

## **Síntese Espectral Estelar em Alta Resolução: Carbono e Nitrogênio em Estrelas de Tipo Solar**

Livia de Souza Ribeiro<sup>1</sup> (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)  
Dr. André de Castro Milone<sup>2</sup> (DAS/CEA/INPE)

### **RESUMO**

A distribuição da abundância química por entre as estrelas de tipo solar da vizinhança solar não está bem estabelecida, especialmente dos elementos do grupo CNO por diversas razões. As abundâncias fotosféricas do Carbono e Nitrogênio de uma amostra de nove estrelas são determinadas, no presente estudo, utilizando-se da síntese espectral de bandas moleculares do C<sub>2</sub> e CN e de linhas atômicas do C I e N I, aplicada por meio de um método diferencial tendo como referência o próprio Sol. Resultados secundários desse trabalho são velocidades de rotação estelar. Os espectros de alta resolução ( $R=47.000$ ) e elevada razão sinal-ruído ( $250 \leq S/N \leq 450$ ), incluindo o solar de referência, foram obtidos com o espectrógrafo *Échelle* FEROS instalado no telescópio 1,52m do *European Southern Observatory*. Utilizamos o código de síntese espectral MOOG, os modelos de atmosfera MARCS, as listas de linhas moleculares de Kurucz e atômicas do *Vienna Atomic Lines Database*. Os parâmetros fotosféricos bem como as abundâncias de outros elementos químicos foram determinadas por outros trabalhos, em sua maioria de forma homogênea.

<sup>1</sup> Estudante do Curso de Física (licenciatura), UNITAU. E-mail: livia@das.inpe.br

<sup>2</sup> Pesquisador da Divisão de Astrofísica, Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas. E-mail: milone@das.inpe.br



**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-11570-PRE/6956**

**SÍNTESE ESPECTRAL ESTELAR EM ALTA E BAIXA  
RESOLUÇÃO**

Lívia de Souza Ribeiro

**Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

INPE  
São José dos Campos  
2004



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **SÍNTESE ESPECTRAL ESTELAR EM ALTA E BAIXA RESOLUÇÃO**

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

Livia de Souza Ribeiro (INPE, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [livia@das.inpe.br](mailto:livia@das.inpe.br)

Dr. André de Castro Milone (CEA/DAS/INPE, Orientador)  
E-mail: [milone@das.inpe.br](mailto:milone@das.inpe.br)

#### **COLABORADOR**

Dr. Gustavo Frederico Porto de Melo (UFRJ)

Maio de 2004

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2 – ESPECTROSCOPIA.....	2
2.1 – Radiação Eletromagnética .....	2
2.2 – Espectro Eletromagnético .....	2
2.3 – Efeito Doppler .....	3
2.4 – Perfil da Linha .....	3
2.5 – Espectroscopia Estelar .....	4
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
3.1 – Plano de Estudos .....	5
3.2 – Amostra .....	5
3.3 – Reduções .....	6
3.4 – Síntese Espectral .....	7
3.5 – Parâmetros para Síntese Espectral .....	8
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	9
4.1 – Reprodução de Espectro Solar .....	9
CAPÍTULO 5 – COMENTÁRIOS .....	12
5.1 – Trabalhos Futuros .....	12
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Importantes propriedades físicas e dinâmicas de estrelas, do meio interestelar e de galáxias são determinadas a partir de técnicas espectroscópicas de baixa e alta resolução.

A relação de intensidade das linhas de emissão, a forma do contínuo e das linhas de absorção permitem determinar temperaturas, densidades e abundâncias químicas de estrelas. Pela estrutura e deslocamento das linhas espectrais tem-se informação sobre rotação, expansão e velocidades de recessão do sistema observado. Todas estas propriedades estão relacionadas com as condições de formação e a evolução dos objetos celestes.

A detecção de elementos químicos no meio interestelar pode ser feita através da observação das linhas ou bandas moleculares presentes nos espectros ópticos de estrelas, cuja luz atravessa o meio interestelar.

A distribuição da composição química de elementos leves, especialmente do grupo CNO, por entre as estrelas de tipo solar da vizinhança solar, não está bem estabelecida.

Assim, este trabalho tem por objetivo, investigar e determinar as abundâncias fotosféricas do Carbono e do Nitrogênio, por meio da síntese espectral de bandas eletrônico-vibracionais moleculares do  $C_2$  e CN proeminentes na região óptica, aplicando-se um método diferencial tendo como referência o próprio sol, para uma amostra inicial de 9 estrelas de tipo solar da vizinhança solar.

