limbo solar. Os gráficos das intensidades máximas e larguras norte e sul em função do tempo mostraram oscilações periódicas de cerca de um ano que estavam correlacionadas com a

variação do ângulo B_0 , pois os dados do NoRH são corrigidos apenas para o ângulo P. Para corrigir esta influência usamos um filtro Fourier eliminando as oscilações associadas com períodos de 1 ano e de 6 meses.

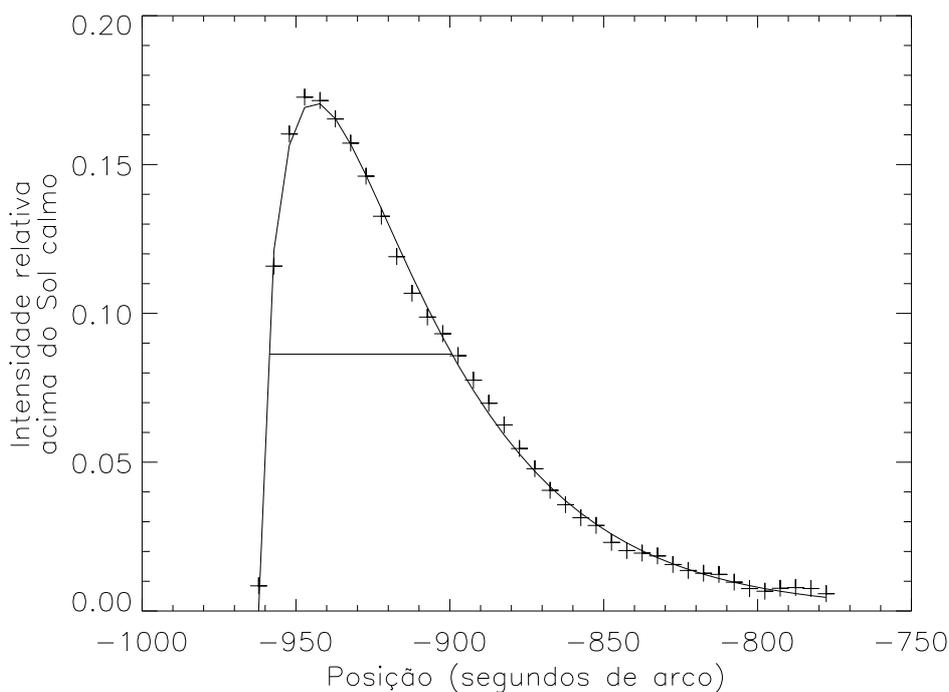


FIGURA 2.6 - Ajuste sobre o brilho do limbo, a reta mostra a largura medida.

As intensidades médias polares são mostradas na Figura 2.7, onde o gráfico a representa a variação da intensidade no pólo norte e o gráfico b a variação no pólo sul. A intensidade média para o brilho do pólo norte foi de $13 \pm 4\%$ acima do valor do Sol calmo, enquanto para o Sul a média foi de $14 \pm 4\%$, que equivalem a um excesso de temperatura entre 1000 - 2000 K.

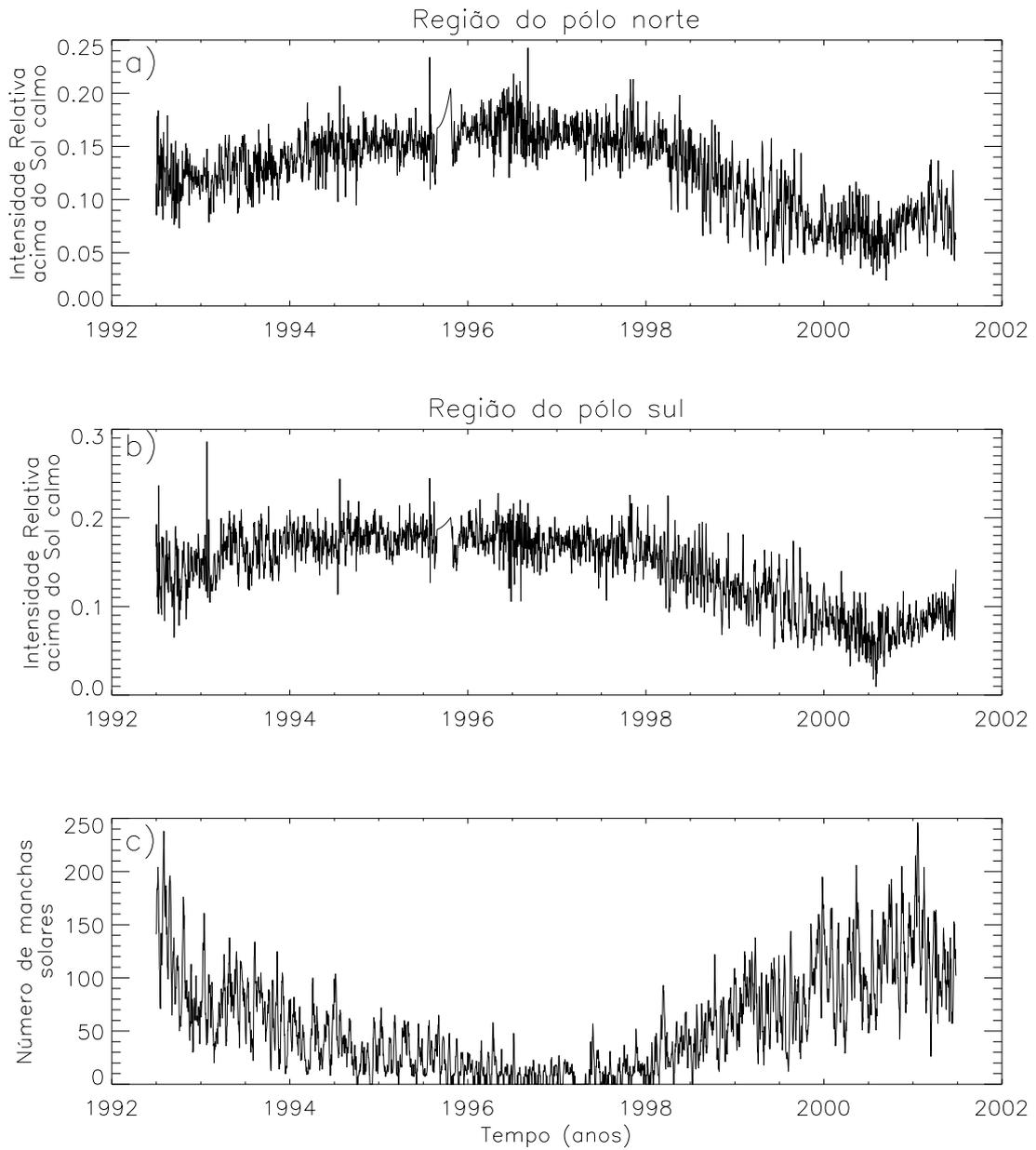


FIGURA 2.7 - Intensidades médias da temperatura de brilho acima do Sol calmo para a (a) região polar norte e (b) região polar sul. O gráfico (c) mostra o número de manchas solares para o mesmo período.

Quando comparadas as variações temporais das intensidades nos pólos com o número de manchas solares (gráfico c) é claramente visto uma anticorrelação com o ciclo de atividade solar. Os índices de correlação calculados foram de -0,81 entre o número de manchas solares e a intensidade no pólo norte e índice -0,82 das manchas solares em relação ao pólo sul. Estes resultados concordam com o resultado obtido por Efanov e colaboradores (1980) que sugeriram que o abrilhantamento polar estava anticorrelacionado com o ciclo solar.

Um fenômeno fotosférico conhecido por ter um ciclo oposto ao ciclo de manchas solares é o número de fáculas polares, que alguns autores sugerem que esteja correlacionado com as regiões de aumento de brilho observadas em algumas frequências rádio (Riehkainen et al. 1998, Gelfreikh et al. 2002). Na Figura 2.8 comparamos o abrilhantamento de limbo com o número médio de fáculas nos dois pólos (obtidos pelo “National Astronomical Observatory of Japan” e disponibilizados na página de Internet <<http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/>>) e pudemos ver que os dois fenômenos seguem a mesma tendência em comparação com o ciclo de atividade solar.

Com relação às medidas da largura, mostradas na Figura 2.9, obtivemos 63 ± 12 segundos de arco para o pólo norte e 69 ± 16 segundos de arco para o pólo sul. Ao contrário do que aconteceu com as distribuições de intensidades, nenhum índice significativo de correlação com o ciclo solar foi encontrado, com -0,14 e -0,17 para os pólos norte e sul, respectivamente. O que pode ser visto na figura é uma grande variação da largura durante os períodos de máxima atividade solar em 1992 e em 2000.

Para verificar se haviam diferenças entre os abrilhantamentos nos dois pólos, nós graficamos as intensidades (Figura 2.10a) e as larguras (Figura 2.10b) da região Sul menos a região Norte (visto nos gráficos na cor cinza) e uma média corrida de 30 dias

(graficado em preto). Como podemos ver nos gráficos da Figura 2.10, a região do pólo sul foi tanto mais intensa quanto mais larga durante o declínio do máximo entre 1992 e 1995. Seria interessante continuar este estudo e ver se o domínio polar é revertido no próximo ciclo.

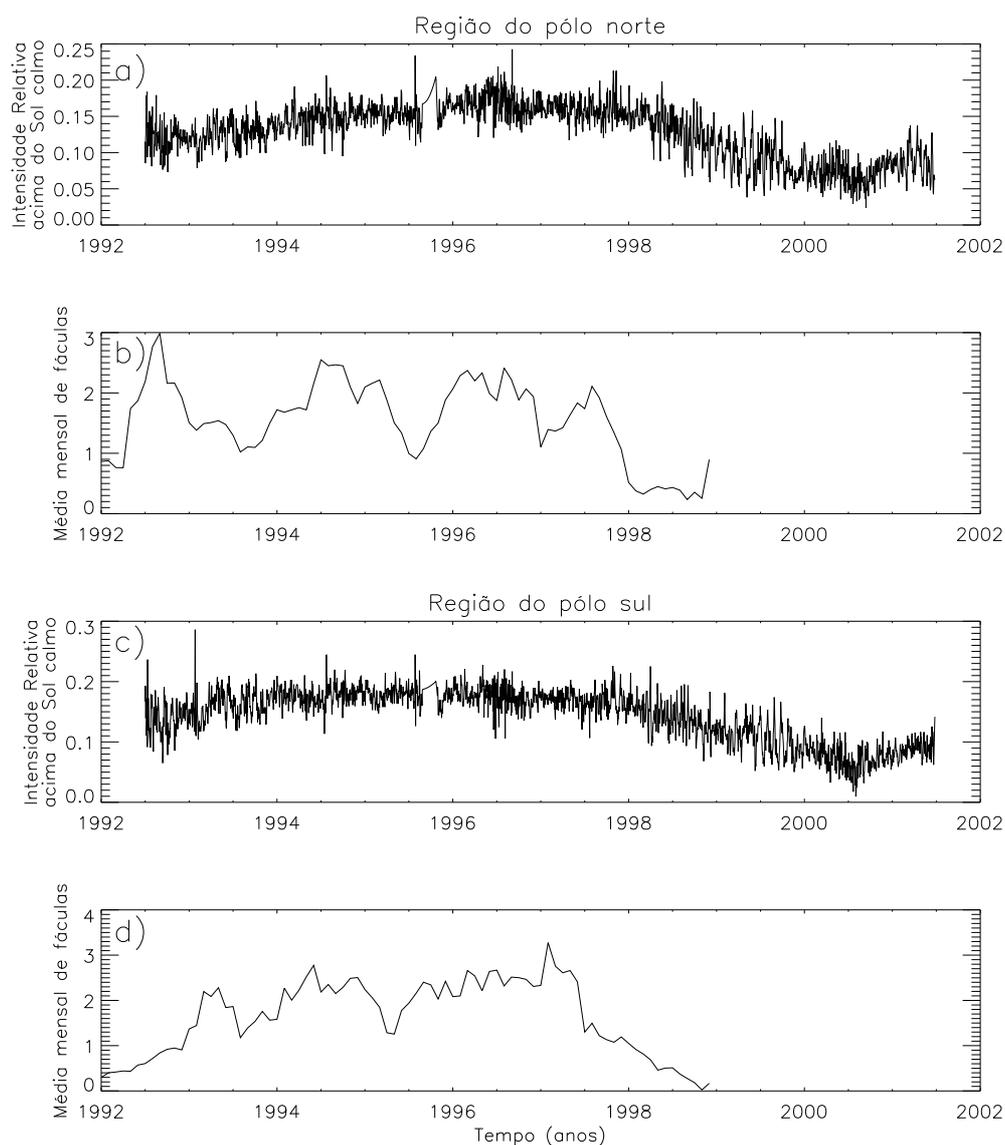


FIGURA 2.8 - Intensidades médias da temperatura de brilho acima do Sol calmo para a (a) região polar norte e (c) região polar sul. Média mensal do número de fáculas no (b) pólo norte e no (d) pólo sul.

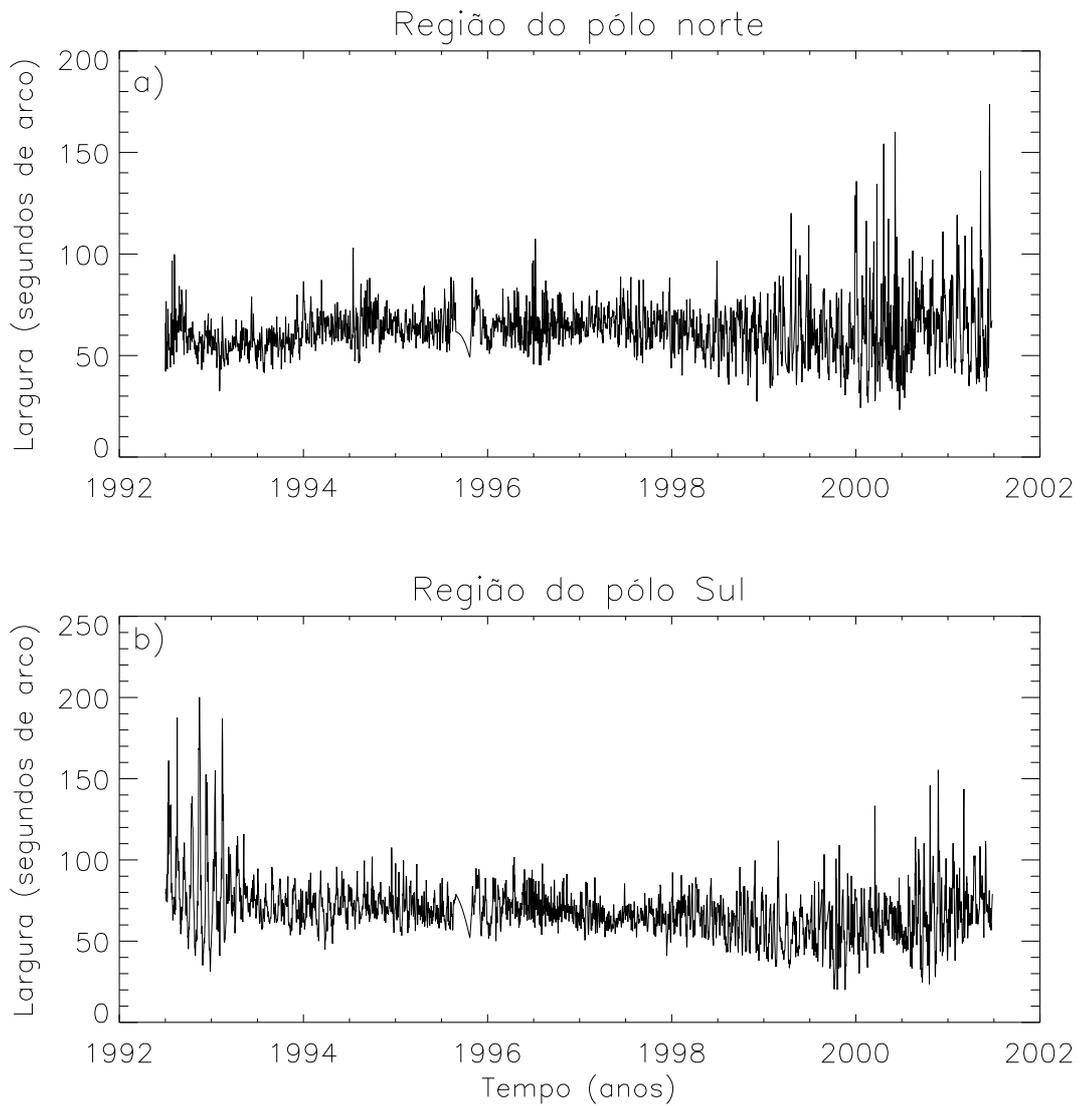


FIGURA 2.9 - Larguras médias da temperatura de brilho para a (a) região polar norte e (b) região polar sul.

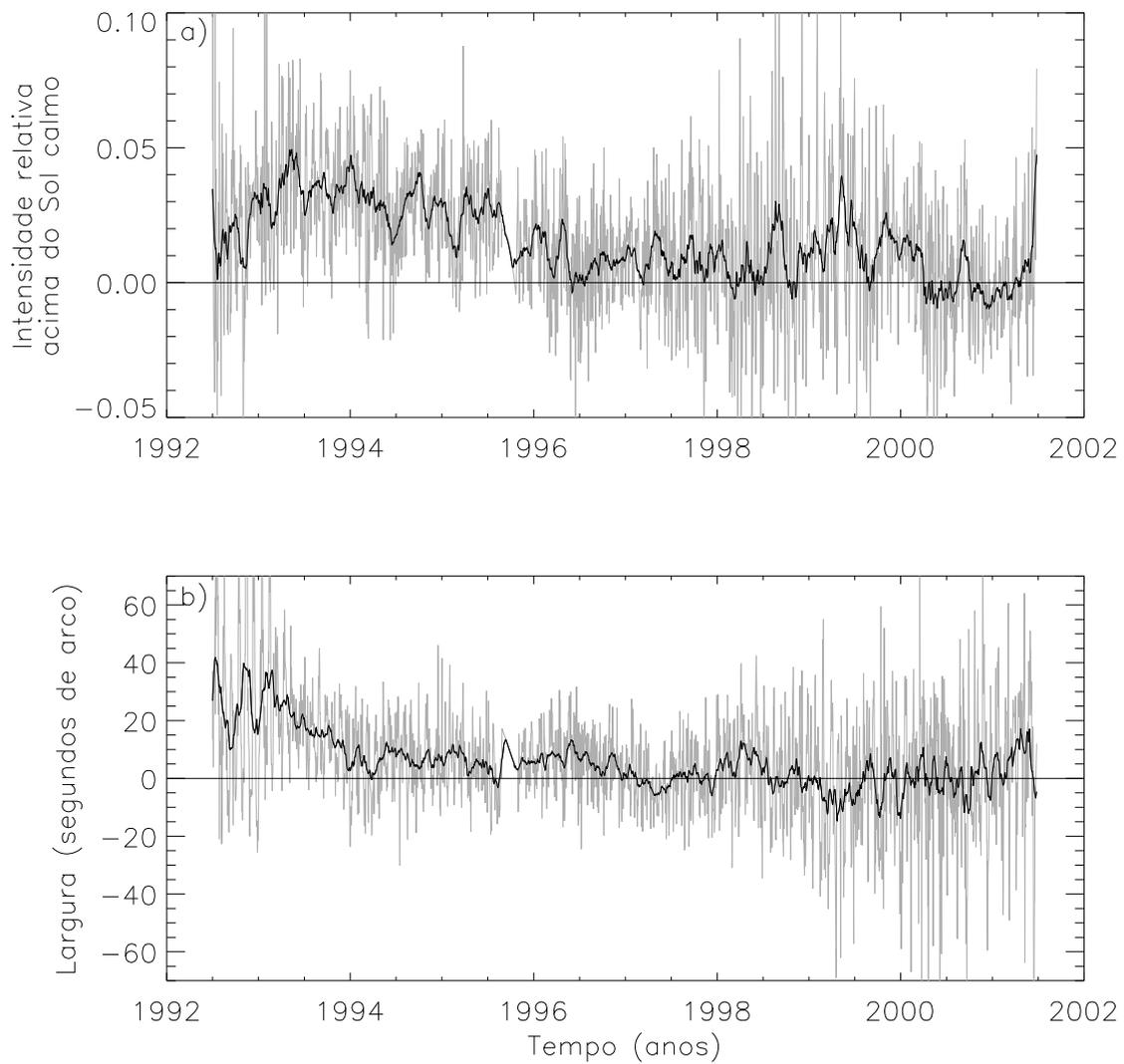


FIGURA 2.10 - As diferenças em (a) intensidades e (b) larguras do abrlhantamento na região do pólo Sul menos o abrlhantamento da região polar norte.

2.2.2 VARIACÃO ANGULAR DO ABRILHANTAMENTO DO LIMBO

Para estudar a variação angular do abrilhantamento do limbo em 17 GHz utilizamos 90 varreduras radiais, com variação de 2° entre elas. Na Figura 2.11 podemos ver uma média de 10 mapas do mês de agosto de 1996, os quais não apresentavam influência de regiões ativas próximas ao limbo. Podemos observar claramente no gráfico que o anel de abrilhantamento não é distribuído uniformemente, tendo como resultado o seguinte:

- Intensidade nos pólos - atinge valores entre 20 e 30% acima do valor do Sol calmo;

- Intensidade na região do equador - o abrilhantamento cai para valores menores que 15%;

- Regiões intermediárias - intensidades menores que 10%.

A intensidade do abrilhantamento nos pólos (~20-30%) pode parecer inconsistente com a intensidade média durante o ciclo (~13% no norte e ~14% no sul), porém o cálculo da intensidade para a variação temporal do anel de abrilhantamento foi feito numa região com 60° de abertura nos pólos, podemos ver no gráfico 2.11 que a subida para os índices máximos de brilho polar se dá de forma bastante íngreme, o que influencia a nossa medida e reduz a intensidade do abrilhantamento para o perfil médio. Outro fato a salientar é que, para gerar a Figura 2.11 foram usados 10 mapas do período de mínima atividade solar, que não tinham regiões ativas no limbo e como vimos no capítulo anterior têm intensidades maiores.

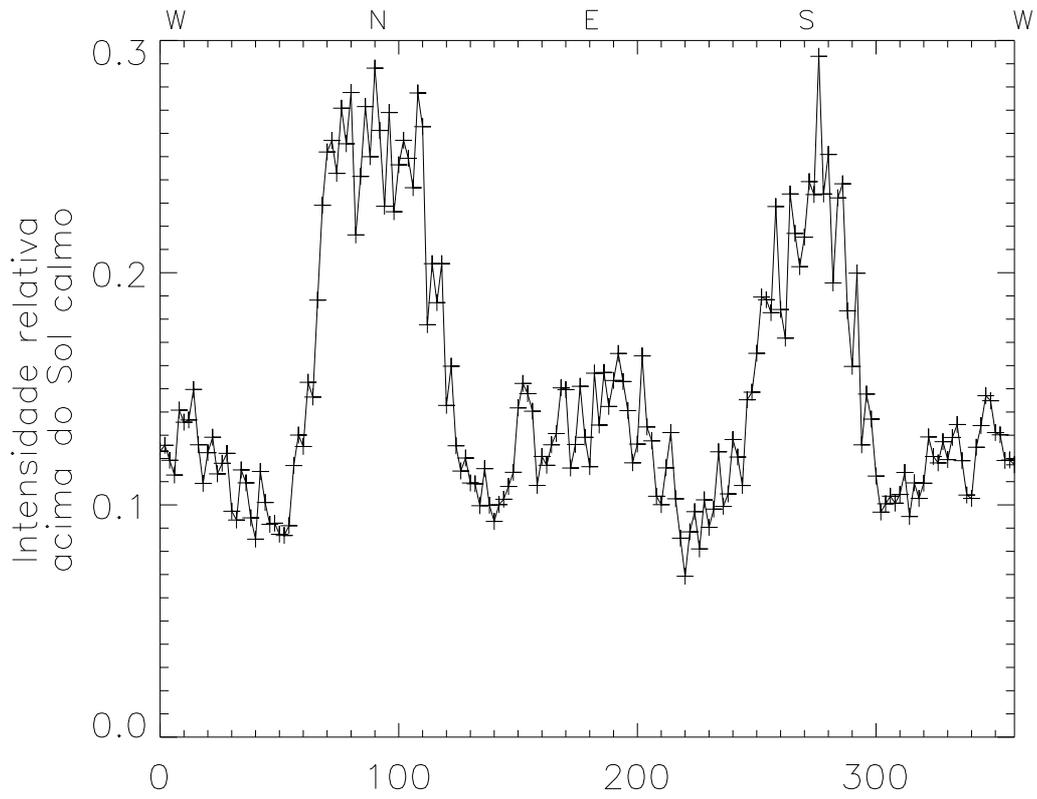


FIGURA 2.11 - Variação angular da intensidade em função da posição angular para uma média de 10 mapas em 17 GHz.

2.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE MAPAS NAS FAIXAS: RÁDIO (17 GHz), ÓPTICO ($H\alpha$ ou 6563 Å) E RAIO X MOLES (0,25 - 4 keV)

2.2.3.1 MAPAS NO ÓPTICO ($H\alpha$)

Alguns artigos sugerem que as espículas exercem papel fundamental na formação do abrilhantamento do limbo observado em rádio (Lindsey *et al.* 1981 e Horne *et al.* 1981), tanto para seu aumento quanto sua diminuição. Como as espículas são observadas em $H\alpha$, decidimos analisar imagens nesta linha de emissão, para comparação com a distribuição angular do anel de abrilhantamento. A análise destas imagens consistiu em:

- definir a intensidade do Sol calmo como o valor mais provável.
- fazer varreduras radiais, com variação de 1° entre cada varredura.
- medir a média da intensidade na região entre $0,99 R_\odot$ e $1,01 R_\odot$, sendo o raio solar (R_\odot) definido no ponto onde a intensidade do Sol calmo era reduzida pela metade.

Na Figura 2.12b é apresentada a variação angular da intensidade média em relação ao Sol calmo para uma média de 10 imagens $H\alpha$, obtidas nos mesmos dias dos mapas em 17 GHz usados na Figura 2.12a. Um aumento em intensidade de aproximadamente 1-2% é claramente observado nos dois pólos.

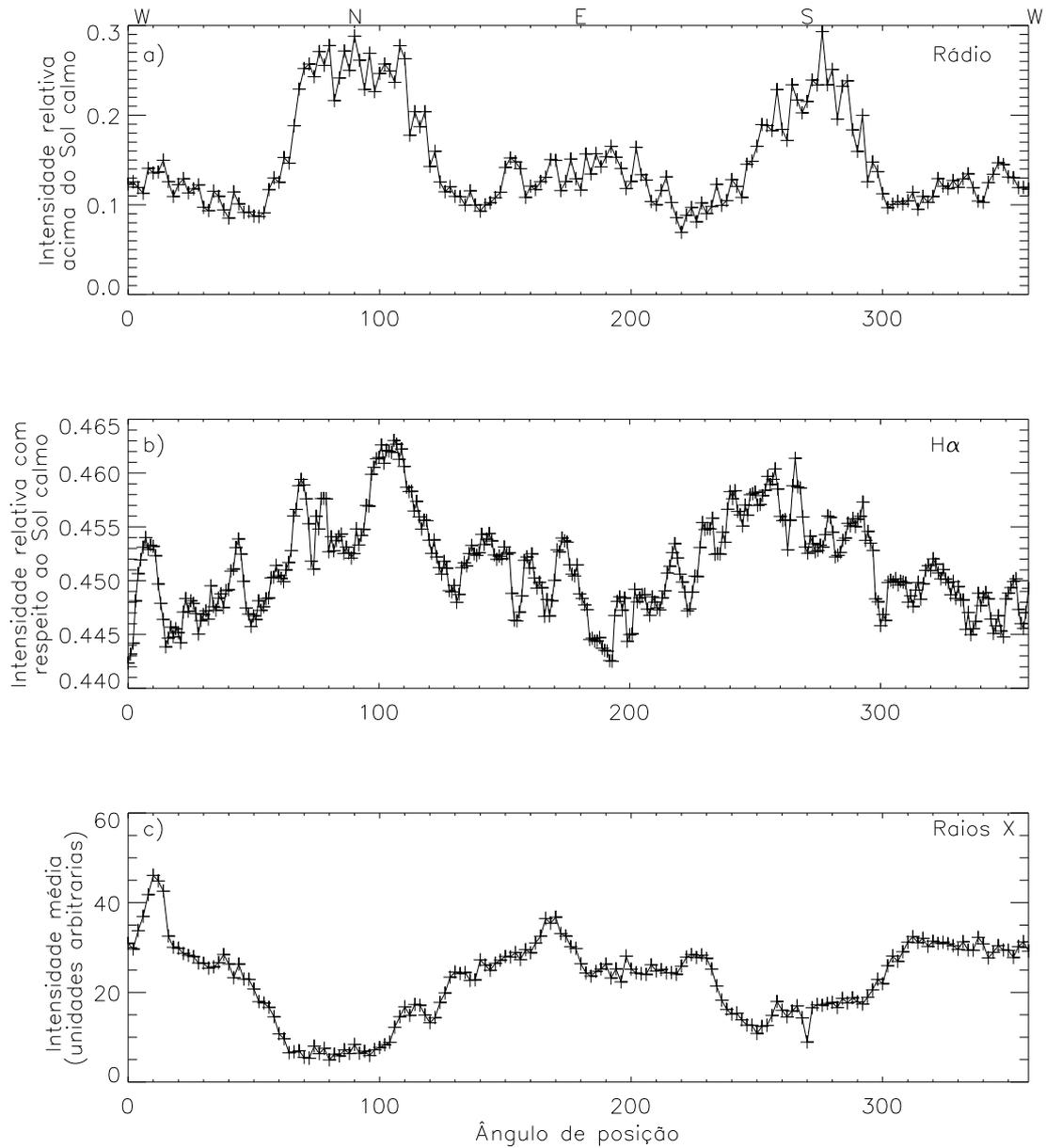


FIGURA 2.12 - Variação angular das intensidades em função da posição angular para (a) mapas em rádio (17 GHz), (b) mapas H α e (c) mapas em raios X moles. Estes são valores médios para imagens obtidas durante 10 dias do mês de agosto de 1996.

2.2.3.2 MAPAS EM RAIOS X MOLES (0,25 - 4 keV)

Através de imagens em raios X moles podemos observar toda a complexidade da coroa solar, com suas regiões de alta emissão e seus buracos coronais, onde a emissão é muito pequena. Na grande maioria das vezes esses buracos coronais são localizados nos pólos do Sol, a mesma região onde o brilho em 17 GHz é mais visível. Porém, Shibasaki (1998) concluiu que não havia correlação, um a um, entre os buracos coronais e o brilho polar em 17 GHz.

Decidimos analisar os mapas definindo um limbo nas imagens em raios X, através de uma circunferência. Medimos a intensidade média em perfis radiais com variação de 2° , em uma faixa indo de $\sim 25''$ interior ao limbo até $\sim 25''$ exterior ao limbo. A Figura 2.12c mostra uma média de 10 mapas para os mesmos dias usados em 17 GHz e $H\alpha$, onde podemos ver claramente uma diminuição da intensidade no pólo norte devido à presença de buracos coronais.

Após a análise das imagens em $H\alpha$ e raios X, estudamos a correlação destas frequências com os dados em 17 GHz. Uma comparação da distribuição angular nas três bandas mostra que a presença de buracos coronais nos pólos está associada com um aumento em intensidade na emissão em 17GHz e em $H\alpha$. Nas imagens em raios X para este período, o buraco coronal no pólo norte foi mais proeminente que no pólo sul. Correspondentemente, os dados para as duas outras frequências mostraram que a emissão no pólo norte é maior do que no sul.

Na Figura 2.13 mostramos a variação temporal da distribuição angular do anel de brilho, utilizando um mapa por mês em 17 GHz no período entre 1992 e 1999 e na Figura 2.14 temos a variação da distribuição angular da intensidade média em raios X moles para os mesmos dias. Estas Figuras mostram a intensidade como a escala de

cor, onde o branco representa a maior intensidade, graficado com a posição angular (ordenada) em função do tempo (abscissa), portanto, cada coluna representa a distribuição de brilho em função do ângulo para um único dia. Comparando os gráficos podemos ver claramente que suas regiões polares (90° e 270°) estão anticorrelacionadas no período de mínima atividade solar, pois existe maior intensidade de brilho em 17GHz e presença de buracos coronais em raios X moles. Esta anticorrelação diminui no período de máximo. Na região equatorial (0° e 180°) temos grande correlação entre as duas frequências, principalmente onde existem regiões ativas.

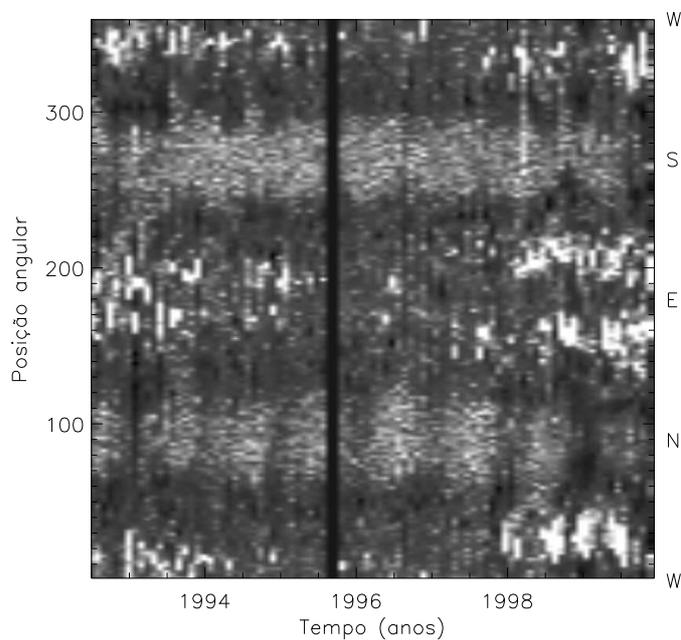


FIGURA 2.13 - Variação temporal da distribuição angular do anel de abrlhantamento em 17GHz .

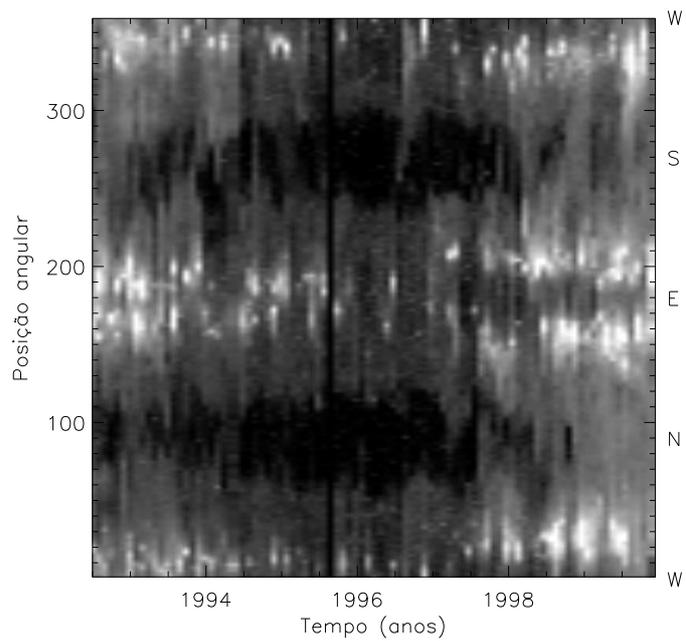


FIGURA 2.14 - Variação temporal da distribuição angular da intensidade média em raios X moles.

2.2.4 VARIAÇÃO DO RAIOSOLAR

Para o estudo da variação temporal do raio solar em 17 GHz optamos por seguir o procedimento usado por Costa et al. (1999), e definir o raio onde a intensidade do Sol equívale a 50% do valor da intensidade do Sol calmo, que foi definido através de um histograma. O método utilizado para definição do raio tem a seguinte estrutura:

- a) foram feitos cortes radiais no mapa passando pelo centro da imagem, a variação entre cada corte foi de 1° , resultando em 360 pontos sobre o limbo;
- b) ajustamos uma circunferência aos pontos. Porém, como podemos observar na Figura 2.15 a presença de regiões ativas e de proeminências fazem com que alguns pontos estejam fora do limbo real do Sol. Para obtermos uma medida mais precisa optamos por fazer um novo ajuste, onde só foram considerados os pontos cuja divergência em relação ao primeiro ajuste fosse menor que o desvio padrão. Os pontos utilizados para o segundo ajuste estão em branco na Figura;
- c) Os raios angulares foram todos normalizados para a distância de uma unidade astronômica.
- d) a partir do segundo ajuste extraímos o valor do raio e seu desvio padrão, cuja média foi de 6,4 segundos de arco.

Os resultados mostram que a variação do raio solar segue o ciclo de atividade do Sol. Esta conclusão se baseia na comparação do raio com o número de manchas solares. O índice de correlação para os dados diários (3161 dias) foi de 0,45, mostrando um alto grau de dependência entre as duas medidas, tendo em vista o grande número de pontos. As variações das medidas do raio solar e do número de manchas solares são mostradas

na Figura 2.16.

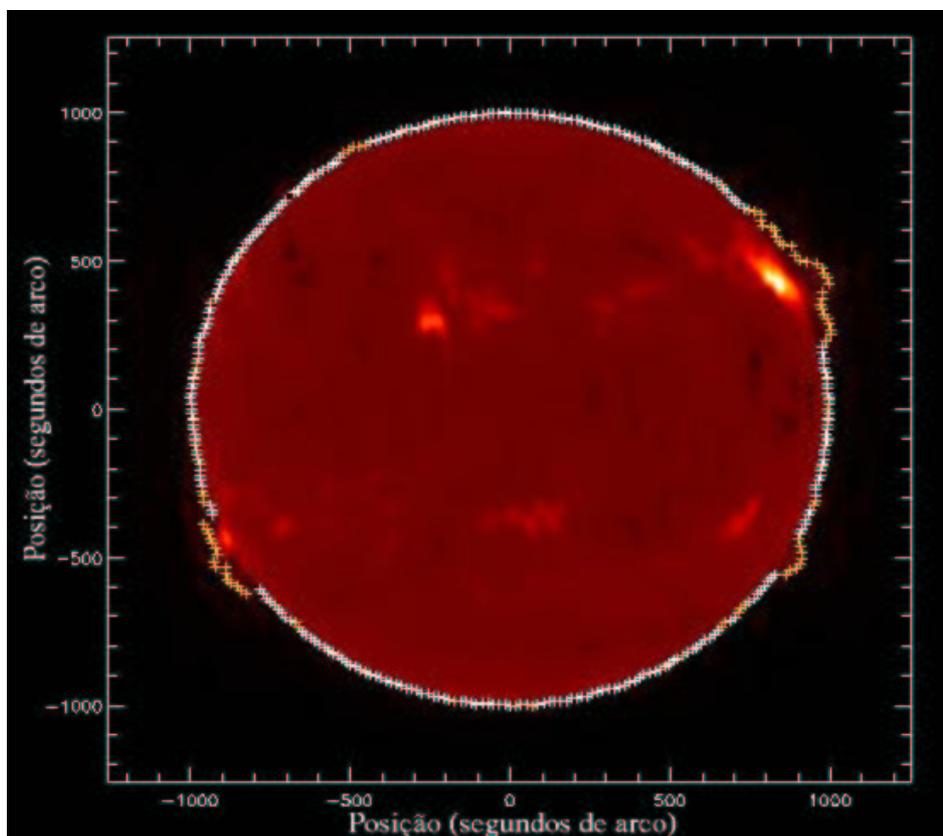


FIGURA 2.15 - Mapa do Sol em 17 GHz mostrando os pontos sobre o limbo.