## CAPÍTULO 2 - ESPECTROSCOPIA

### 2.1 – RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A maior parte da informação existente sobre o Universo, chega em forma de radiação eletromagnética. Esse tipo de radiação é uma forma de energia que se propaga com a combinação de campos elétricos e magnéticos oscilantes através de um meio material ou mesmo no vácuo, com velocidade constante ( $c = 299.792,458 \text{ km/s}$ ).

O sistema Terra-Atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria radiação para o espaço. A maior parte da radiação eletromagnética (EM) emitida pelos astros não consegue chegar até o solo, sendo absorvida e/ou espalhada por partículas nas diversas camadas da atmosfera terrestre. A parte visível sofre uma atenuação menor.

### 2.2 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

As várias energias da radiação EM, caracterizada pelo seu comprimento de onda, compõem o espectro eletromagnético.

Na parte visível, esses comprimentos de onda vão do vermelho ao violeta.

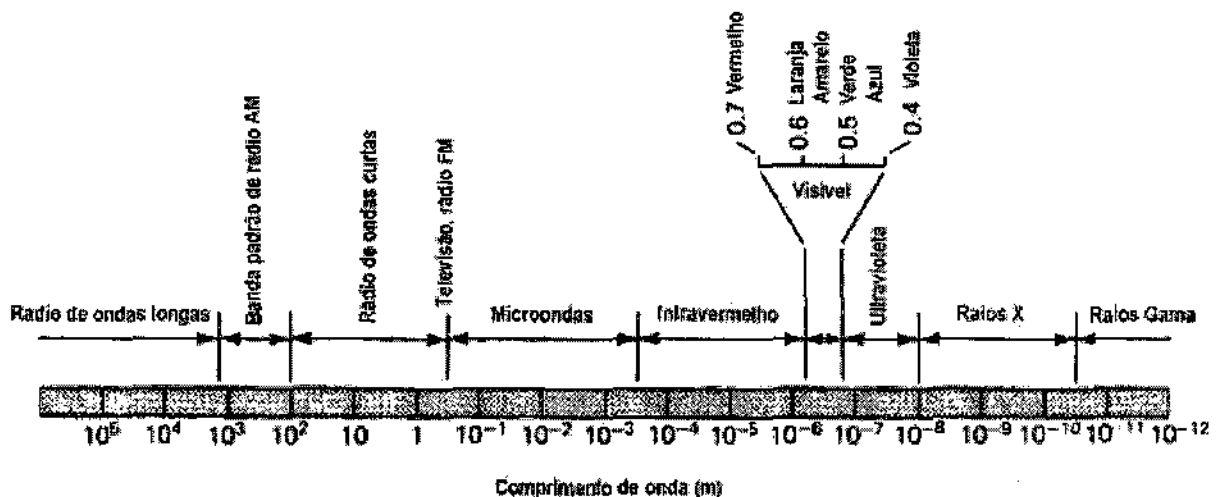


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético

Os espectros emitidos pelos corpos podem ser de diferentes tipos: o espectro contínuo, espectro de linhas de emissão e o espectro de linhas de absorção.

Um corpo opaco quente em equilíbrio termodinâmico emite um espectro contínuo, um gás transparente produz um espectro de linhas de emissão (linhas brilhantes), já se um espectro contínuo passar por um gás a temperatura mais baixa, teremos o espectro de linhas de absorção, onde o gás frio causa a presença de linhas escuras.

É importante notar que as linhas escuras, não significam ausência de luz, somente um contraste de menos luz.

Cada linha escura no espectro de uma estrela está associada à presença de um elemento ou composto químico na atmosfera da estrela.

### 2.3 – EFEITO DOPPLER

As ondas eletromagnéticas, em particular a radiação visível, apresentam o efeito Doppler.

Em 1842, Christian Doppler deduziu que, para um corpo luminoso se aproximando (ou se afastando) do observador, o comprimento de onda diminui (aumenta), em relação ao observado em laboratório (em repouso).