O gráfico (Figura 2.16) mostra claramente um aumento do raio solar durante o máximo de atividade, o que não nos permite dizer qual o valor mais provável do raio solar em 17 GHz, pois este depende do período do ciclo de atividade solar do momento em questão. O que estimamos foi o valor médio para o período analisado e este foi de 975.7 ± 1.1 segundos de arco.

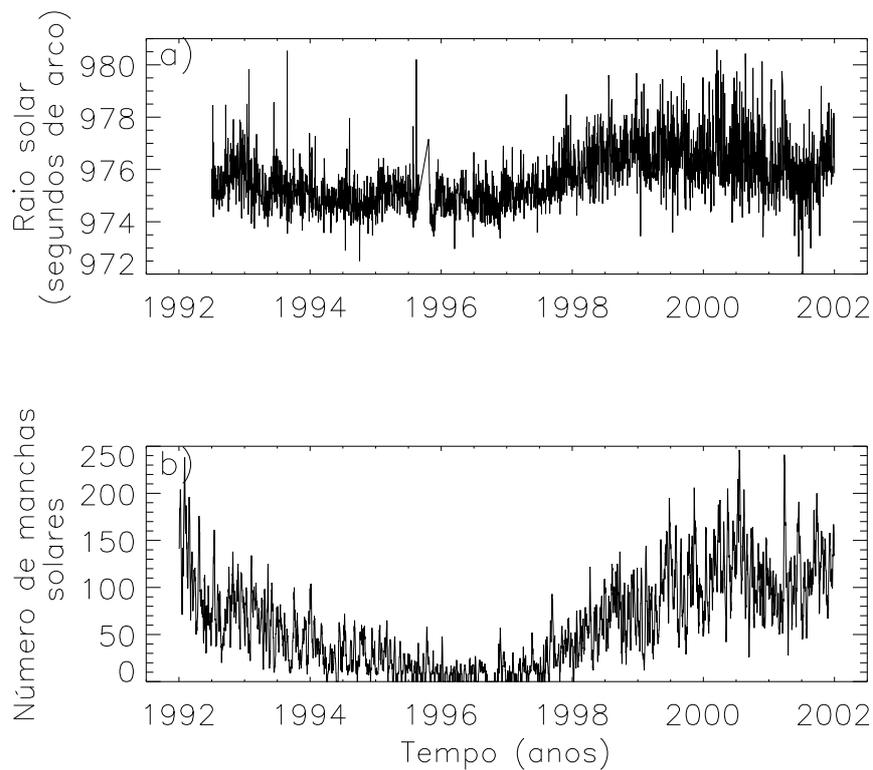


FIGURA 2.16 - (a) Variação do raio solar. (b) Número de manchas solares.

Outro estudo feito em relação ao raio solar foi a análise de sua variação angular, assim como foi feito com o anel de abrilhantamento. O raio foi calculado em 360 pontos ao redor do limbo com intervalo de 1° entre cada medida. Os resultados mostram que existe uma grande variação no raio solar na região equatorial entre os períodos de máxima e mínima atividade solar. Isto se deve a que durante os períodos de grande atividade solar ocorre um maior número de fenômenos, como regiões ativas e proeminências, que se estendem além do limbo observado, enquanto na região dos pólos a variação é muito pequena. Este resultado mostra que a variação temporal do raio solar em 17 GHz depende principalmente das mudanças na atmosfera do Sol decorrentes de seu ciclo de atividades e que essas mudanças estão concentradas principalmente em sua região equatorial.

Na Figura 2.17a mostramos uma média de 10 mapas do mês de agosto de 1996, período de mínima atividade solar, já na Figura 2.17b a média foi feita utilizando 10 mapas de agosto de 2000, período de máxima atividade do ciclo solar. A linha sólida representa uma média corrida de 10 pontos.

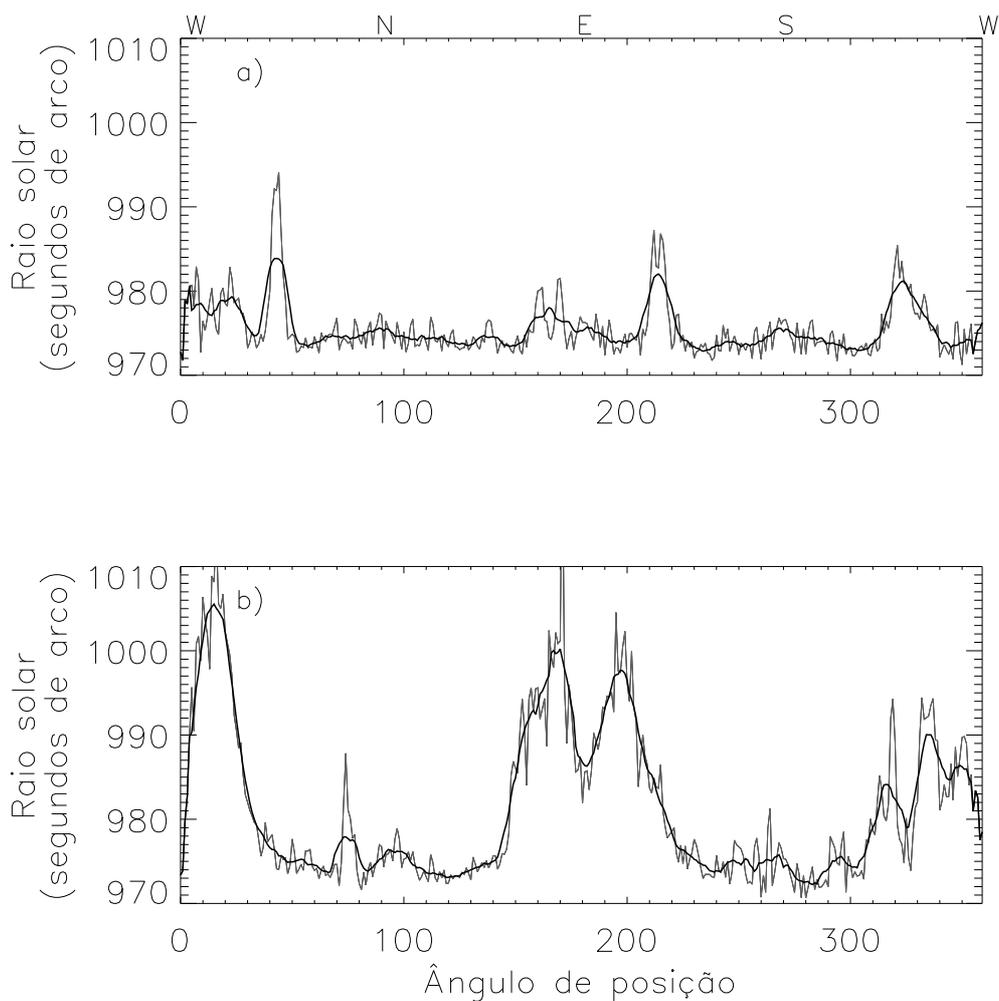


FIGURA 2.17 - a) Variação angular do raio solar para o período de mínima atividade solar. b) Variação angular do raio solar para o período de máxima atividade solar. Estes valores representam uma média de 10 mapas.

2.3 CONCLUSÕES DA ANÁLISE DE DADOS

- Os resultados mostram que a intensidade do disco solar em 17 GHz não se distribui uniformemente, tendo maiores valores nos pólos. Isto é compatível com as medidas de Shibasaki (1998), apesar deste ter analisado os dados apenas na direção norte-sul, que podem apresentar intensidades de brilho bastante altas.
- A distribuição temporal da intensidade deste abrilhantamento está bastante anticorrelacionada com o ciclo de atividade solar, concordando com o observado anteriormente por Efanov *et al.* (1980). A intensidade média desta distribuição foi de $13\pm 4\%$ no norte e $14\pm 4\%$ no sul, concordando com medidas de abrilhantamento de limbo anteriores.
- Apesar da anticorrelação com o número de manchas solares, existe uma visível correlação com o ciclo de fáculas polares.
- A largura do anel de abrilhantamento não apresentou qualquer tipo de correlação com o ciclo de atividade solar e teve média pouco maior que 1 minuto de arco, nos dois pólos.
- Foi observada uma anticorrelação entre 17 GHz e raios X moles na região dos pólos, provavelmente devido à existência de buracos coronais, evidentes nas imagens de raios X moles, o que não concorda com a comparação dia a dia feita por Shibasaki (1998). Este resultado também demonstra que a maior parte da emissão observada em 17 GHz está sendo formada em altura bem abaixo da região onde são formados os raios X moles.
- Aumento da correlação entre 17 GHz e raios X moles nas regiões próximas ao

equador solar nos períodos próximos ao máximo de atividade solar devido às regiões ativas.

- Existe boa correlação nos pólos entre as emissões em 17 GHz e H α durante o período de mínima atividade solar, o que é mostrado pela Figura 4.12.

- A variação temporal do raio solar em 17 GHz está correlacionado com o ciclo de atividade solar, o que concorda com os resultados do trabalho feito em 48 GHz por Costa et al. (1999).

- O estudo da variação angular do raio solar mostrou que a região equatorial sofre grandes variações entre os períodos de mínima e máxima atividade solar, porém o mesmo não acontece com a região polar. Isto se deve ao fato das regiões ativas do Sol estarem concentradas até $\pm 50^\circ$ de latitude heliocêntrica. Este aumento do raio nas regiões próximas ao equador, mesmo sem a presença de regiões ativas, é a causa do aumento do raio solar médio em períodos de máxima atividade.

Estes resultados inéditos sobre a variação temporal e angular do abrillantamento do limbo são descritos em Selhorst et al. (2003).

CAPÍTULO 3

MODELO DE ATMOSFERA

Como pudemos notar no capítulo anterior o abrilhantamento de limbo é uma propriedade constante nas observações em 17 GHz, que pode ser usado como indicativo da atividade solar, pois está anticorrelacionado com esta. Porém, o estudo das causas deste abrilhantamento está longe de ser conclusivo, pois se o abrilhantamento fosse devido apenas ao gradiente positivo de temperatura cromosférica, sua distribuição deveria ser uniforme ao redor do limbo. Para tentar explicar os índices de abrilhantamento observados e sua distribuição angular, nós estudaremos a variação da temperatura de brilho do centro do disco solar até seu limbo prevista pelos modelos de atmosfera e também qual a influência das espículas nesta distribuição.

No Capítulo 1, onde fizemos um resumo de alguns modelos de atmosfera, pudemos notar que não existe um modelo atmosférico que se adeque a todo o espectro de observações. Pelo fato dos mapas do NoRH serem normalizados para a temperatura de brilho prevista por Zirin e colaboradores em 1991, nós optamos por começar adotando este modelo para as simulações numéricas da distribuição centro-limbo da temperatura de brilho. Apesar deste artigo apenas mencionar o gradiente estimado da temperatura efetiva da cromosfera (~ 3 K/km) e a altura de escala da densidade de elétrons. Zirin (1998) fornece valores aproximados tanto para a temperatura efetiva (T) quanto para a densidade eletrônica (N_e) em função da posição, com $T=6000$ K e $N_e=2 \times 10^{11}$ partículas/cm³ em ~ 1800 km acima da fotosfera e $T=11000$ K e $N_e=2 \times 10^9$ partículas/cm³ em ~ 3500 km. Infelizmente, não foram feitas estimativas para a constituição da região de transição e da coroa, o que é de fundamental importância para nosso objetivo.

Por outro lado, Gabriel (1992) considerou a estrutura da coroa calma, excluindo o efeito das regiões ativas. O artigo apresenta três modelos derivados tanto da teoria *ab initio*

quanto da análise da intensidade de linhas espectrais. Criamos um modelo híbrido unindo o modelo de rede cromosférica apresentado por Gabriel (1992) para descrever a atmosfera solar acima de 3500 km com o proposto por Zirin para a região entre 1800 e 3500 km. Esta junção dos dois modelos foi feita de maneira que as curvas de temperatura efetiva e densidade de elétrons resultantes evitassem descontinuidades, o que podemos ver nas Figuras 3.1 e 3.2, que vão de 1800 a 40000 km com intervalo de 50 km entre cada ponto da curva.

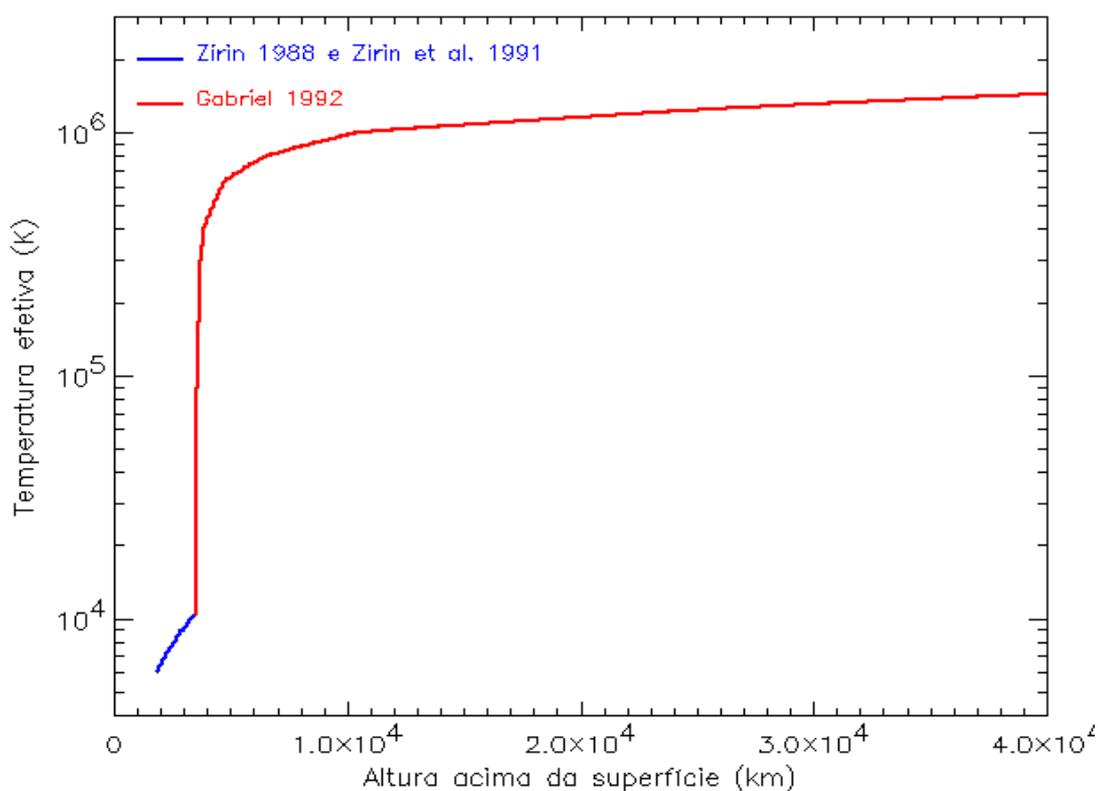


FIGURA 3.1 - Variação da temperatura da atmosfera solar. A curva azul representa o modelo proposto por Zirin (1988) e Zirin et al. (1991), enquanto a vermelha representa a região estudada por Gabriel (1992).

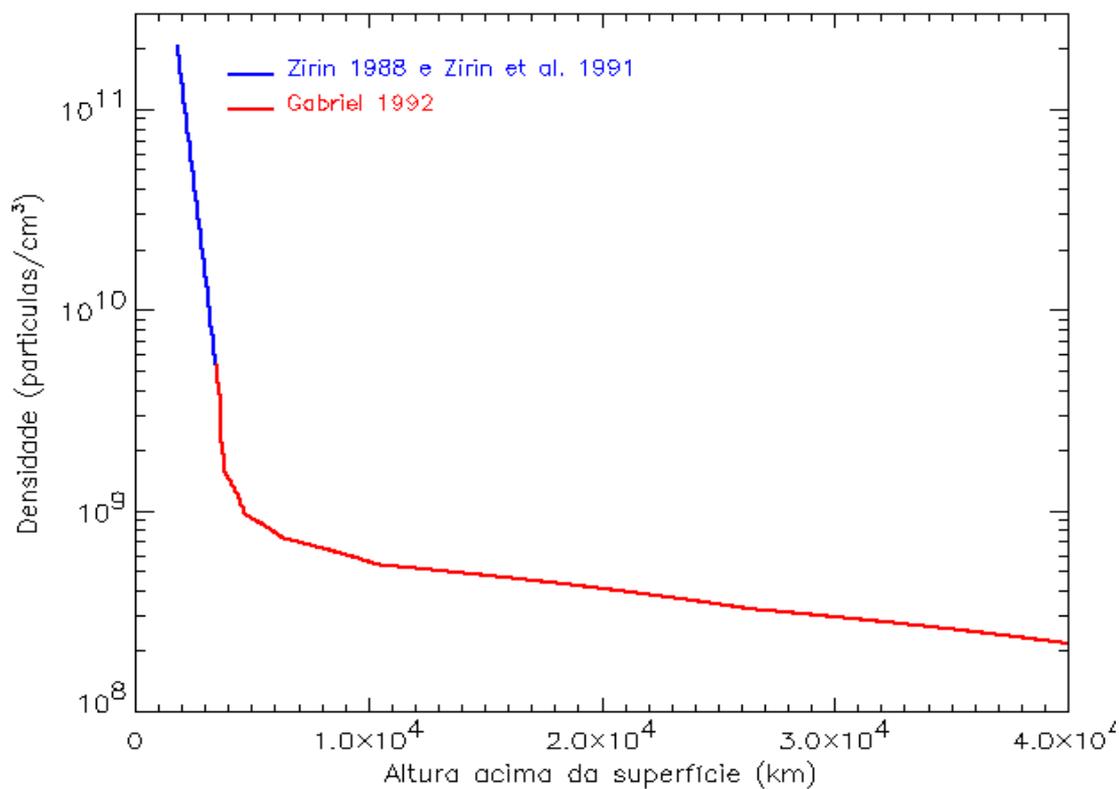


FIGURA 3.2 - Variação da densidade de elétrons da atmosfera solar. A curva azul representa o modelo proposto por Zirin (1988) e Zirin et al. (1991), enquanto a vermelha representa a região estudada por Gabriel (1992).