### 2.4 – PERFIL DA LINHA

O perfil da linha representa a variação espectral da densidade de fluxo (intensidade com o comprimento de onda). A forma de uma linha espectral é chamada de perfil da linha. A forma da linha reflete as propriedades da atmosfera da estrela: temperatura, pressão, gravidade superficial, densidade de massa e dispersão de velocidades, mas o perfil observado também é alargado pelo instrumento de observação, e isso deve ser analisado.

Podemos o alargamento do perfil calcular com o seguinte conjunto de fórmulas:

$$\sigma^2(\lambda)_{\text{espectro}} = \sigma^2(\lambda)_{\text{turb}} + \sigma^2(\lambda)_{\text{rot}} + \sigma^2(\lambda)_{\text{Int}} \quad 2.1$$

Onde:

$$\sigma^2(\lambda)_{\text{turb}} = \frac{\ln 2 (v_{\text{turb}} \cdot \lambda)^2}{c^2} \quad 2.2$$

$$\sigma^2(\lambda)_{\text{rot}} = \left( \frac{\lambda \cdot V_{\text{seni}}}{c} \right)^2 \quad 2.3$$

$$\sigma^2(\lambda)_{\text{Int}} = \frac{(\text{FWHM}_{\text{inst}})^2}{R} \quad 2.4$$

A composição química da atmosfera de uma estrela pode ser determinada pela análise dos perfis das linhas espectrais presentes.

## 2.5 – ESPECTROSCOPIA ESTELAR

A espectroscopia estelar analisa os espectros das estrelas obtidos com uso de espectrógrafos.

Através do espectro contínuo, podemos obter a temperatura superficial da estrela que o emitiu. As linhas de absorção indicam as substâncias químicas presentes, bem como suas abundâncias e as condições de densidade e pressão da fotosfera (meio absorvedor).



## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – PLANO DE ESTUDOS

Foi programado um plano de estudos abrangendo os seguintes temas pertinentes ao projeto de pesquisa proposto (alguns já estudados e outros em fase de estudos):

Astrofísica observacional, Cap. 2 de INPE (2002).  
Radiação eletromagnética, Cap. 8 de Maciel (1991).  
Estrelas, Cap. 5 de INPE (2002).  
Sol, Cap. 4 (até seção 4.2), de INPE (2002).  
Sol, Cap. 13 (até seção 13.1), de Maciel (1991).  
Atmosferas e Interiores Estelares, Cap. 11 de Maciel (1991).  
Espectros e estruturas atômicas, Cap. 9 de Maciel (1991).  
Instrumentação em Astrofísica, Cap. 10 de Maciel (1991).

### 3.2 - AMOSTRA

Os espectros de estrelas utilizados neste projeto foram obtidos, e cedidos gentilmente pelo Prof. Dr. Gustavo Porto de Mello (UFRJ), no Observatório de Cerro Tololo (CTIO, Chile) e no Observatório Sul Europeu (ESO, Chile), utilizando-se de espectrógrafos échelle no foco coudê, cobrindo as regiões  $\lambda\lambda$  4500 - 6500 Å e  $\lambda\lambda$  4000 - 7500 Å, todos em alta resolução ( $R = 47000$ ). Totalizando 47 espectros de 26 estrelas.

Todos os espectros analisados, já estão corrigidos do efeito Doppler.

A amostra de espectros passou ainda por uma inspeção onde foram selecionados aqueles com razão Sinal-Ruído elevado ( $250 \leq S/R \leq 450$ ).

Deste modo, para o presente trabalho, foram selecionadas 9 estrelas, as quais estão listadas na Tabela 3.1, incluindo o Sol utilizado como referência, onde são apresentados os parâmetros fotosféricos  $T_{\text{méd}}$  (°K), temperatura efetiva média, logaritmo da gravidade superficial, metalicidade [Fe/H] e o coeficiente linear de escurecimento de limbo ( $u$ ) além da razão S/R espectral em  $\lambda\lambda$  5800\_5900 Å.

Estrela	T <sub>méd</sub> (°K)	Log g	[Fe/H]	u	S/R
Sol	5780	4,44	0,00	0,665	555
HR 1006	5706	4,50	-0,21	0,673	320
HR 1532	5818	4,36	+0,09	0,658	387
HR 209	5821	4,45	-0,08	0,665	258
HR 509	5369	4,30	-0,50	0,709	562
HR 6060	5807	4,45	+0,05	0,658	367
HR 695	5903	3,87	+0,03	0,650	250
HR 7373	5583	4,14	+0,39	0,685	250
HR 77	5942	4,48	-0,07	0,648	367
HR 810	6127	4,42	+0,11	0,630	480

Tabela 1 - 3.1

### 3.3 - REDUÇÕES

O processo de redução das imagens foi feito utilizando tarefas do pacote IRAF.