Para o cálculo da temperatura de brilho adotamos que a emissão é do tipo Bremsstrahlung, onde o coeficiente de absorção é dado por (e.g. Zirin 1988):

$$\kappa = 2 \times 10^{-23} Z^2 g \lambda^2 N_e N_i T^{(-3)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde: κ = coeficiente de absorção

Z = número atômico

g = fator Gaunt

λ = comprimento de onda

N_e = densidade de elétrons

N_i = densidade de íons

T = temperatura efetiva

O fator de Gaunt para a banda de temperatura e densidade do nosso interesse pode ser expresso como:

$$g = 1,27(2,78 + \log T - \frac{1}{3} \log N) \quad (\text{Eq. 3.2}).$$

A opacidade do meio é,

$$\tau = \int_0^{\infty} \kappa ds \quad (\text{Eq. 3.3}),$$

onde: τ = opacidade

κ = coeficiente de absorção

ds = elemento de distância

e a temperatura de brilho (T_B) pode ser expressa como:

$$T_B = \int_0^{\infty} T \kappa e^{-\tau} ds \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Para o cálculo da temperatura de brilho nós adotamos que o meio é formado, em sua grande maioria, por hidrogênio ($Z=1,178$) e que está completamente ionizado ($N_e=N_i$) (Zirin et al. 1991). A temperatura de brilho em 17 GHz resultante deste modelo de atmosfera é de 10650 K, que é aproximadamente igual ao que é adotado pelo NoRH. A maior parte da emissão medida ($\tau=1$) vem de 3100 km acima da superfície, onde a temperatura efetiva é ~ 9500 K e a densidade eletrônica vale $\sim 1,7 \times 10^{10}$ partículas/cm³.

Apesar do resultado obtido concordar com o valor de temperatura de brilho em 17 GHz adotada pelo NoRH, nosso objetivo foi criar um modelo que se ajustasse às observações em rádio desde frequências submilimétricas (405 GHz) até decimétricas (1.4 GHz). Estas medidas foram obtidas a partir das observações feitas por Zirin et al. (1991) entre 1,4 e 18 GHz e das compilações feitas por Reber (1971) em 34,5 até 300 GHz, Linsky (1973) entre 19 e 300 GHz, Beckman et al. (1973) em 33,4 até 405,4 GHz, Kuseski e Swanson (1976) entre 33,9 e 231 GHz. O ajuste do modelo a estas frequências torna imprescindível o estudo da atmosfera solar abaixo de 1800 km, pois muitas destas frequências têm grande parte da sua emissão originando-se na fotosfera e baixa cromosfera.

Optamos por utilizar o modelo C proposto por Fontenla et al. (1993), que representa o Sol calmo médio, entre 0 e 1000 km acima da superfície. Como estudamos apenas a emissão Bremsstrahlung incluímos somente a densidade de elétrons e de prótons, visto que a densidade de prótons apresentada neste modelo é muito maior que a densidade dos outros íons. Entre 1000 e 3500 km utilizamos uma modificação do modelo proposto por Zirin et al. (1991) com a temperatura aumentando exponencialmente com uma altura de escala de 3800 km e com a densidade de elétrons igual a de prótons sendo reduzida exponencialmente com altura de escala de 750 km. A igualdade entre as densidades de prótons e elétrons é válida uma vez que o modelo FAL-C (Fontenla et al. 1993) estima densidades aproximadamente iguais a partir de ~ 1000 km, a mudança

mais significativa em relação a este modelo é o início da região de transição, que optamos por seguir o proposto por Zirin et al. (1991) e iniciar a região de transição acima de 3500 km. Uma comparação entre os modelos utilizados como base para a estrutura fotosférica e cromosférica do modelo híbrido aqui proposto pode ser observado na Figura 3.3 que mostra a distribuição de temperaturas e na Figura 3.4 que apresenta a distribuição das densidades.

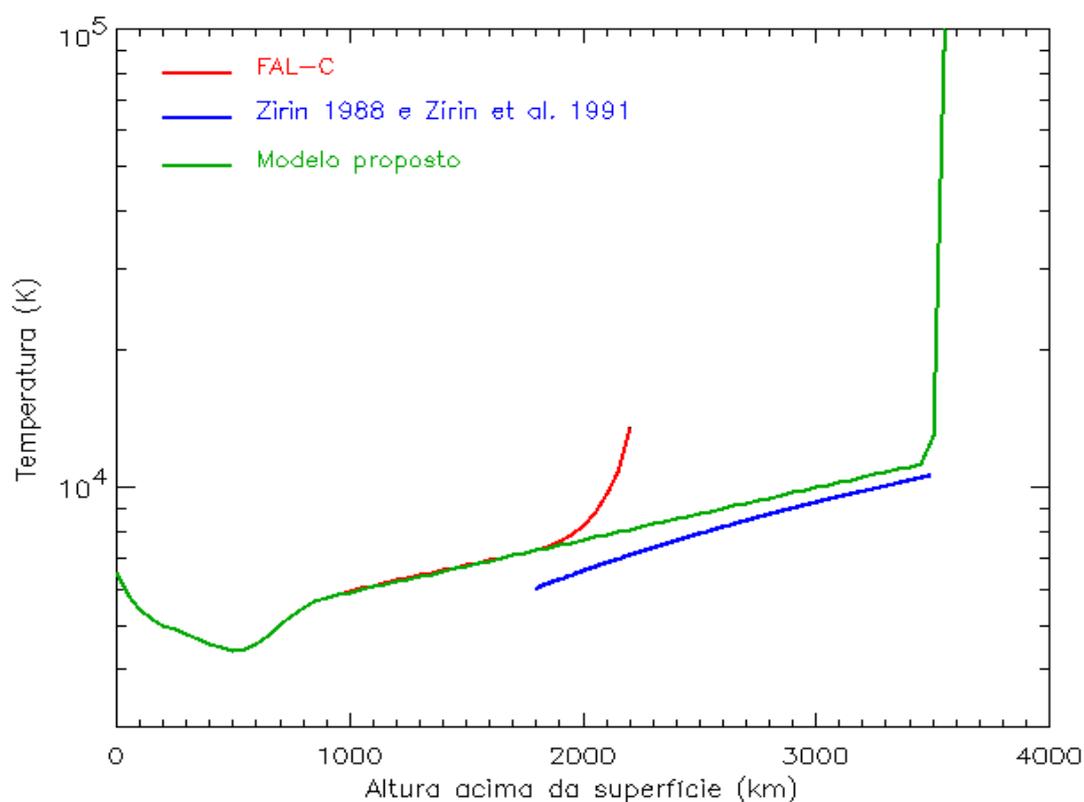


FIGURA 3.3 - Variação da temperatura da atmosfera solar para o modelo proposto neste trabalho (curva verde). Também são mostrados o modelo proposto por Zirin (1988) e Zirin et al. (1991) (curva azul), e modelo FAL-C (curva vermelha).

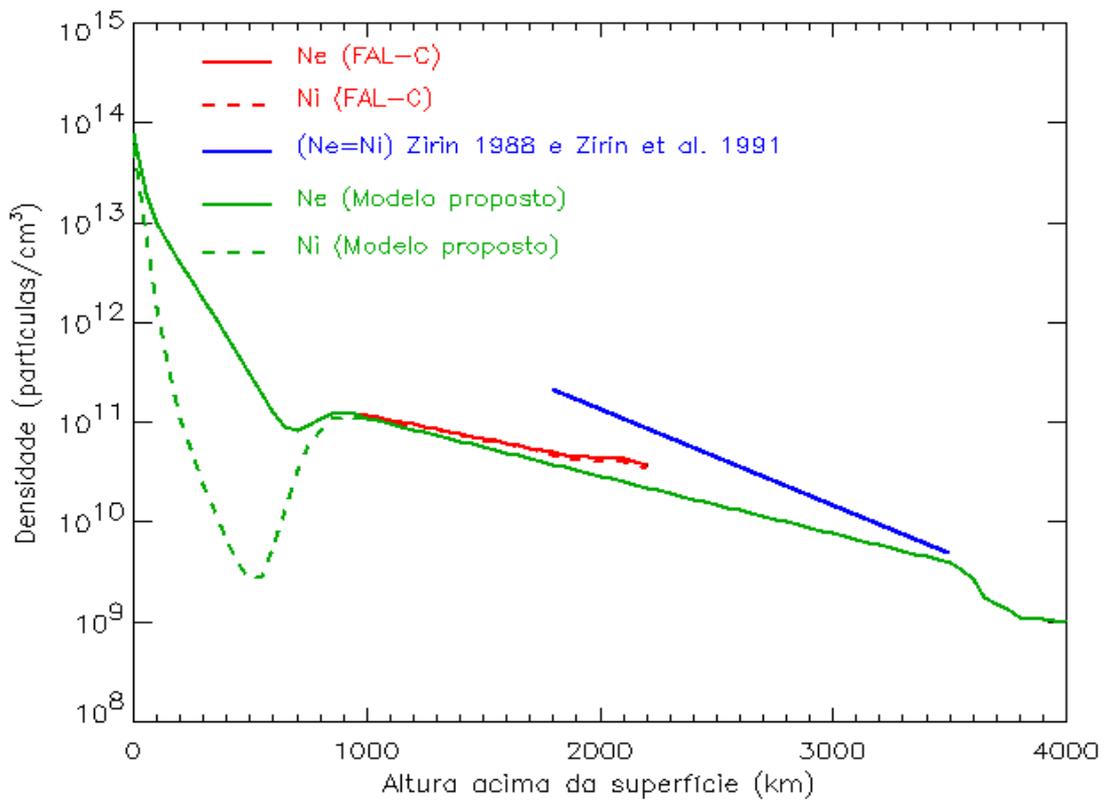


FIGURA 3.4 - Variação das densidades de elétrons (Ne) e prótons (Ni) adotadas para o modelo proposto neste trabalho (curva verde). Também são mostrados as curvas do modelo proposto por Zirín (1988) e Zirín et al. (1991) (curva azul), e do modelo FAL-C (curva vermelha).

Para a região de transição e a coroa (3500 – 40000 km) continuamos a utilizar o modelo de Gabriel (1992), porém foi necessário reduzir a densidade proposta em ~30% para um melhor ajuste com os dados. Apesar de ser uma mudança grande, os valores para a densidade da coroa continuam sendo compatíveis com o proposto na literatura. Por exemplo, o menor valor de densidade do nosso modelo é de $1,6 \times 10^8$ partículas/cm³

enquanto Zirin (1988) propõe que a região da coroa onde a maior parte da emissão em 300 MHz ($\tau=1$) tenha densidade eletrônica média de 2×10^8 partículas/cm³. Outro fato a salientar é que teríamos que reduzir a temperatura em uma porcentagem muito maior para obter o mesmo resultado, caso optássemos por modificar a temperatura ao invés da densidade. A Figura 3.5 mostra a redução feita na distribuição de densidades da coroa em comparação com o modelo original.

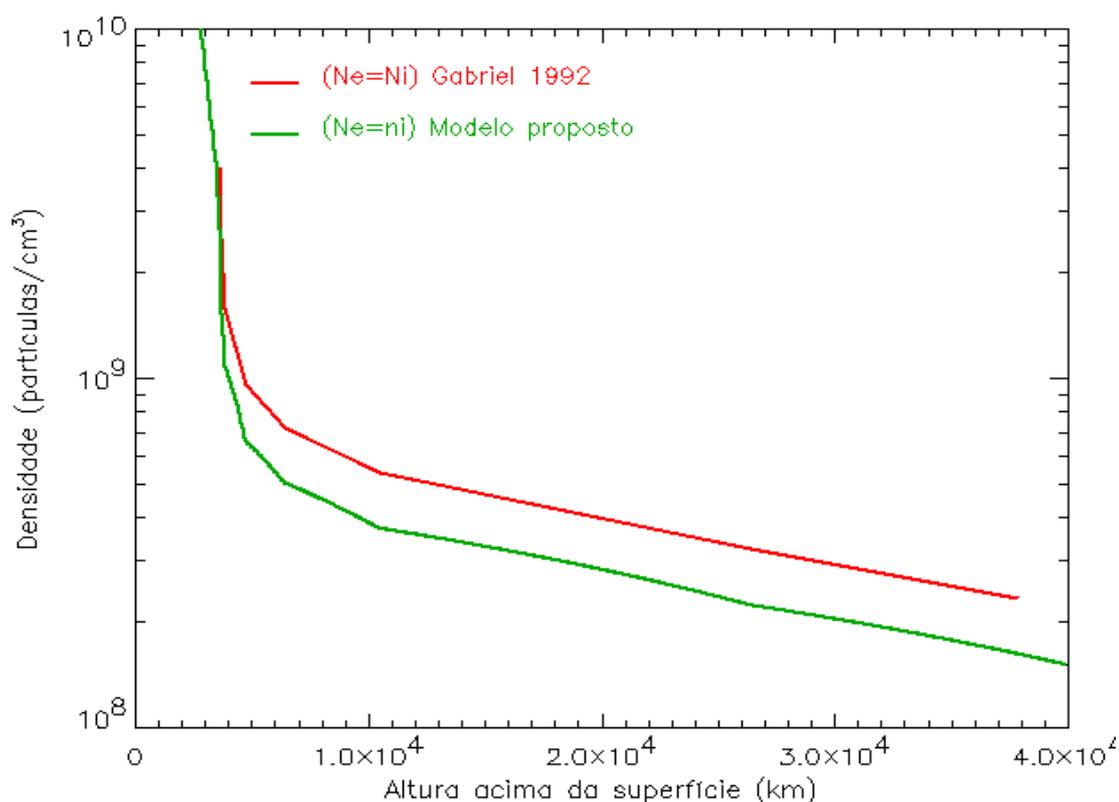


FIGURA 3.5 - Diferenças na variação das densidades de elétrons (Ne) e prótons adotadas para o modelo proposto neste trabalho (curva verde) em relação ao proposto por Gabriel (1992) para a região da coroa solar (curva vermelha).

Todas as modificações feitas nos modelos atmosféricos resultaram em um modelo atmosférico que se ajusta bem às medidas de temperaturas de brilho observadas desde 1,4 à 405 GHz, este ajuste é mostrado na Figura 3.6. Quanto à origem da emissão em 17 GHz, esta viria, em sua maior parte ($\tau=1$), de 2900 km acima da superfície que é 200 km abaixo da região de formação em nosso primeiro modelo. Nesta região a temperatura efetiva é ~ 9600 K e a densidade de elétrons e íons equivale a $\sim 9,3 \times 10^9$ partículas/cm³ e renderia uma temperatura de brilho de 10390 K.

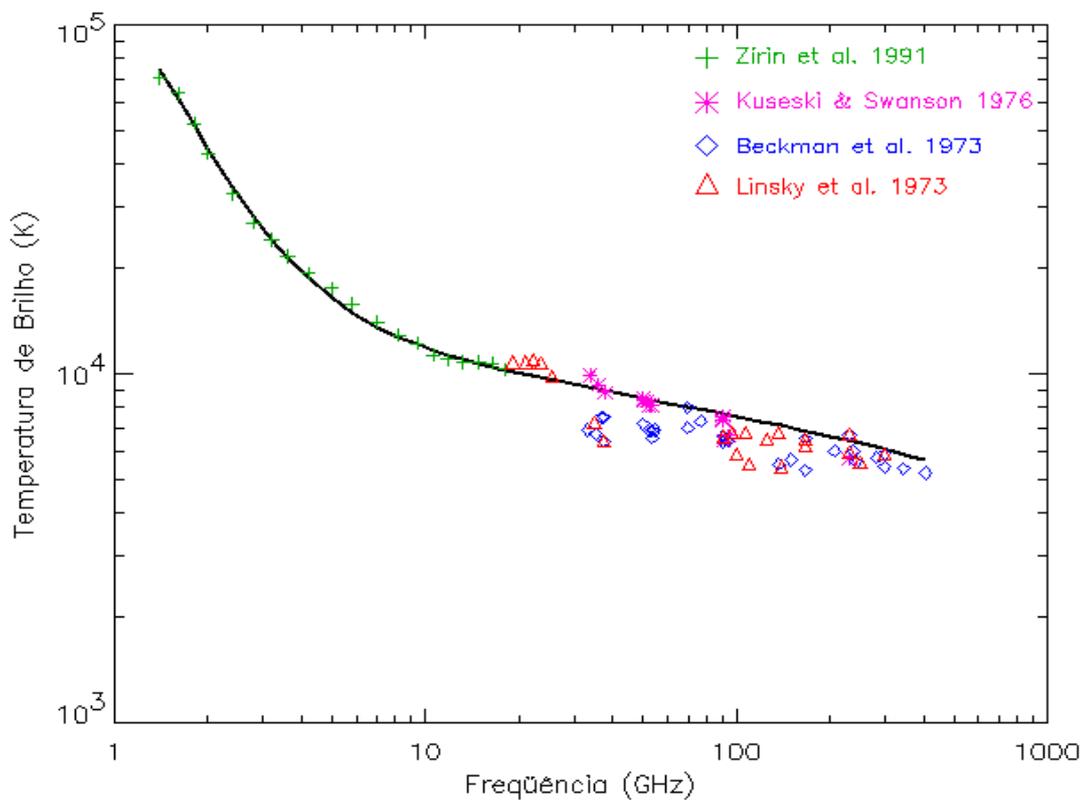


FIGURA 3.6 - Ajuste das temperaturas de brilho previstas pelo modelo aos dados observacionais.

3.1 ATMOSFERA SEM ESTRUTURAS CROMOSFÉRICAS

Uma vez definidas as curvas de temperatura e densidades de elétrons e prótons em função da posição acima da fotosfera, estes valores foram distribuídos em duas matrizes bidimensionais representando a atmosfera solar, onde cada ponto da matriz representa uma área de 50 km². Devido às limitações de processamento computacional, para estudar a variação centro-limbo da temperatura de brilho solar, foram feitas 7 matrizes bidimensionais da distribuição de temperatura efetiva e outras 7 contendo o produto entre a densidade de elétrons e de íons, estas matrizes acompanham a curvatura do Sol como mostra a Figura 3.7. A divisão da atmosfera estudada em várias partes teve o objetivo de reduzir o tempo computacional de integração. Como supusemos uma atmosfera esfericamente simétrica e homogênea, as matrizes representam apenas um quadrante do Sol, porém para que o cálculo da temperatura de brilho no limbo fosse feito em todo o caminho percorrido pela radiação, as matrizes cobrem pouco mais que 90°, indo de 0 a 100° em relação ao ângulo heliográfico.

Para calcular a temperatura de brilho, utilizamos os valores das temperaturas e dos produtos das densidades em uma dimensão, obtidos através das linhas de suas respectivas matrizes. Cada linha representa o caminho da integração no cálculo da opacidade e da temperatura de brilho para diferentes posições no disco solar. Tendo a distribuição unidimensional de temperaturas e densidades, calculamos a temperatura de brilho aplicando as equações 3.1 a 3.4, sendo o espaçamento entre cada valor calculado igual a 14 linhas, que é equivalente a 700 km (~1 segundo de arco) .

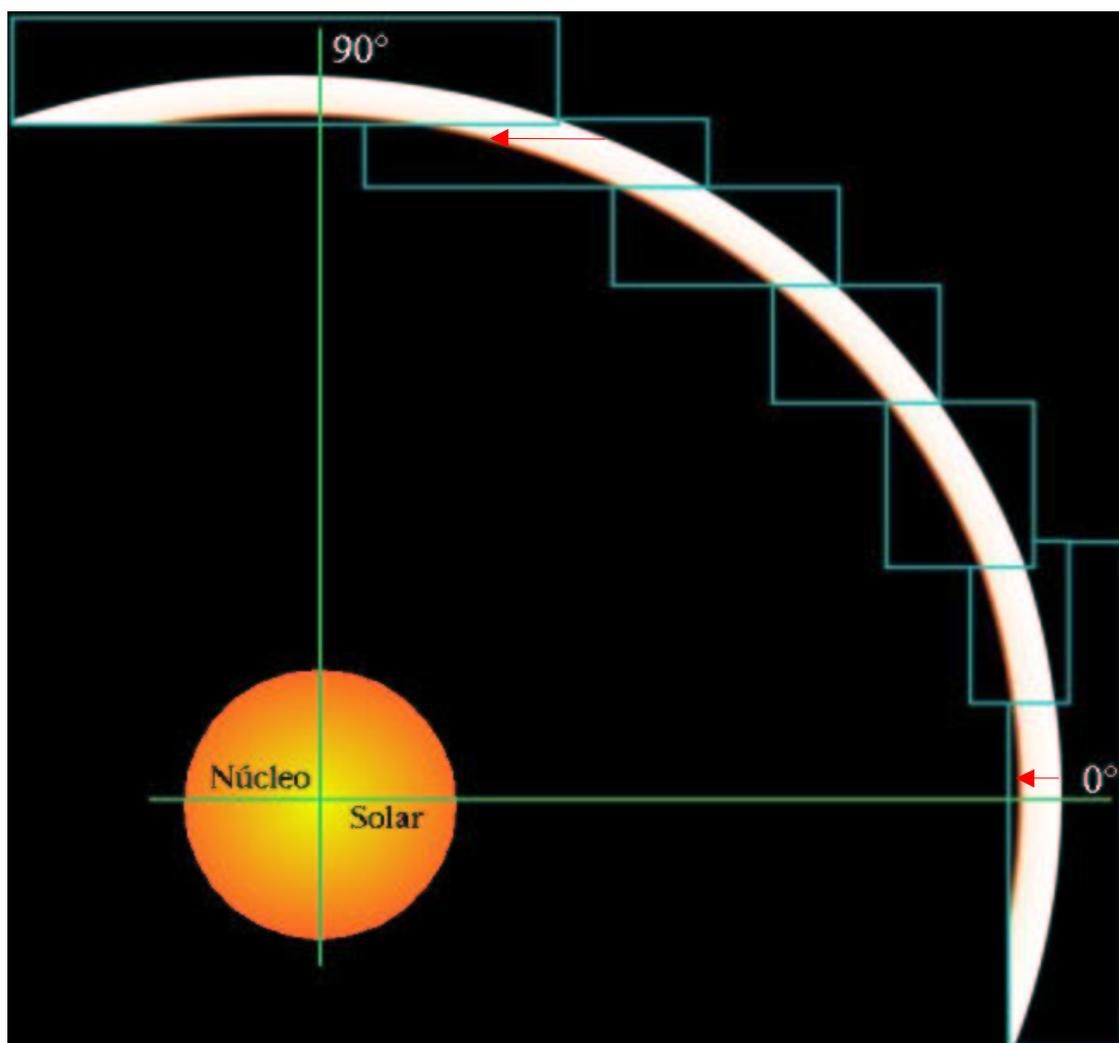


FIGURA 3.7 - Distribuição da temperatura atmosférica seguindo a curvatura do Sol, os quadros representam as matrizes utilizadas no estudo. As setas vermelhas indicam o caminho da integração e o aumento deste caminho com o aumento da latitude.

O resultado da distribuição da temperatura de brilho do centro ao limbo solar, mostra que o perfil atmosférico proposto, renderia picos de temperatura de brilho até 100% acima do valor central do disco do Sol (Figura 3.8 cruces em cinza), quando observado

por um instrumento em 17 GHz com resolução angular de ~1 segundo de arco. Porém, a resolução angular nos mapas obtidos pelo NoRH é de ~10 segundos de arco, por isso o resultado foi convoluído com uma gaussiana com meia potência equivalente à meia potência do feixe sintetizado do interferômetro de 10" (Figura 3.8 linha em preto) . O resultado desta simulação mostra que:

- o abrilhantamento do limbo de 36 % do modelo após a convolução é aproximadamente igual aos valores máximos de abrilhantamento medidos nos pólos e muito maior que os observados na região do equador;
- a largura do abrilhantamento de limbo, quando este cai à metade de sua intensidade máxima, foi de 34 segundos de arco e é menor do que mostra a média das medidas observacionais (66 ± 16 segundos de arco);
- o raio solar medido no ponto onde a intensidade representa metade da intensidade do Sol calmo é de ~970 segundos de arco, que é cerca de 6 segundos de arco menor que a média dos raios solares medidos nos mapas de 17 GHz.

Um fato bastante interessante em relação à variação da temperatura de brilho, foi que o valor da intensidade máxima medida próxima ao limbo ocorre aproximadamente em 3300 km (964,6") acima da superfície solar, que é bastante próximo do local onde ocorre a maior parte da emissão em 17 GHz para o nosso modelo (2900 km), como foi discutido acima. Porém, quando o resultado é convoluído com um feixe de 10" o máximo de intensidade é deslocado para a região interna do disco solar, sendo localizado a cerca de 900 km abaixo da superfície (958,8"), mostrando uma variação em relação à posição original de cerca de 4200 km.

O estudo do raio solar no ponto onde a intensidade média do centro do disco é reduzida pela metade, sofreu uma menor variação com a convolução, passando de 966,5" para 969,7", o que representa uma mudança de ~2300 km, mostrando que este método é mais eficiente no estudo de variações do raio solar, tendo em vista que a distribuição de brilho ao redor do limbo solar não é uniforme.

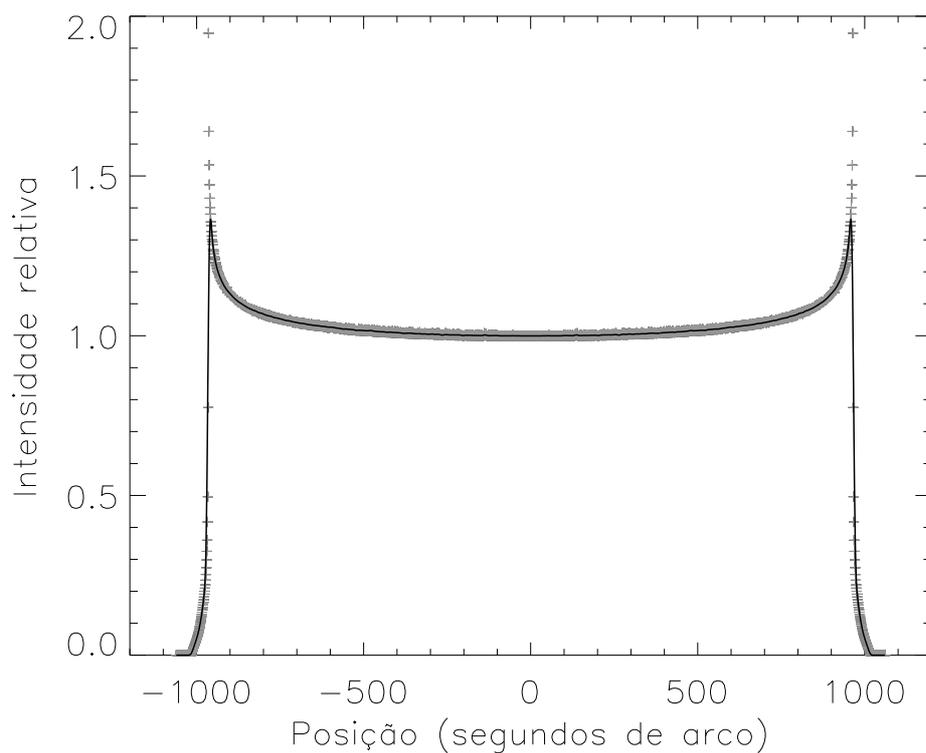


FIGURA 3.8 - Variação centro-limbo da temperatura de brilho em 17 GHz para o modelo.

3.2 ATMOSFERA COM A INCLUSÃO DE ESPÍCULAS

Como podemos notar, para o modelo utilizado, uma atmosfera esfericamente simétrica e sem estruturas não é uma correta representação das observações. Para se ter um modelo mais próximo da realidade incluímos a presença de espículas que são estes cilindros de plasma inclinados mostrados na Figura 3.9. Porém, estas estruturas de curta duração (minutos) cobrem de 1-10% da fotosfera solar, a qualquer momento que o Sol é observado. Estas atingem regiões acima de 3000 km, local onde a maior parte da emissão em 17 GHz é formada, modificando assim a medida da temperatura de brilho no local.

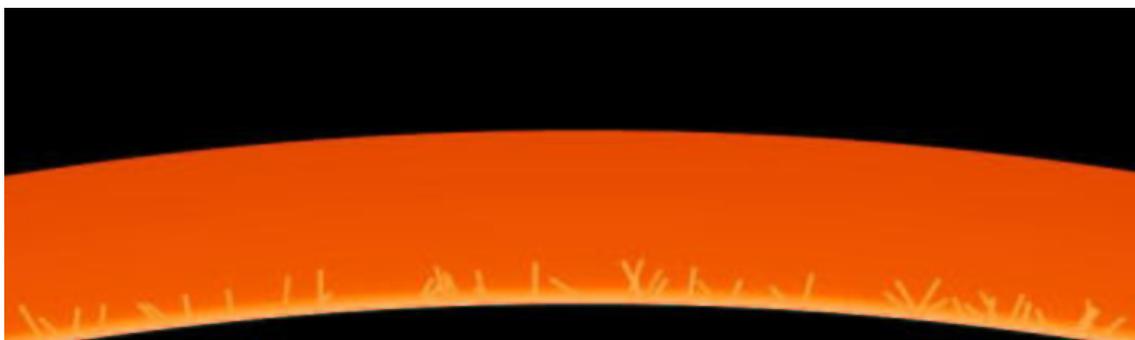


FIGURA 3.9 - Distribuição das espículas sobre o limbo solar.

Para o nosso estudo, supusemos que as espículas são constituídas principalmente por hidrogênio completamente ionizado, que a temperatura e densidade da espícula não variem com a altura e que o material da espícula somente substitui o material atmosférico local sem influenciar o restante da atmosfera. Como espículas são estruturas cromosféricas, tipicamente observadas em $H\alpha$, optamos por seguir o proposto por Braun e Lindsey (1987) e definir 1000 km acima da fotosfera como o ponto de sua origem.

O primeiro teste em relação à influência das espículas foi simular o efeito que a altura atingida pela espícula causaria na medida da temperatura de brilho do centro do disco solar, o que pode ser visto nos gráficos da Figura 3.10. Nestes gráficos, a altura da espícula começa em 1000 km e cresce até atingir um máximo de 10000 km, as curvas representam temperaturas entre 7000 e 13000 K, com intervalo de 1500 K entre cada uma delas, a densidade é fixa em cada gráfico e aumenta 1×10^{10} partículas/cm³ de gráfico para gráfico. A partir destes gráficos podemos concluir que a temperatura de brilho medida no centro do disco solar:

- de 1000 até ~2500km o brilho não se altera pois as espículas são opticamente finas e o brilho é definido pelo brilho da fotosfera;
- sofre uma grande variação quando a espícula tem sua altura máxima na região da atmosfera que vai de ~2500 até 3700 km ($\tau \simeq 1$). A partir desta região a temperatura de brilho pouco se altera com a altura atingida pela espícula, pois a espícula é opticamente espessa e a área coberta praticamente não aumenta;
- para uma mesma densidade, cresce com o aumento da temperatura das espículas;
- cresce com o aumento da densidade enquanto esta é $\leq 4 \times 10^{10}$ partículas/cm³ e passa a diminuir para densidades maiores.

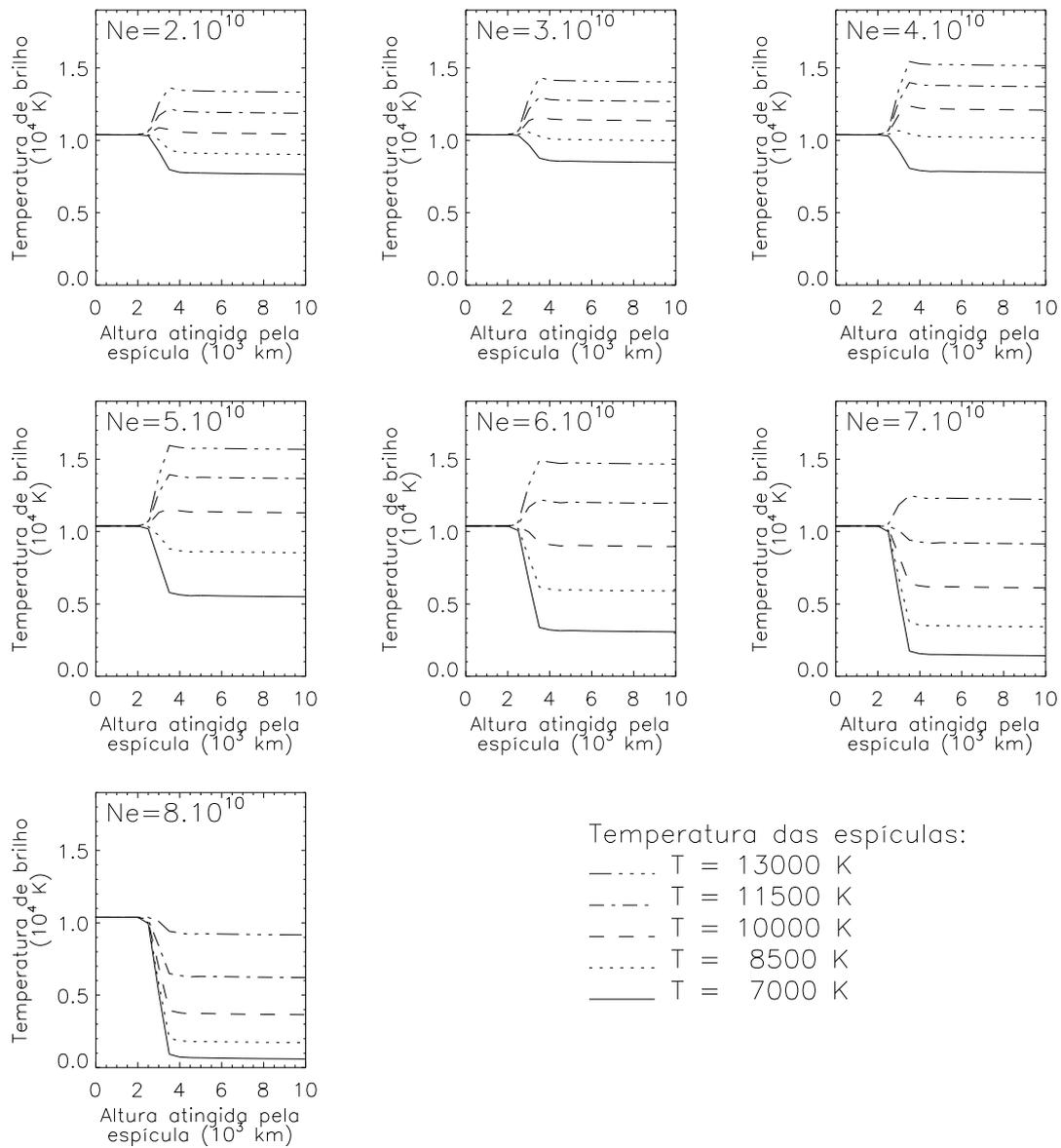


FIGURA 3.10 - Os gráficos mostram a influência da altura das espículas para diferentes temperaturas (K) e densidades (canto superior esquerdo de cada gráfico em partículas/cm³).

Os valores que usamos para as alturas e temperaturas das espículas são os mais comuns mostrados na literatura (vide capítulo sobre espículas), porém existem poucas estimativas em relação às suas densidades, entre $\sim 0.5 - 3 \times 10^{-13} \text{ g/cm}^3$. Para uma espícula formada principalmente por hidrogênio, a densidade é de $\sim 3 - 18 \times 10^{10}$ partículas/cm³. Os gráficos da Figura 3.10 mostram que densidades maiores que 8×10^{10} partículas/cm³ fariam com que a temperatura de brilho fosse reduzida à valores muito baixos, mesmo para espículas mais quentes, o que reduziria a temperatura central do disco do Sol e suprimiria completamente o abrilhantamento do limbo.

Para estudar a variação centro-limbo, nós distribuimos espículas bidimensionais utilizando o método de Monte Carlo sobre as matrizes de temperatura e densidade e calculamos a temperatura de brilho como no caso da atmosfera sem estruturas. O número total de espículas distribuídas sobre as matrizes foi estimado através da comparação entre a área total da superfície do Sol e área coberta pelas espículas, que para as simulações foi adotada como sendo 10% da superfície solar total.

As primeiras simulações foram feitas com espículas com altura, largura, temperatura e densidades constantes, porém com as posições da base e suas inclinações obtidas através do método Monte Carlo, para o qual usamos um gerador pseudo-aleatório do IDL com distribuição uniforme. As variáveis inicialmente fixas foram gradativamente tornando-se também aleatórias. Um exemplo da distribuição de espículas em nossa atmosfera pode ser visto na Figura 3.9.

O resultado de uma simulação é reflexo da presença ou não de espículas na região estudada, o que vemos como uma dispersão de pontos em torno da temperatura de brilho da atmosfera sem espículas (Figura 3.11).

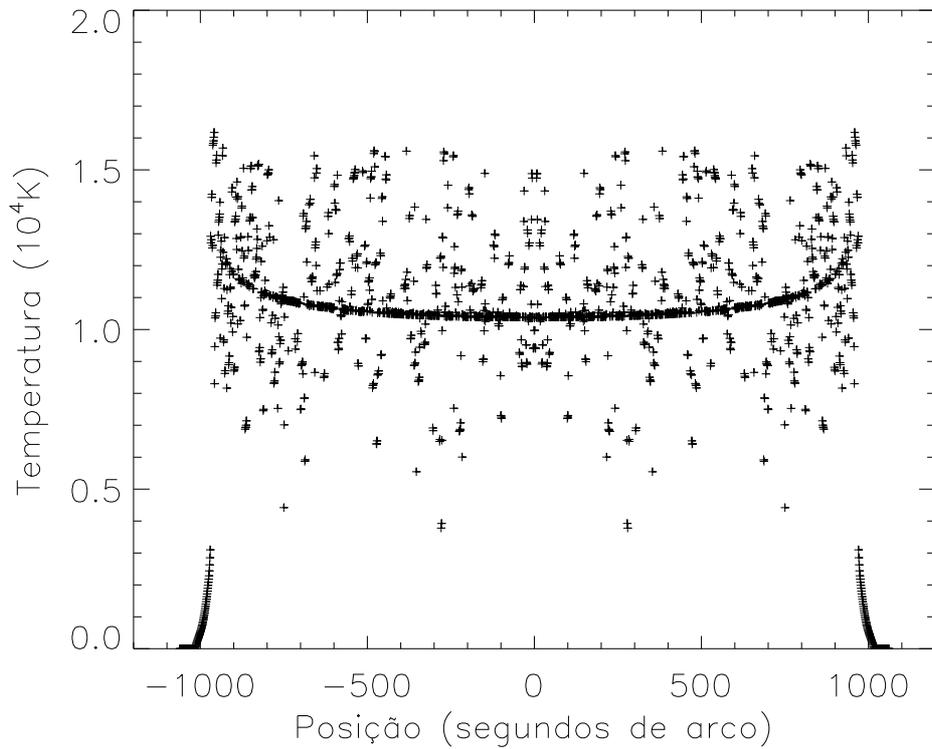


FIGURA 3.11 - Variação da temperatura de brilho do centro ao limbo do Sol para uma simulação de atmosfera com espículas.