Primeiramente foram selecionados intervalos úteis das imagens, onde houvesse linhas de absorção do C<sub>2</sub> e CN, longe de linhas atômicas e telúricas, que pudessem atrapalhar no cálculo da síntese espectral.

Lista com regiões escolhidas:

λλ 5000-5400 Å para determinar a abundância do Carbono: bandas C<sub>2</sub>(0,0)λ5165Å, C<sub>2</sub>(0,0)λ5135Å, C<sub>2</sub>(1,1)λ5128Å e linhas atômicas CIIλ5052,2 Å e CIIλ5380,3Å.

λλ 5800-5900 Å para determinar V<sub>seni</sub>: usando linhas do FeI isoladas.

λλ 7400-7900 Å para determinar a abundância do Nitrogênio: bandas CN(5,2)λ7452 Å e CN(2,0) λ7874 Å.

λλ 8000-8300 Å para determinar a abundância do Nitrogênio: linha atômica NIλ8216,35Å e banda CN(3,1)λ8067Å.

Em seguida, foram recortados os espectros nos intervalos selecionados e efetuadas médias entre todos os espectros de uma mesma estrela para todas as noites.

Finalmente foi feita a normalização dos espectros para a região λλ 5800-5900 Å. Para isso, com o auxílio do Atlas Solar e Catálogo Solar, foram escolhidos pequenos intervalos ( 0,5 ≤ Δλ ≤ 1,5 Å), que estivessem livres de linhas. Às regiões selecionadas é ajustada uma função (spline de ordem 3), colocando o contínuo aparente no valor unitário.

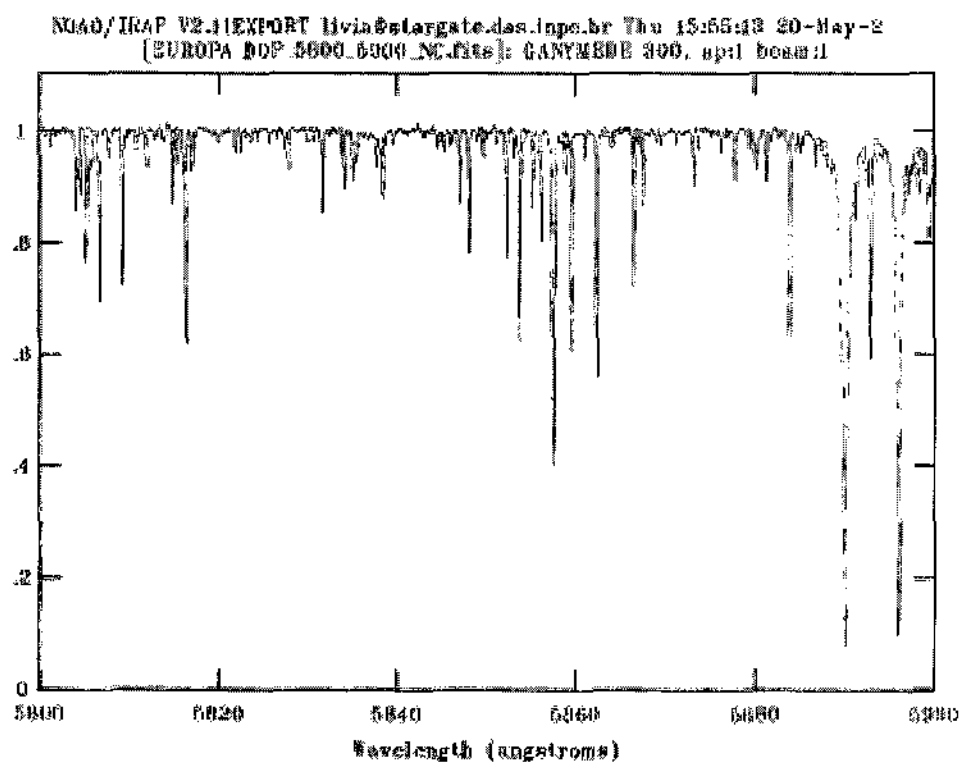


Figura 3.1 – Espectro solar

### 3.4 – SÍNTESE ESPECTRAL

Para o cálculo teórico foi utilizado um programa de síntese espectral chamado MOOG, desenvolvido em FORTRAN por Sneden (2002).