Para obter um resultado que representasse o valor médio do Sol com a presença de espículas, foram feitas várias simulações e em seguida uma média de todas as simulações (cruzes na Figura 3.12). Este resultado foi convolvido com um feixe de 10 segundos de arco (contínuo na Figura 3.12). O número de simulações variou entre 20 e 40, dependendo do número de parâmetros livres e foi determinado por um critério geral de convergência, no qual:

- a) fazemos uma média de n simulações;

b) calculamos o desvio padrão desta média, em 400 pontos próximos ao centro do disco solar;

c) a diferença entre o desvio padrão da média de n simulações e o desvio padrão de $(n+1)$ simulações não deve ser maior que 0,0003;

d) para garantir que este resultado não seja apenas momentâneo, esta diferença tem de refletir a média de três análises sucessivas.

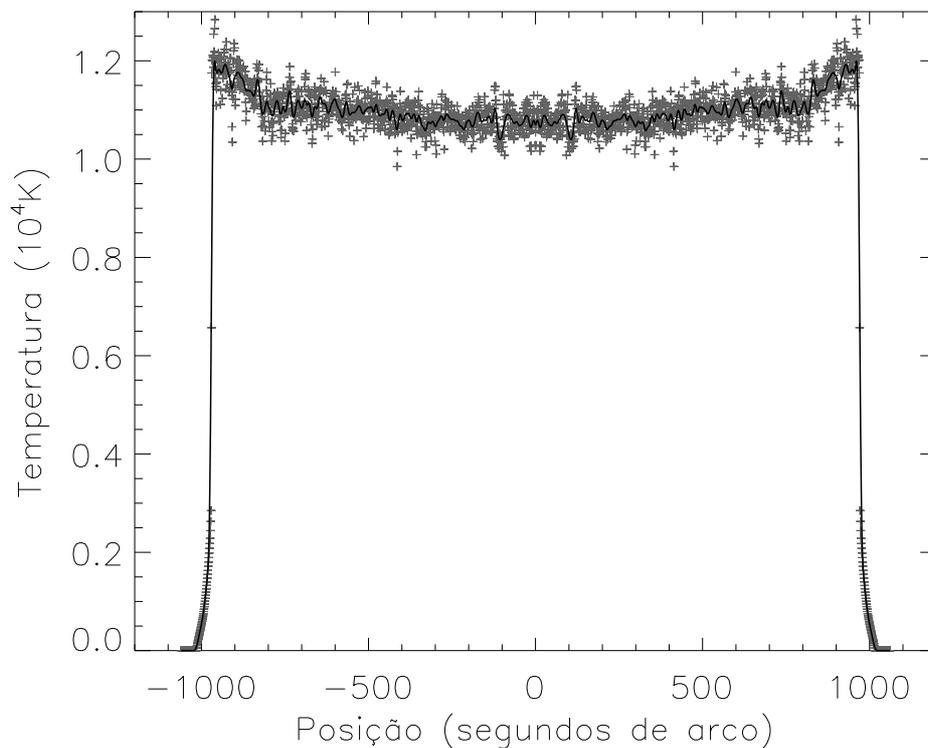


FIGURA 3.12 - Variação da temperatura de brilho do centro ao limbo do Sol da média resultante das simulações (cruzes em cinza) e sua convolução com um feixe de 10 segundos de arco (linha contínua).

A Tabela 3.1 e os gráficos da Figura 3.13 mostram simulações com espículas de 500 km de largura e 5000 km de altura, densidade de elétrons e íons de 4×10^{10} partículas/cm³ e inclinação aleatória entre 30 e 150° em relação à superfície para todas as simulações, enquanto a temperatura é inicialmente de 6000 K e aumenta 2000 K para cada novo procedimento. Os resultados mostram que para uma mesma densidade o brilho no limbo e a temperatura do Sol calmo (temperatura média do centro do disco solar) aumentam com o aumento da temperatura da espícula, enquanto a largura do brilho diminui. O raio solar sofre pequenas variações em relação ao valor medido para a atmosfera sem espícula.

TABELA 3.1 - Simulações estudando o efeito da temperatura das espículas.

| <i>Dados das Espículas</i> | | | | | | <i>Resultados</i> | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------|------------------------------|---|-------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Fig. | Largura (km) | Altura (10 ³ km) | Inclinação | Temp. (10 ³ K) | Densidade (10 ¹⁰ cm ⁻³) | Sol Calmo (K) | Abrilh. (%) | Largura (arcsec) | Raio (arcsec) |
| 5.8 | - | - | - | - | - | 10392±7 | 36.4 | 33.8 | 969.7 |
| 5.13a | 500 | 5 | 30° - 150° | 6 | 4 | 9031±129 | - | - | 969.2 |
| 5.13b | 500 | 5 | 30° - 150° | 8 | 4 | 10148±37 | 9.8 | 134.7 | 970.2 |
| 5.13c | 500 | 5 | 30° - 150° | 10 | 4 | 10981±38 | 20.1 | 90.8 | 970.6 |
| 5.13d | 500 | 5 | 30° - 150° | 12 | 4 | 11666±104 | 30.2 | 78.8 | 970.8 |

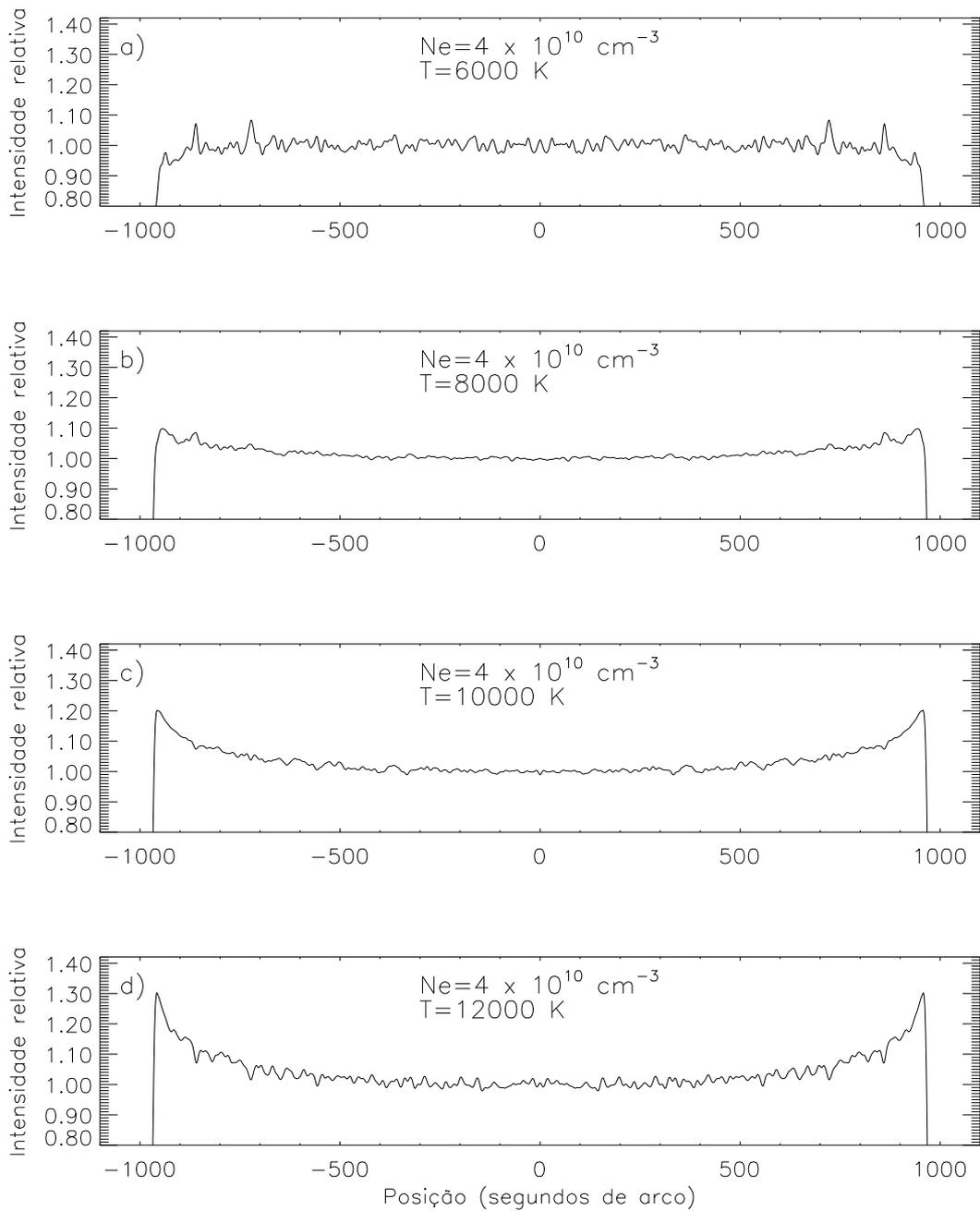


FIGURA 3.13 - Variação centro-limbo da temperatura de brilho para as simulações mostradas na Tabela 3.1.

A próxima etapa foi tornar a altura da espícula aleatória variando de 5000 à 7000 km, e estudar a variação do brilho em relação ao aumento da densidade de elétrons e íons da espícula para uma temperatura fixa. Os dados e resultados destas simulações são mostrados na Tabela 3.2 e Figura 3.14, onde podemos ver que o brilho e a temperatura do Sol calmo seguem o mesmo padrão observado nas simulações unidimensionais vistas anteriormente, mostrando que tanto a temperatura do Sol calmo quanto o brilho aumentam acompanhando o aumento na densidade até $\sim 4 \times 10^{10}$ partículas/cm³ e a partir deste valor voltam a diminuir. O valor do raio solar para uma mesma temperatura e densidade das simulações anteriores (10000 K e 4×10^{10} partículas/cm³) mostrou-se 2" de arco maior, indicando que o raio solar em 17 GHz é reflexo da altura atingida pelas espículas na atmosfera solar.

TABELA 3.2 - Simulações estudando o efeito da densidade das espículas.

| <i>Dados das Espículas</i> | | | | | | <i>Resultados</i> | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------|------------------------------|---|-------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Fig. | Largura (km) | Altura (10 ³ km) | Inclinação | Temp. (10 ³ K) | Densidade (10 ¹⁰ cm ⁻³) | Sol Calmo (K) | Abrilh. (%) | Largura (arcsec) | Raio (arcsec) |
| 5.14a | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 10 | 2 | 10478±19 | 10.1 | 134.1 | 972.5 |
| 5.14b | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 10 | 3 | 10807±53 | 13.8 | 130.1 | 972.4 |
| 5.14c | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 10 | 4 | 11093±79 | 17.3 | 122.5 | 972.6 |
| 5.14d | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 10 | 5 | 10796±55 | 13.5 | 129.9 | 972.4 |
| 5.14e | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 10 | 6 | 9927±50 | 3.1 | 79.3 | 971.9 |

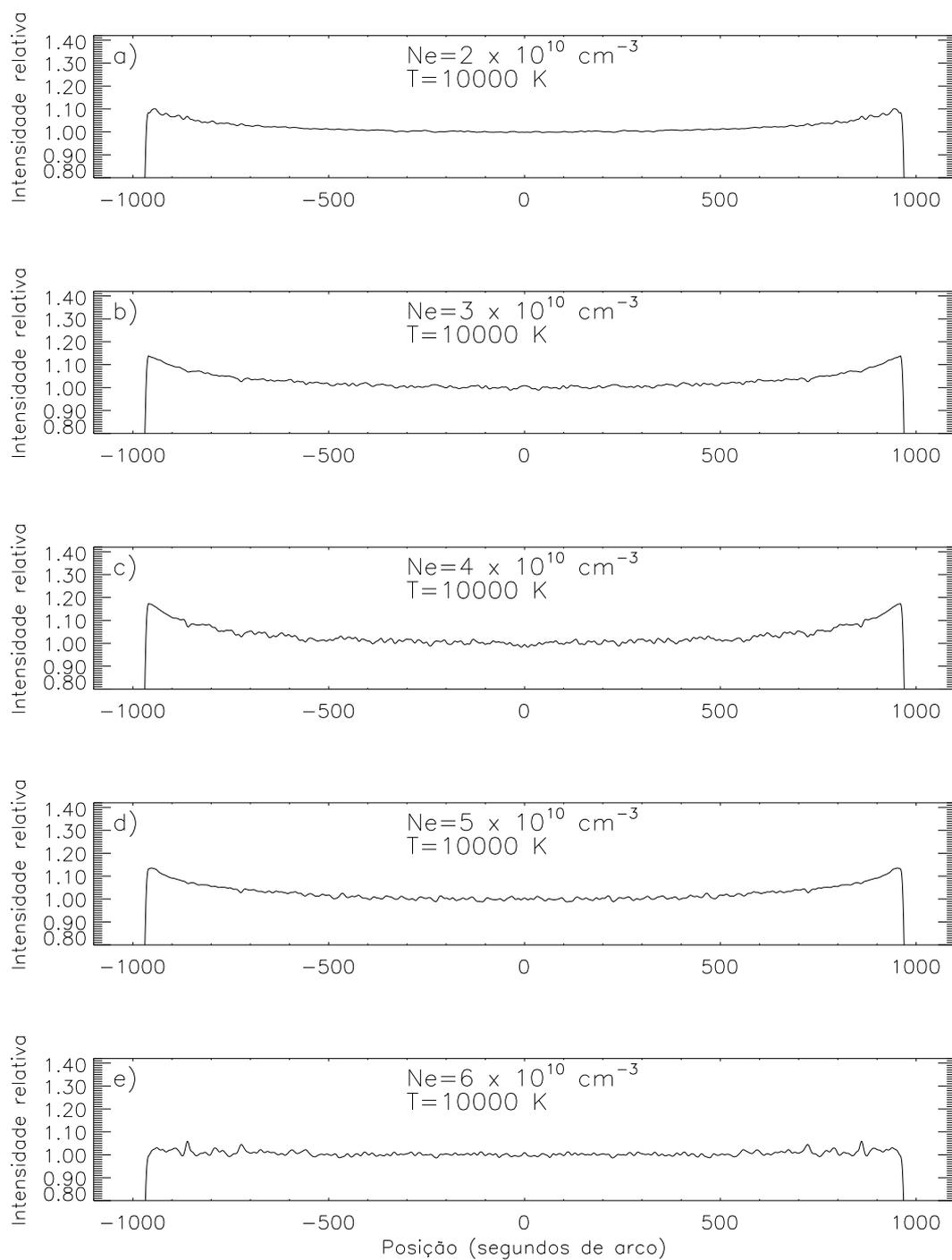


FIGURA 3.14 - Variação centro-limbo da temperatura de brilho para as simulações mostradas na Tabela 3.2.

Na Tabela 3.3 estudamos a variação do abrilhantamento de limbo e do raio solar em relação a variações nas larguras das espículas, sendo que a largura é o único parâmetro fixo nestas simulações, iniciando com 500 km de diâmetro e aumentando em 200 km entre cada simulação. Nestas simulações o número de espículas foi mantido constante, fazendo que se distribuam por uma área maior sobre a superfície solar. Os resultados mostram que houve uma variação muito pequena tanto, na intensidade do abrilhantamento de limbo (2 %), quanto no raio solar.

TABELA 3.3 - Simulações estudando o efeito da largura das espículas.

| <i>Dados das Espículas</i> | | | | | <i>Resultados</i> | | | |
|----------------------------|---------------------|------------|-------------------|--|-------------------|-------------|------------------|---------------|
| Largura (km) | Altura (10^3 km) | Inclinação | Temp. (10^3 K) | Densidade (10^{10} cm ⁻³) | Sol Calmo (K) | Abrilh. (%) | Largura (arcsec) | Raio (arcsec) |
| 500 | 5-7 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10700±136 | 12.5 | 123.9 | 972.3 |
| 700 | 5-7 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10729±115 | 12.6 | 134.3 | 972.3 |
| 900 | 5-7 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10726±143 | 10.6 | 141.6 | 972.6 |
| 1100 | 5-7 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10697±142 | 11.1 | 163 | 972.5 |

Um estudo mais detalhado sobre a influência da altura das espículas no raio solar foi feito a seguir. Nestas simulações apenas a largura da espícula é fixa, todos os demais parâmetros são gerados aleatoriamente, sendo que o máximo do intervalo referente às alturas aumenta em 1000 km entre cada simulação (Tabela 3.4).

Os resultados mostram que nem a temperatura do Sol calmo nem o abrilhantamento medido sofrem grandes alterações, sendo os valores medidos para o abrilhantamento compatíveis com os observados nas regiões de menor brilho dos mapas (equador e regiões intermediárias). Porém os valores referentes ao raio solar comprovam o indício anterior, mostrando que em 17 GHz o raio solar aumenta com o aumento da altura das

espículas, o que concorda com Horne et al. (1981) que propôs que as espículas são opticamente espessas em 235 GHz e são responsáveis pelo aumento do raio aparente do Sol. Na Figura 3.15 comparamos a região onde foi determinado o raio solar nas simulações.

TABELA 3.4 - Simulações estudando o efeito da altura das espículas.

| <i>Dados das Espículas</i> | | | | | | <i>Resultados</i> | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------|------------------------------|---|-------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Fig. | Largura (km) | Altura (10 ³ km) | Inclinação | Temp. (10 ³ K) | Densidade (10 ¹⁰ cm ⁻³) | Sol Calmo (K) | Abrilh. (%) | Largura (arcsec) | Raio (arcsec) |
| 5.15 | 500 | 5-7 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10700±136 | 12.5 | 123.9 | 972.3 |
| 5.15 | 500 | 5-8 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10752±152 | 12.2 | 107 | 973.5 |
| 5.15 | 500 | 5-9 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10677±134 | 12.6 | 126.6 | 974.6 |
| 5.15 | 500 | 5-10 | 30° - 150° | 7-13 | 2-6 | 10766±118 | 9.1 | 156.8 | 975.1 |

Como pudemos ver nos resultados anteriores a presença de espículas nas simulações fornece perfís de brilho semelhantes aos observados nas regiões do equador solar e também nas regiões próximas à 45° de latitude heliocêntrica. Porém, as regiões próximas aos pólos do Sol teriam valores mais compatíveis com o resultado fornecido por uma atmosfera sem a presença de espículas, uma vez que a presença de pequenos pontos brilhantes nos pólos dos mapas elevam o valor do abrilhantamento medido. Sabemos por observações em H α , que não existem espículas sobre as chamadas plages (Zirin 1988), que são observadas sobre o disco do Sol. Um fenômeno fotosférico similar às plages são as fáculas, que também ocorrem nos pólos porém em uma escala de tamanho menor. Alguns autores sugerem uma correlação entre a região onde as fáculas polares são observadas e o aparecimento de regiões de aumento de temperatura de brilho em rádio (RiehoKainen et al. 1998 e Gelfreikh et al. 2002). Com base neste fenômeno resolvemos fazer simulações com regiões sem a presença de espículas, próximas aos pólos. Os resultados destas simulações são mostrados na Tabela 3.5 e nos gráficos da Figura 3.16. Todas as simulações presentes na Tabela foram feitas com

espículas de 500 km de largura, temperatura de 7000 à 13000 K e densidade variando de $2 - 6 \times 10^{10}$ partículas/cm³.