O Programa MOOG resolve o transporte radiativo fotosférico, levando-se em conta as absorções por linhas atômicas e moleculares, fundamentado no Equilíbrio Termodinâmico Local (ETL) em camadas plano-paralelas.

### 3.5 – PARÂMETROS PARA A SÍNTESE ESPECTRAL

Para gerar os espectros teóricos, o programa MOOG necessita de um conjunto confiável de parâmetros de entrada: linhas atômicas e moleculares e um modelo estratificado para a fotosfera estelar representando os perfis superficiais de temperatura, densidade eletrônica e pressão para uma estrela de Tef, gravidade superficial e composição química determinadas.

Os parâmetros de linhas atômicas foram obtidos no banco de dados de Vienna (VALD) e as linhas moleculares de Kurucz (1992).

O espectro sintético necessita ser convoluído, considerando-se o alargamento instrumental, o coeficiente linear de escurecimento de limbo e a velocidade de rotação projetada na linha de visada ( $V_{\text{seni}}$ ), que será determinada para cada estrela, com exceção do Sol, para o qual utilizamos o valor de 1,8 km/s.

A aproximação feita para encontrar o coeficiente de escurecimento do limbo relaciona-se com a seguinte fórmula:

$$\frac{I(\theta)}{I(\theta = 0)} = (1 - u) + u \cos \theta \quad 3.3$$

O coeficiente linear de escurecimento do limbo ( $u$ ), foi calculado pela interpolação dos dados do trabalho de Diaz-Cordovés (1995).

Ajustou-se a intensidade para cada uma das linhas do espectro sintético do Sol, através da relação a seguir.

$$\begin{array}{l} \text{Log } F(\lambda) \text{ Sintético} \quad \text{---} \quad \text{gf Sintético} \quad 3.2 \\ \text{Log } F(\lambda) \text{ Observado} \quad \text{---} \quad \text{gf real} \end{array}$$

Sabendo que o fluxo é determinado por:

$$F_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{4\pi d^2} \quad \text{ou} \quad F_{\lambda} = \int I_{\lambda} \cos \Theta \, dw$$

$$dI_{\lambda} = -k_{\lambda} \rho I_{\lambda} ds + j_{\lambda} \rho ds$$

Onde:

$$I_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = I_{\lambda} e^{-\tau_{\lambda}} + S_{\lambda}(1 - e^{-\tau_{\lambda}})$$