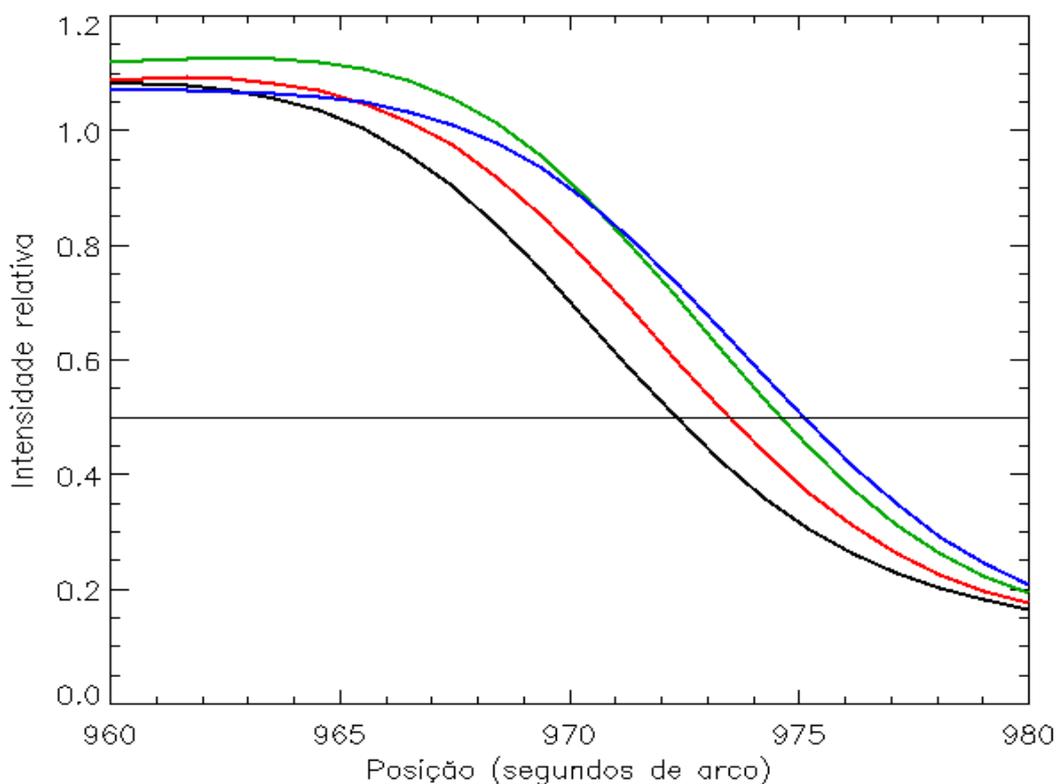


FIGURA 3.15 - Variação do raio solar em relação à variação na altura das espículas. As cores representam simulações da Tabela 3.4 com as mesmas cores.

As três primeiras simulações da Tabela 3.5 possuem intervalos de $\sim 5^\circ$ de ângulos heliográficos com diferentes distâncias ao pólo, isto é, regiões sem espículas de mesma área e aproximadamente iguais. Estas, mostram que a intensidade máxima do abrilhantamento de limbo aumenta quanto maior for a proximidade da região sem espículas em relação ao limbo, enquanto sua largura comporta-se de modo inverso e diminui com a proximidade da região ao limbo. Isto pode ser explicado pela curvatura da superfície solar e pelo efeito de projeção sofrido por uma região próximo ao limbo

do Sol, o que faz com que regiões pequenas sem espículas e muito próximas ao limbo não sejam observadas.

TABELA 3.5 - Simulações estudando o efeito de regiões sem espículas.

| <i>Dados das Espículas</i> | | <i>Região sem Espículas</i> | <i>Resultados</i> | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Fig. | Altura (10 ³ km) | Intervalo de latitude heliográfica | Sol Calmo (K) | Abrilh. (%) | Largura (arcsec) | Raio (arcsec) |
| 5.16a | 5-7 | 76,2 - 81,4 | 10715±124 | 21.4 | 55.4 | 972.4 |
| 5.16b | 5-7 | 78,5 - 83,7 | 10669±101 | 26.3 | 39.2 | 972.5 |
| 5.16c | 5-7 | 80,2 - 85,5 | 10700±121 | 30 | 17.4 | 972.4 |
| 5.16d | 5-7 | 80,2 - 90 | 10744±96 | 40 | 14.5 | 972.5 |
| 5.16e | 5-10 | 80,2 - 90 | 10800±96 | 39.4 | 19.4 | 975.1 |

As duas últimas simulações foram feitas em uma região quase duas vezes maior que as anteriores, onde a altura das espículas é o único parâmetro que diferencia as duas simulações. Estas simulações renderam abrlhantamentos extremamente finos e intensos. Os valores máximos destes abrlhantamentos atingiram ~40 % e são maiores que o abrlhantamento medido na atmosfera sem espículas (36 %). Isto pode ser explicado pelo fato das espículas que estão além de 90° (atrás do limbo) emitirem mais do que a atmosfera substituída por elas e não terem esta emissão muito absorvida pela atmosfera tênue a sua frente, visto que todas as espículas usadas nas simulações são opticamente espessas em 17 GHz. As diferenças mais importantes entre as duas simulações foram os aumentos tanto da largura do abrlhantamento do limbo quanto do raio. Isto confirma os resultados anteriores de que a altura das espículas é um fator mais determinante para o aumento ou redução do raio solar do que para o abrlhantamento do limbo observado, uma vez que as diferenças entre os raios medidos nas quatro primeiras simulações não ultrapassam 0,1 segundos de arco.

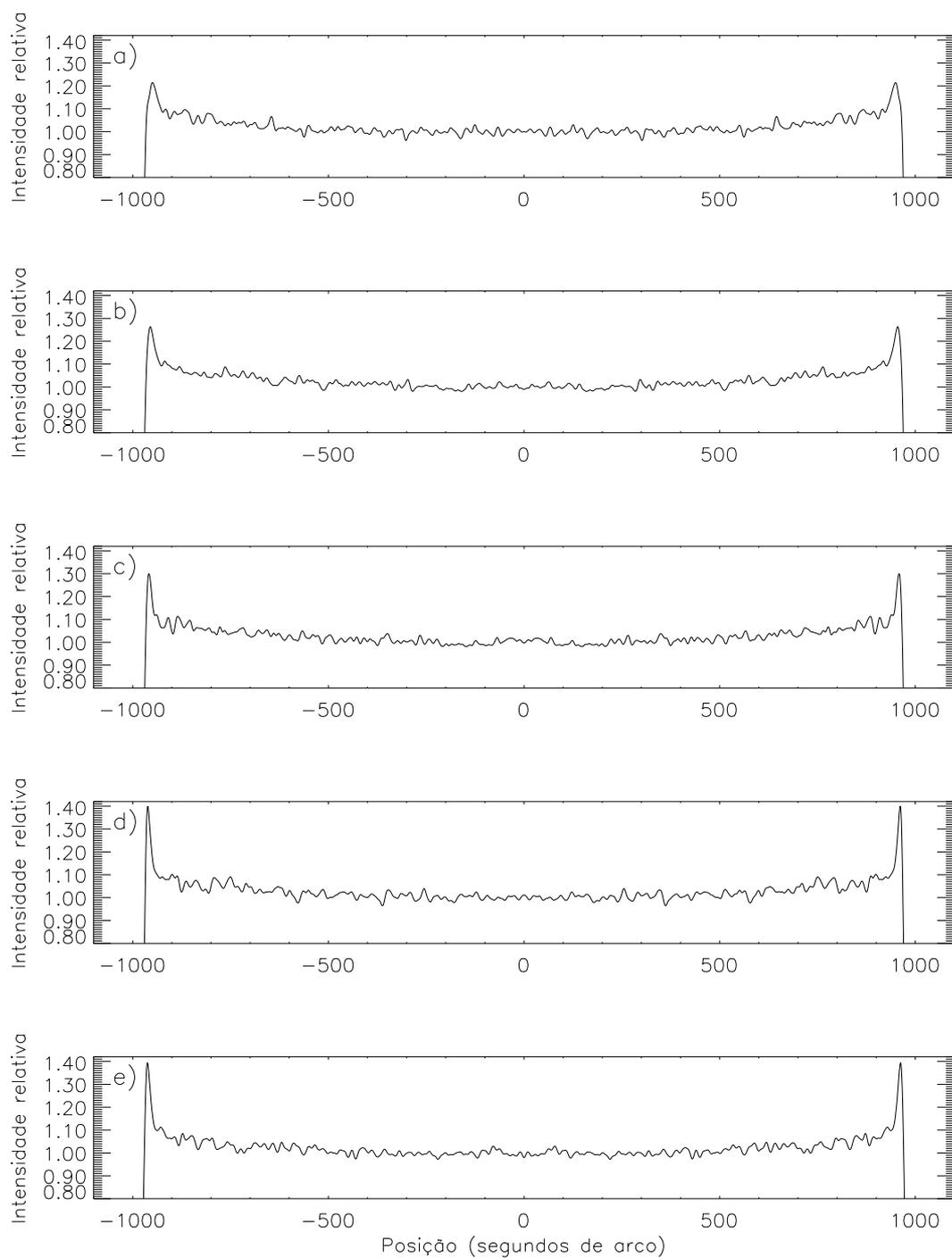


FIGURA 3.16 - Variação do abrillhantamento de limbo devido à presença de regiões sem espículas

Os valores do abrilhantamento para uma atmosfera sem espículas são compatíveis com os valores medidos nos pólos do Sol em 17 GHz, enquanto suas larguras são menores que a média temporal obtida na análise de dados (66 ± 16 segundos de arco). Esta largura menor pode ser explicada pelo fato das medidas terem sido obtidas através de uma média de cortes feitos apenas nos pólos, e estes são visivelmente dominados por pontos brilhantes bastante intensos, porém distribuídos de maneira não uniforme nas proximidades do limbo. Assim os pontos mais internos contribuem para um alargamento do abrilhantamento médio medido.

A variação dos resultados obtidos para simulações com espículas com os mesmos parâmetros mostrou que a incerteza em relação à temperatura de brilho do centro do disco solar foi de $\sim 1,5\%$. Em relação ao abrilhantamento do limbo esta incerteza foi de 3% , enquanto o raio solar medido teve uma variação de apenas $0,2$ segundos de arco. No entanto, os resultados também mostram que a largura do abrilhantamento sofre uma grande variação, mostrando que o abrilhantamento com uma subida exponencial vista nos dados observacionais é reflexo da média dos cortes radiais feitos na imagem. Como foi discutido acima, as regiões polares contém pontos de intenso brilho (Figura 3.16), que como vemos nos resultados das simulações são bem melhor definidos.

CAPÍTULO 4

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Como foi visto na parte de análise dos dados, o brilho do limbo em 17 GHz não está distribuído uniformemente ao redor do limbo, sendo mais intenso nos pólos, região onde podemos ver nos mapas do período de mínima atividade solar diversos pontos onde ocorrem aumentos de temperatura. Rieho et al. 1998 e Gelfreikh et al. 2002 sugerem que este fenômeno seja reflexo da presença de fáculas polares na região.

Outro fato observado foi a correlação na região polar entre a distribuição do brilho do limbo e um aumento da emissão média em mapas H α . Esta frequência mostra a cromosfera solar e mostra a presença de várias estruturas solares da região. Entre estas estruturas estão as espículas, que são descritas por vários autores (Simon e Zirin 1969, Fürst et al. 1974, Elzner 1976, Marsh et al. 1981, Wannier et al 1983) como os principais agentes da falta ou do pequeno brilho em algumas observações em rádio frequências.

Também foi estudada a variação temporal do brilho médio nos pólos do Sol ($\pm 60^\circ$ de latitude heliográfica). O resultado deste estudo mostrou que o brilho do limbo está fortemente anticorrelacionado com o número de manchas solares. Em contrapartida, existe uma visível correlação com o número médio mensal de fáculas polares, o que fortalece a suposição de interligação entre os dois fenômenos.

Com relação ao estudo do raio solar em 17 GHz, comprovamos que este está correlacionado com o ciclo de atividade solar, sendo ~ 976 " seu valor médio à uma unidade astronômica. Sua distribuição ao redor do limbo mostra que o raio da região polar não sofre grandes variações entre o mínimo e máximo do ciclo solar, enquanto a

região equatorial se mostra bastante dependente. O raio equatorial aumenta seu valor médio nas proximidades do máximo solar, indicando que estas regiões são as principais responsáveis pelo aumento do raio solar com o decorrer do ciclo.

Com base nas medidas do abrilhantamento do limbo, do raio solar e das temperaturas de brilho observadas, criamos um modelo de atmosfera solar baseado em modelos propostos na literatura (Fontenla et al. 1993, Gabriel 1992 e Zirin 1988 e Zirin et al 1991), com o intuito de estudar a variação centro-limbo da temperatura de brilho do Sol e também as medidas do raio solar. Inicialmente sem a presença das espículas. Este estudo teve os seguintes resultados:

- Excelente ajuste com as medidas de temperaturas de brilho propostas na literatura. Em 17 GHz seu valor foi de 10392 K, que é compatível com os valores usados atualmente;

- Abrilhantamento de 36 %, após convolução do resultado com uma gaussiana de HPBW=10". Este resultado é próximo dos valores máximos obtidos nos pólos do Sol (~40%), porém é muito maior que os resultados obtidos para a região do equador (~15%) e regiões intermediárias (~10%);

- O raio solar medido foi de ~970 segundos de arco, o que representa 6" abaixo da média obtida;

Com base nestes resultados optamos por estudar uma atmosfera com a distribuição de espículas. Neste estudo foi utilizado o método Monte Carlo para atribuir valores das propriedades físicas das espículas (altura, inclinação, temperatura, densidade), sendo que a largura foi o único parâmetro fixo em todas as simulações.

Os resultados da distribuição da temperatura de brilho do centro ao limbo do Sol mostraram que:

- para espículas com mesma densidade, a temperatura do centro do disco solar e o abrilhantamento de limbo aumentam com o aumento da temperatura da espícula;
- para espículas com mesma temperatura, a temperatura do centro do disco solar e o abrilhantamento de limbo aumentam até uma densidade de 4×10^{10} partículas/cm³, após este valor as duas medidas começam a diminuir;
- o raio solar em 17 GHz é determinado pela altura das espículas, aumentando com o aumento da altura destas;
- o abrilhantamento medido mostrou-se compatível com as observações da região do equador e regiões intermediárias, tendo um valor aproximado de 12%, para espículas com quatro parâmetros variando aleatoriamente. Um exemplo comparando um dado observacional com uma simulação é mostrado na Figura 4.1.

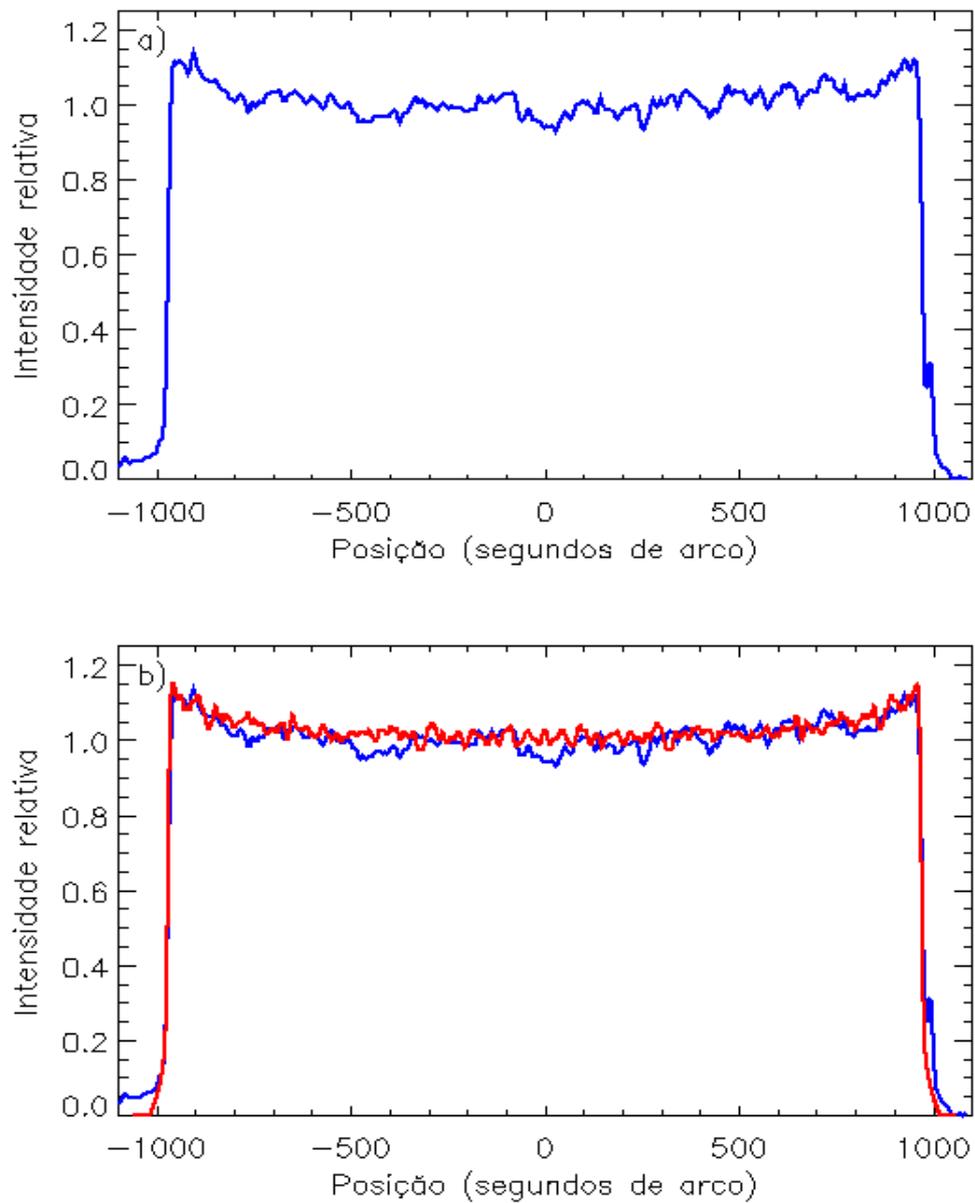


FIGURA 4.1 - Comparação entre o dado observacional na região equatorial (azul nos gráficos “a” e “b”) e uma simulação com espículas distribuídas sobre a superfície do Sol (vermelho no gráfico “b”).

Devido a ligação entre as regiões polares com aumento de brilho em 17 GHz e a presença de fáculas e supondo que estas, assim como plages funcionam como inibidores de espículas, foram feitas simulações contendo regiões fixas sem a presença de espículas. Os resultados mostraram que:

- para uma região sem espículas, o abrilhantamento aumenta a medida que esta se aproxima do limbo. Entretanto esta região tem que se estender para dentro do disco o suficiente para não ser obscurecida pelo efeito de projeção próximo ao limbo solar ou pela presença de espículas ao seu redor;
- uma grande região sem espículas, tendo sua extremidade superior em 90° (pólo) de latitude resultaria num abrilhantamento maior do que o medido na atmosfera sem a presença de espículas. Isto se deve ao fato de espículas situadas além de 90° (atrás do limbo) e acima de ~ 3500 km na atmosfera emitirem mais do que a atmosfera local, que é opticamente fina em 17 GHz;
- os abrilhantamentos observados nestas simulações são compatíveis com os observados nos pólos do Sol, como pode ser observado na Figura 4.2.