$$\tau_{\lambda} = \int \rho k_{\lambda} ds$$

$$k_{\lambda} \propto gf \text{ (de uma linha espectral)}$$

no isotopic data

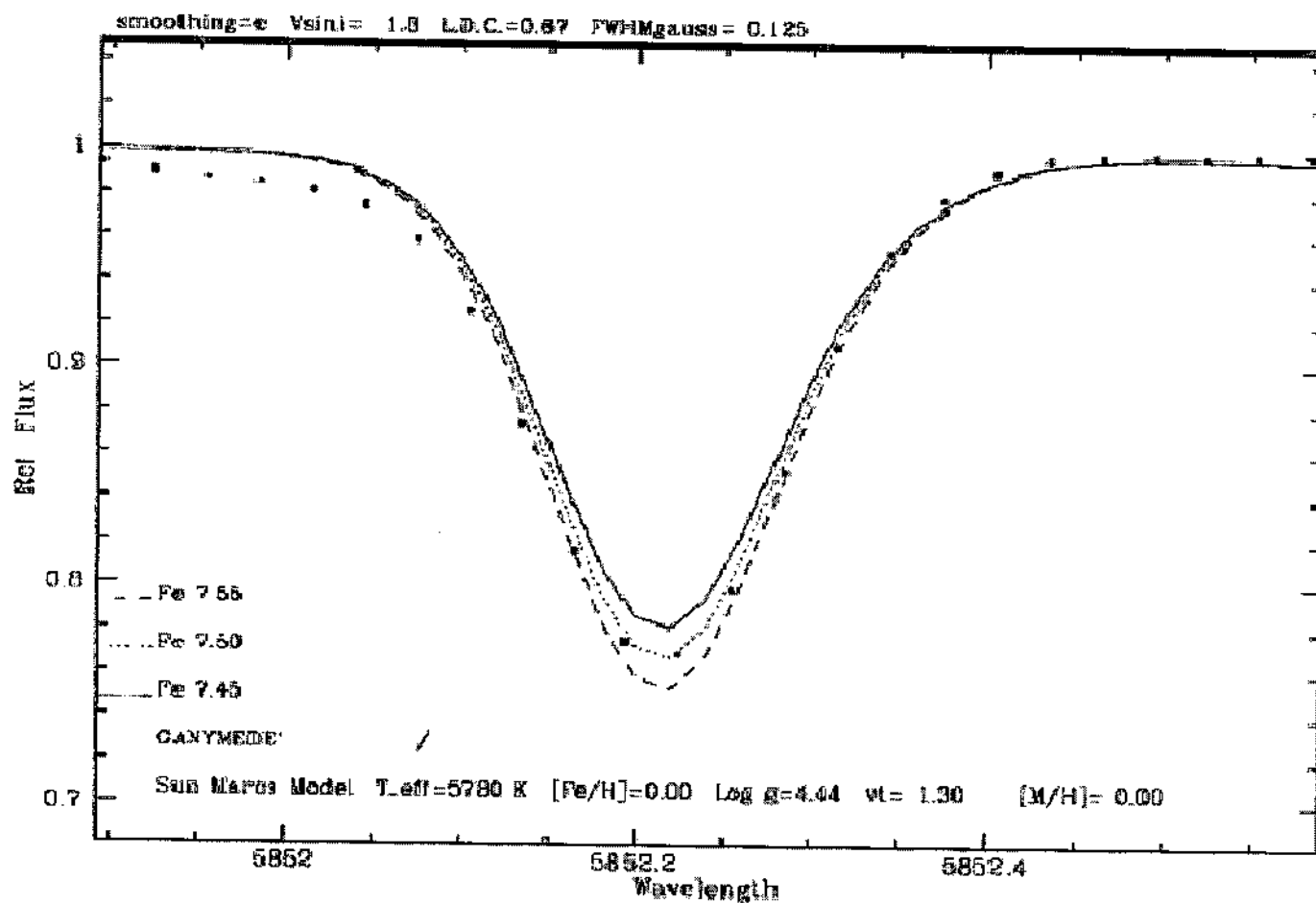


Figura 3.2 - Ajuste do perfil de uma das linhas do FeI no espectro solar

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E CONCLUSÕES

### 4.1 – REPRODUÇÃO DE ESPECTRO SOLAR

Na Figura 4.1, podemos analisar o resultado do espectro solar (Ganimedes) mostrando as linhas do ferro utilizadas na determinação da velocidade de rotação projetada. O espectro sintético, em linha cheia, foi ajustado ao observado, linha mais fraca.