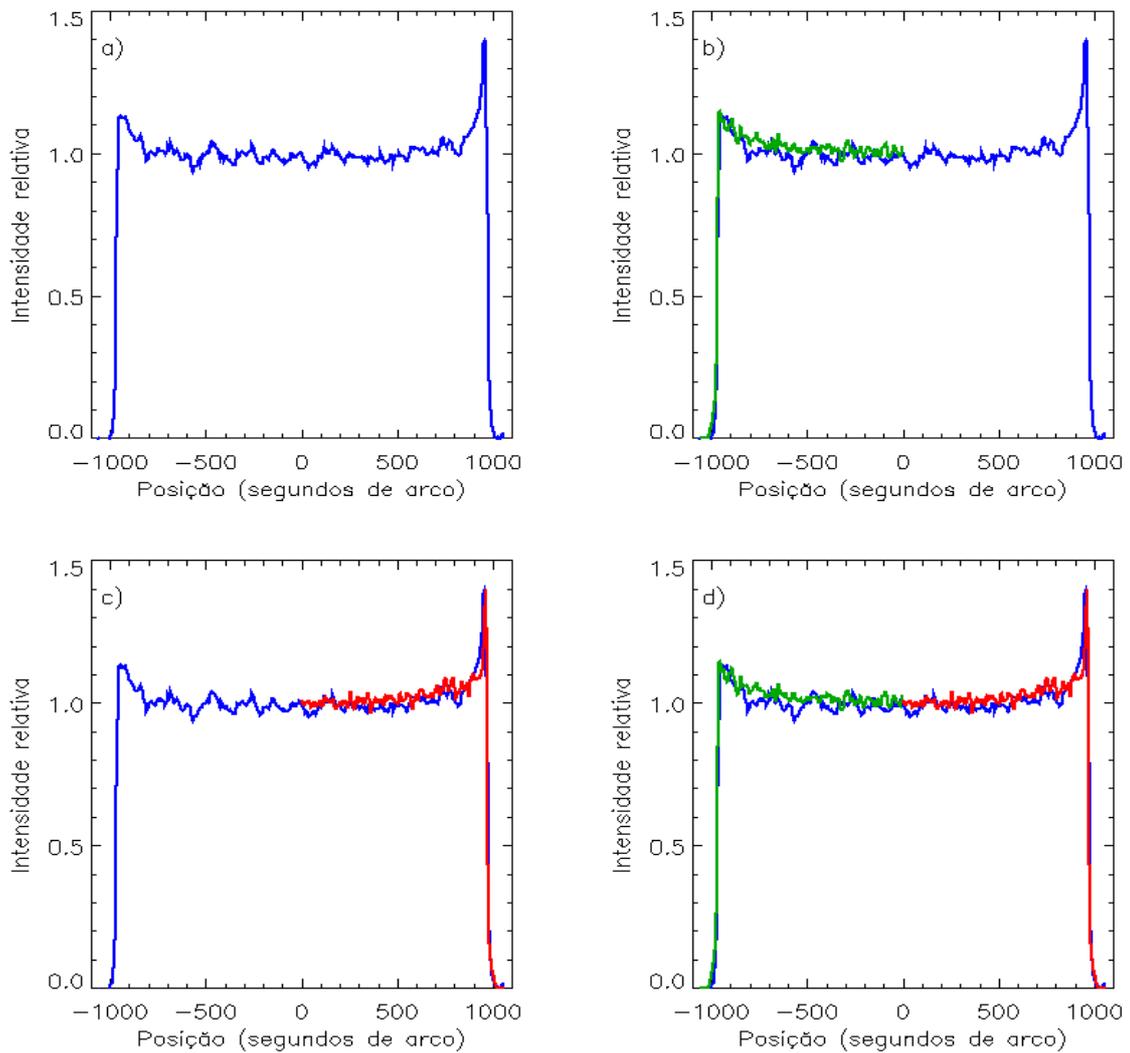


FIGURA 4.2 - Comparação entre o dado observacional na região polar (azul em todos os gráficos) e duas simulações, uma com região sem a presença de espículas no pólo (vermelho nos gráficos “c” e “d”) e a outra não (verde nos gráficos “b” e “d”).

Ao fim de todas as simulações concluímos que o abrilhantamento de limbo e o raio solar em 17 GHz são bem modelados por uma atmosfera com a presença de espículas e com algumas regiões polares sem sua presença. Os melhores valores para as

características físicas das espículas são:

- altura variando de 5000 a 10000 km, devido às medidas do raio solar;
- largura podendo variar entre 500 e 1100 km, pois sua influência não é muito acentuada;
- temperatura entre 7000 e 13000 K, para que a temperatura de brilho central e o abrilhantamentos sejam compatíveis com as observações;
- densidades de elétrons e íons variando de $2-6 \times 10^{10}$ partículas/cm³, pois densidades fora deste intervalo trariam uma grande redução na temperatura de brilho do centro do disco e no abrilhantamento de limbo.

Por fim, concluímos que o modelo atmosférico com a inclusão de espículas proposto aqui se ajusta muito bem às medidas do abrilhantamento do limbo, raio solar e temperatura de brilho do centro do disco solar feitas em 17 GHz. É nosso objetivo aplicar este modelo, com sucesso, à outros comprimentos de onda, inclusive no submilimétrico onde o CRAAM desenvolve um trabalho pioneiro em 212 e 405 GHz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajmanova, G. K.; Ajmanov, A. K.; Guliaev, R. A. Study of the brightness distribution across spicules from observations of the spicule occultation by the moon at the partial solar eclipse. **Solar Physics**, v. 79, n. 2, p. 323-326, Aug. 1982.
- Bastian, T. S.; Dulk, G. A.; Leblanc, Y. High-Resolution Microwave Observations of the Quiet Solar Chromosphere. **The Astrophysical Journal**, v. 473, n. 1, p. 539-549, Dez. 1996.
- Bastian, T. S.; Ewell, M. W.; Zirin, H. The center-to-limb brightness variation of the sun at $\lambda = 850$ microns. **The Astrophysical Journal**, v. 415, n.1, p. 364-375, Set. 1993.
- Beckers, J. M. Solar Spicules. **Solar Physics**, v. 3, n. 3, p. 367-433, 1968.
- Beckers, J. M. Solar Spicules. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics.**, v. 10, p. 73-100, 1972.
- Beckman, J. E.; Clark, C. D.; Ross, J. Studies of the solar chromosphere from millimetre and sub-millimetre observations. **Solar Physics**, v. 31, n. 2, p. 319-338, 1973.
- Belkora, L.; Hurford, G. J.; Gary, D. E.; Woody, D. P. Measurement of the solar limb brightness profile at 3 millimeters during the total eclipse of 1991 July 11. **The Astrophysical Journal**, v. 400, n. 2, p. 692-698, Dez. 1992.
- Braun, D.; Lindsey, C. A solar chromosphere and spicule model based on far-infrared limb observations. **The Astrophysical Journal**, v. 320, n. 2, p. 898-903, Set. 1987.
- Bray, R. J.; Loughhead, R. E. **The solar chromosphere**, London: Chapman and Hall, 1974.
- Chapman, G. A.; Cookson, A. M.; Dobias, J. J. Solar variability and the relation of facular to sunspot areas during solar cycle 22. **The Astrophysical Journal**, v. 482, n. 1, p. 541-545, June 1997.
- Cheng, Q. Fluid motions in the solar atmosphere. I - On the origin and decay of spicules. II - A spicule model with emission lines. **Astromomy and Astrophysics**, v. 266, n. 1, p. 537-559, Dez. 1992.

- Coates, R. J. A Model of the Chromosphere from Millimeter Wave-Length Observations. **The Astrophysical Journal**, v. 128, n. 1, p. 83-91, July 1958.
- Costa, J. E. R.; Silva, A. V. R.; Makhmutov, V. S.; Rolli, E.; Kaufmann, P.; Magun, A. Solar Radius Variations at 48 GHz Correlated with Solar Irradiance. **The Astrophysical Journal**, v. 520, n. 1, p. L63-L66, July 1999.
- Delache, Ph.; Gavryusev, V.; Gavryuseva, E.; Laclare, F.; Régulo, C.; Roca Cortés, T. Time correlation between solar structural parameters: p -mode frequencies, radius, and neutrino flux. **The Astrophysical Journal**, v. 407, n. 2, p. 801-805, Apr. 1993.
- Efanov, V. A.; Moiseev, I. G.; Nesterov, N. S.; Stewart, R. T. Radio emission of the solar polar regions at millimeter wavelengths. In: Kundu, M. R.; Gergely, T. E. eds. **Radio physics of the Sun (IAU Symposia 86)**. College Park, MD, USA: Reidel, Dordrecht, 1980. p. 141-145.
- Elzner, L. R. The center-to-limb variation of optically thin UV-lines and at centimetric wavelengths and the influence of spicules. **Astromomy and Astrophysics**, v. 47, n. 1, p. 9-18, Fev. 1976.
- Emilio, M.; Kuhn, J. R.; Bush, R. I.; Scherrer, P. On the constancy of the solar diameter. **The Astrophysical Journal**, v. 543, n. 2, p. 1007-1010, Nov. 2000.
- Erofeev, D. V. Latitudinal Distribution of Polar Faculae. **Solar Physics**, v. 203, n. 1, p. 9-25, Out. 2001.
- Ewell, M. W. Jr; Zirin, H.; Jensen, J. B.; Bastian, T. S. Submillimeter observations of the 1991 July 11 total solar eclipse. **The Astrophysical Journal**, v. 403, n. 1, p. 426-433, Jan. 1993.
- Fontenla, J. M.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Energy balance in the solar transition region. I - Hydrostatic thermal models with ambipolar diffusion. **The Astrophysical Journal**, v. 355, n. 2, p. 700-718, June 1990.
- Fontenla, J. M.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Energy balance in the solar transition region. II - Effects of pressure and energy input on hydrostatic models. **The Astrophysical Journal**, v. 377, n. 2, p. 712-725, Aug. 1991.

- Fontenla, J. M.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Energy balance in the solar transition region. III - Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion. **The Astrophysical Journal**, v. 406, n. 1, p. 319-345, Mar. 1993.
- Fürst, E.; Hachenberg, O.; Hirth, W. The centre-to-limb variation of the sun at centimetric wavelengths. **Astronomy and Astrophysics**, v. 36, n. 1, p. 123-133, Nov. 1974.
- Fürst, E.; Hirth, W.; Lantos, P. The radius of the sun at centimeter waves and the brightness distribution across the disk. **Solar Physics**, v. 63, n. 1, p. 257-270, Set. 1979.
- Gabriel, A. H. The Solar Corona. In: Schmelz, J. T.; Brown, J. C. eds. **The Sun, a laboratory for astrophysics**. Crieff, Scotland: Kluwer Academic , 1992. p. 277-296.
- Gelfreikh, G. B.; Makarov, V. I.; Tlatov, A. G.; Riehkainen, A.; Shibasaki, K. A study of the development of global solar activity in the 23rd solar cycle based on radio observations with the Nobeyama radio heliograph. I. Latitude distribution of the active and dark regions. **Astronomy and Astrophysics**, v. 389, n. 2, p. 618-623, July 2002.
- Gilliland, R. L. Solar radius variations over the past 265 years. **The Astrophysical Journal**, v. 248, n. 3, p. 1144-1155, Set. 1981.
- Gingerich, O.; Noyes, R. W.; Kalkofen, W.; Cuny, Y. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. **Solar Physics**, v. 18, n. 3, p. 347-365, 1971.
- Gómez-González, J.; Barcia, A.; Delgado, A.; Planesas, P. Solar limb brightening measurements at 3.4 MM wavelength. **Astronomy and Astrophysics**, n. 1-2, v. 122, p. 219-224, Jun. 1983.
- Heirstchi, D.; Mouradian, Z. On the inclination and the axial velocity of spicules. **Solar Physics**, v. 142, n. 1, p. 21-34, Nov. 1992.
- Horne, K.; Hurord, G. J.; Zirin, H.; de Graauw, Th. Solar limb brightening at 1.3 millimeters. **The Astrophysical Journal**, v. 244, n. 1, p. 340-344, Fev. 1981.

- Janssens, J.; Dubois, F. **Franky Dubois' Sun Page**. [online]. <<http://www.digilife.be/club/franky.dubois/join%20us.htm>>. Jan. 2003.
- Joensen, P.; McCutcheon, W. H.; Shuter, W. L. H. A method for investigating the brightness distribution near the solar limb at millimeter wavelengths. **Solar Physics**, v. 39, n. 2, p. 309-314, Dez. 1974.
- Kawabata, K.; Fujishita, M.; Kato, T.; Ogawa, H.; Omodaka, T. Solar brightness distribution at 8.6 MM from interferometer observations. **Solar Physics**, v. 65, n. 1, p. 221-227, Mar. 1980.
- Kosugi, T.; Ishiguro, M.; Shibasaki, K. Polar-cap and coronal-hole-associated brightenings of the sun at millimeter wavelengths. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 38, n. 1, p. 1-11, 1986.
- Kundu, M. R.; Liu, S.-Y.; McCullough, T. P. Brightness distributions of the sun at 33 and 37 GHz. **Solar Physics**, v. 51, n. 2, p. 321-325, Mar. 1977.
- Kuseski, R. A.; Swanson, P. N. The solar brightness temperature at millimeter wavelengths. **Solar Physics**, v. 48, n. 1, p. 41-48, May 1976.
- Laclare, F.; Delmas, C.; Coin, P.; Irbah, A. Measurements and variations of the solar diameter. **Solar Physics**, v. 166, n. 2, p. 211-229, July 1996.
- Lindsey, C.; de Graauw, T.; de Vries, C.; Lidholm, S. Solar limb brightening at 820 microns. **The Astrophysical Journal**, v. 277, n. 1, p. 424-428, Fev. 1984.
- Lindsey, C.; Hildebrand, R. H.; Keene, J. K.; Whitcomb, S. E. Solar limb brightening at 350 microns. **The Astrophysical Journal**, v. 248, n. 2, p. 830-835, Set. 1981.
- Lindsey, C.; Kopp, G.; Clark, T. A.; Watt, G. The Sun in Submillimeter and Near-Millimeter Radiation. **The Astrophysical Journal**, v. 453, n. 1, p. 511-516, Nov. 1995.
- Linsky, J. L. A recalibration of the quiet Sun millimeter spectrum based on the moon as an absolute radiometric standard. **Solar Physics**, v. 28, n. 2, p. 409-418, 1973.
- Lynch, D. K.; Beckers, J. M.; Dunn, R. B. A Morphological Study of Solar Spicules. **Solar Physics**, v. 30, n. 1, p. 63-70, 1973.

- Marsh, K. A.; Hurford; G. J.; Zirin, H. High resolution interferometric observations of the solar limb at 4.9 and 10.7 GHz during the solar eclipse of October, 1977. **Astronomy and Astrophysics**, v. 94, n. 1, p. 67-71, Jan. 1981.
- Mosher, J. M.; Pope, T. P. A statistical study of spicule inclinations. **Solar Physics**, v. 53, n. 2, p. 375-384, Aug. 1977.
- Nishikawa, T. Spicule observations with high spatial resolution. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 40, n. 5, p. 613-625, 1988.
- Parker, E. N. Heating solar coronal holes. **The Astrophysical Journal**, v. 372, p. 719-727, May 1991.
- Pataraya, A. D.; Taktakishvili, A. L.; Chargeishvili, B. B. The formation of spicules in the course of the chromospheric network magnetic field reconnection. **Solar Physics**, v. 128, n. 2, p. 333-344, Aug. 1990.
- Pohjolainen, S. On the origin of polar radio brightenings at short millimeter wavelengths. **Astronomy and Astrophysics**, v. 361, n. 1, p. 349-358, Set. 2000.
- Reber, E. E. Brightness temperatures of the quiet sun and new moon at the 6 mm wavelength. **Solar Physics**, v. 16, n. 1, p. 75-86, 1971.
- Riehoainen, A.; Urpo, S.; Valtaoja, E. Enhanced temperature regions in the polar zones of the Sun. **Astronomy and Astrophysics**, v. 333, p. 741-745, May 1998.
- Riehoainen, A.; Urpo, S.; Valtaoja, E.; Makarov, V. I.; Makarova, L. V.; Tlatov, A. G. Millimeter-radio, SOHO/EIT 171 Å features and the polar faculae in the polar zones of the Sun. **Astronomy and Astrophysics**, v. 366, n. 2, p. 676-685, Fev. 2001.
- Roellig, T. L.; Becklin, E. E.; Jefferies, J. T.; Kopp, G. A.; Lindsey, C. A.; Orrall, F. Q.; Werner, M. W. Submillimeter solar limb profiles determined from observations of the total solar eclipse of 1988 March 18. **The Astrophysical Journal**, v.381, n. 1, p. 288-294, Nov. 1991.
- Rozelot, J. P. The correlation between the calern solar diameter measurements and solar irradiance. **Solar Physics**, v. 177, n. 1-2, p. 321-327, Jan. 1998.

- Saito, T.; Kudoh, T.; Shibata K. What Determines the Height of Spicules? I. Alfvén-Wave Model and Slow-Wave Model. **The Astrophysical Journal**, v. 554, n. 2, p. 1151-1158, Jun. 2001.
- Seal, A.; Seal, C. **Anthony and Christopher Seal's Astronomy Web Site**. [online]. <<http://www.acseal.freemove.co.uk/solar.htm>>. Jan. 2003.
- Selhorst, C. L.; Silva, A. V. R.; Costa, J. E. R.; Shibasaki, K. Temporal and angular variation of the solar limb brightening at 17 GHz. **Astronomy and Astrophysics**, v. 401, n. 3, p. 1143-1150, Apr. 2003.
- Shibasaki, K. Radio synoptic maps and polar cap brightening. In: **Synoptic Solar Physics**, ASP Conference Series. Balasubramaniam, K. S.; Harvey, J.; Rabin, D. eds. Sacramento Peak, USA: ASP, 1998. v.140, p. 373-381.
- Shimabukuro, F. I.; Wilson, W. J.; Mori, T.T.; Smith, P. L. 3.3 millimeter limb brightening measurements during the 30 June 1973 total solar eclipse. **Solar Physics**, v. 40, n. 2, p. 359-370, Feb. 1975.
- Simon, M.; Zirin, H. The coarse structure of the solar atmosphere. **Solar Physics**, v. 9, n. 2, p. 317-327, 1969.
- Steiniger, M.; Brandt, P. N.; Haupt, H. F. Sunspot irradiance deficit, facular excess, and the energy balance of solar active regions. **Astronomy and Astrophysics**, v. 310, n. 2, p. 635-645, June 1996.
- Sterling, A. C. Solar Spicules: A Review of Recent Models and Targets for Future Observations. **Solar Physics**, v. 196, n. 1, p. 79-111, Set. 2000.
- Ulrich, R. K.; Bertello, L. Solar cycle dependence of the Sun's radius at $\lambda=525.0\text{nm}$. **Nature**, v. 377, n. 6546, p. 214-216, Set. 1995.
- Vernazza, J. E.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Structure of the Solar Chromosphere. Basic Computations and Summary of the Results. **The Astrophysical Journal**, v. 184, n. 2, p. 605-632, Set. 1973.
- Vernazza, J. E.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Structure of the solar chromosphere. II - The underlying photosphere and temperature-minimum region. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 30, n. 1, p. 1-60, Jan. 1976.

- Vernazza, J. E.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 45, n. 3, p. 635-725, Apr. 1981.
- Wannier, P. G.; Hurford, G. J.; Seielstad, G. A. Interferometric observations of solar limb structure at 2.6 millimeters. **The Astrophysical Journal**, v. 264, n. 2, p.660-666, Jan. 1983.
- Wittmann, A. D.; Alge, E.; Bianda, M. Detection of a significant change in the solar diameter. **Solar Physics**, v.145, n. 1, p. 205-206, May 1993.
- Zirin, H. **Astrophysics of the Sun**. New York, EUA: Cambridge University Press, 1988.
- Zirin, H.; Baumert, B. M.; Hurford, G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet sun. **The Astrophysical Journal**, v. 370, n. 2, p. 779-783, Apr. 1991.
- Zirin, H. The mystery of the chromosphere. **Solar Physics**, v. 169, n. 2, p. 313- 326, Dez. 1996.