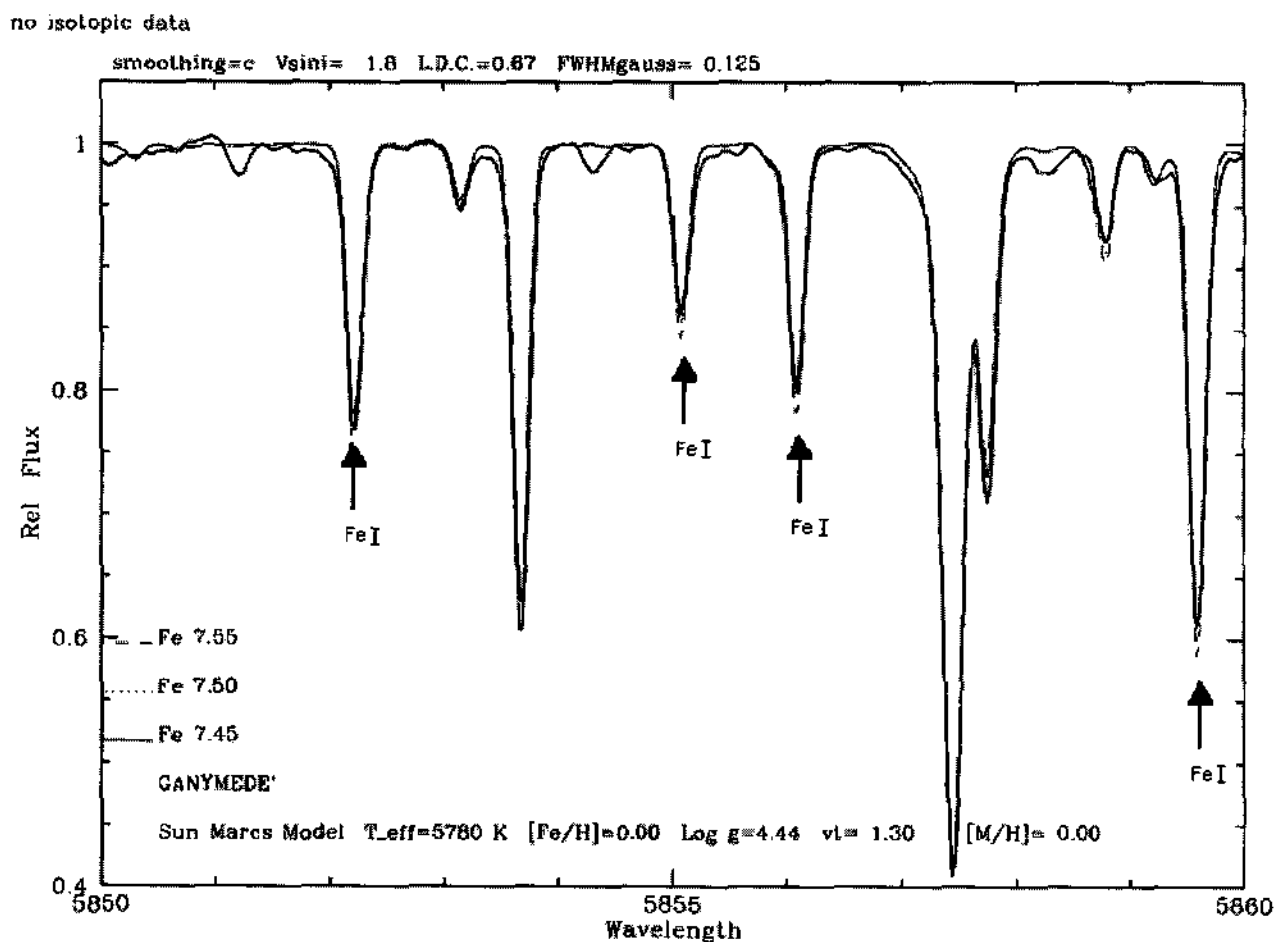


Figura 4.1 – Ajuste de síntese espectral para o Sol

Na Figura 4.2, a parte superior, refere-se aos desvios do espectro observado em relação ao sintético (rms). Já a parte inferior refere-se ao ajuste de síntese espectral para uma linha isolada do Fe I considerando-se uma variação de  $\pm 0,05$  dex na abundância logaritma do Fe.

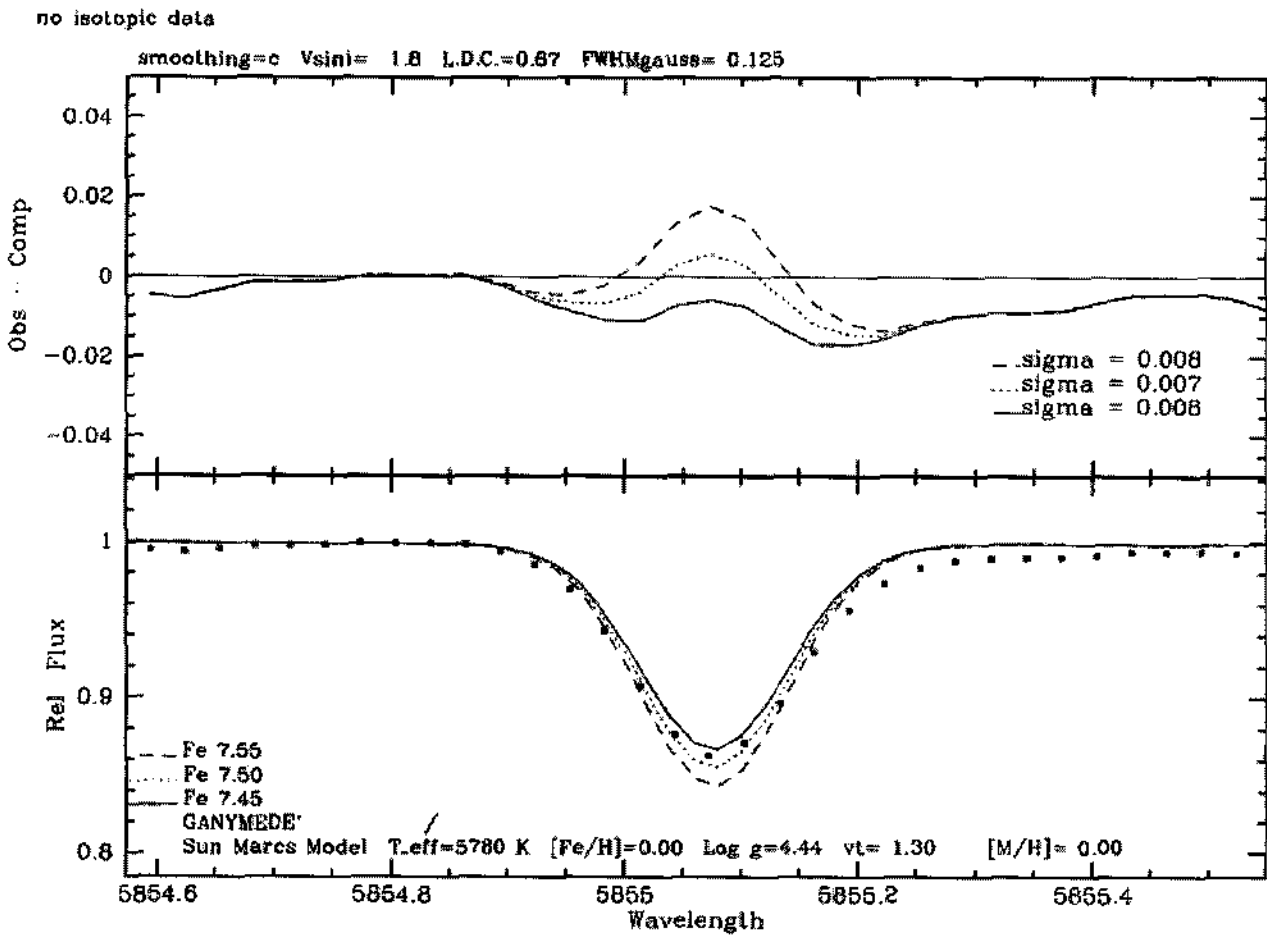
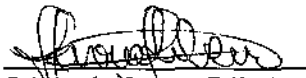


Figura 4.2 – Ajuste de síntese espectral para o Sol.

## CAPÍTULO 5 - COMENTÁRIOS

### 5.1- TRABALHOS FUTUROS

Este projeto teve início em Janeiro de 2004, tenho concluído 4 meses até o momento, por isso os resultados alcançados são parciais. Pretende-se, como continuidade desta pesquisa, determinar as abundâncias fotosféricas do Carbono e Nitrogênio para todas as estrelas selecionadas neste trabalho.



Lívia de Souza Ribeiro

São José dos Campos 31 de maio de 2004



## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFIA

- Da Silva, R.O. 2003, Dissertação de Mestrado. INPE (INPE – 9877 – TUD/873), sob orientação de A. de C. Milone e G. F. Porto de Mello.
- Díaz-Cordovés, J., Claret, A., Gimenez, A. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 110.
- Edvardsson et al. 1993, *A&A*, 275, n. 1, p. 101-152.
- INPE 2002, *Introdução à Astronomia e Astrofísica*, INPE (INPE – 7177 – PUD/38).
- Kurucz, R. L., Furenlid, I., Brault, J., Testerman, I. **The solar flux atlas from 296 nm to 1300nm**. New Mexico: National Solar Observatory, 1984.
- Kurucz, R. L., Atomic and molecular data for opacity calculations. **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica**, v.23,n. 45-48,1992.
- Kurucz, R. L., Atomic and molecular databases. Banco de dados. Disponível em: <http://Cfaku5.harvard.edu>
- Maciel, W. J. 1991, *Astronomia e Astrofísica - curso de Extensão universitária*, IAG-USP.
- Moore, C. E., Minnaert, M., Houtgast, J. *The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å*. Washington D.C.: Government Printing Office, 1996.
- Sneden, C. 2002, *Synthetic stellar spectra*, <http://verdi.as.utexas.edu/moog.html>
- Vienna Atomic Lines Database (VALD), <http://www.astro.univie.ac.at/~vald>