



*Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza  
Observatório do Valongo  
Departamento de Astronomia*

## **Busca Fotométrica e Espectroscópica de Estrelas Gêmeas Solares**

**Ronaldo Oliveira da Silva**

**Orientador: Dr. Gustavo Frederico Porto de Mello  
(UFRJ/CCMN/OV/Departamento de Astronomia)**

**Projeto de Final de Curso para a obtenção do título de Astrônomo.**

**Rio de Janeiro – setembro de 2000**

## AGRADECIMENTOS

Após todos os anos de realização deste trabalho, meus agradecimentos vão para aquelas pessoas que contribuíram para a sua conclusão. Entre elas

minha mãe, meu pai, meus irmãos.

meus amigos do Rio, em especial Flávia Requeijo, Annelisie Aiex, Henrique Wilbert, Carlos Magno e Milena Sixe.

meus amigos de São Paulo Marcos Roberto, Elcio Rocha, Claudemir Eduardo, Douglas Janelato, Denis Miranda e Ronaldo Eugênio.

e como não podia deixar de ser, agradeço também àqueles professores do Observatório do Valongo, do Instituto de Física e do Instituto de Geociências que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu professor e orientador deste projeto Dr. Gustavo Porto de Mello, o qual em muito se dedicou para o meu amadurecimento profissional.

Agradeço profundamente ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida entre agosto de 1997 a agosto de 2000, sem a qual não seria possível a realização deste projeto.

Agradeço ao apoio financeiro da Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB).

As várias missões de observação que fizeram parte deste projeto tiveram apoio financeiro do programa FINEP/PRONEX nº 41.96.0908.00, coordenado pela Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sueli M. Viegas (IAG/USP).

À equipe de apoio logístico do Observatório Pico dos Dias (OPD/LNA), pela boa vontade demonstrada durante as missões de observações deste projeto.

Ao Dr. Licio da Silva por ter observado para este projeto no *European Southern Observatory* (ESO).

Este projeto utilizou dados obtidos dentro do acordo ESO/CNPq/Observatório Nacional para a operação do telescópio de 1,52 m instalado em Cerro La Silla.

## RESUMO

Estrelas gêmeas solares são definidas como estrelas não binárias de mesma massa, temperatura, gravidade superficial, luminosidade, metalicidade, nível de atividade cromosférica e idade que o Sol. Tais objetos são, presumivelmente, candidatos privilegiados a possuírem sistemas planetários semelhantes ao nosso, assim como abrigarem formas de vida baseadas na química de cadeias de carbono e oceanos de  $H_2O$ . Também podem auxiliar na resolução da questão de quão típicas são as características solares com respeito à população galáctica local de estrelas de tipo G de idade intermediária, assim como fornecer objetos de calibração fotométrica e espectroscópica, representando o Sol no céu noturno. A identificação da estrela HR6060 como a melhor gêmea solar até o presente permitiu uma melhor compreensão da estratégia necessária para identificar estrelas que se assemelhem estreitamente ao Sol. Neste trabalho, apresentamos os resultados de uma busca sistemática de todas as gêmeas solares dentro de 40 parsecs do Sol. A amostra estudada consiste de 52 estrelas mais brilhantes que  $V_T = 8,0$ , além de uma amostra adicional de 68 estrelas com  $8,0 < V_T < 9,0$ , selecionadas do catálogo HIPPARCOS, com magnitudes absolutas e cores muito próximas das solares. Estas estrelas foram estudadas espectroscopicamente com espectros ópticos de alta resolução e alta relação sinal-ruído, e espectros no ultravioleta de resolução intermediária. Obtivemos seus parâmetros atmosféricos, metalicidade, estado evolutivo e grau de atividade cromosférica, e discutimos uma série de critérios fotométricos e espectroscópicos para selecionar estrelas com as mesmas propriedades que o Sol. Como resultado final, apresentamos uma lista de seis objetos que, dentro dos erros da análise, são gêmeas solares de grau de semelhança ao Sol igual ou superior a HR6060.

Palavras-chave : estrelas, tipo solar – estrelas, parâmetros atmosféricos – estrelas, composição química – estrelas, gêmeas solares.

## ABSTRACT

Solar twin stars are defined as non-binary stars with the same mass, temperature, surface gravity, luminosity, metallicity, chromospheric activity level and age as the Sun. Such objects are, presumably, privileged candidates to possess planetary systems similar to our own and also to be abodes for life forms based on carbon chain chemistry and water oceans. They may also help answer the still lingering question of how typical the solar characteristics are with respect to the local population of middle-aged G-type stars, besides providing photometric and spectroscopic calibration objects which may represent the Sun in the night sky. Our identification of HR6060 as the best ever solar twin enabled a much better understanding of the strategies necessary to uncover stars that closely resemble the Sun. In this work, we present the results of our systematic survey to reveal all solar twin stars within 40 parsecs of the Sun. The sample studied consists of 52 stars brighter than  $V_T = 8,0$ , as well as an additional sample of 68 stars with  $8,0 < V_T < 9,0$ , selected from the HIPPARCOS catalogue, with absolute magnitudes and colors very close to the solar ones. These stars were studied spectroscopically with high-resolution, high signal-to-noise optical spectra, and with intermediate resolution ultraviolet spectra. We have obtained their atmospheric parameters, state of evolution and degree of chromospheric activity, and discuss the various photometric and spectroscopic criteria employed to identify stars with the same properties as the Sun. As a final result, we present a list of six objects, within the uncertainties of the analysis, which are considered as solar twin stars with equal or superior likeness to the Sun as HR6060.

Keywords : stars, solar-type – stars, atmospheric parameters – stars, chemical composition – stars, solar twins.

# ÍNDICE

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	4
<b>ÍNDICES FOTOMÉTRICOS E SELEÇÃO DA AMOSTRA</b>	
1.1 - Índices de Cor Utilizados .....	4
1.2 - Seleção da Amostra .....	6
1.2.1 - Fonte de dados .....	6
1.2.2 - Intervalos de Seleção .....	7
1.2.3 - Estrelas Seleccionadas .....	9
1.3 - Definição do Índice de Similaridade Fotométrica .....	10
1.4 - Parâmetros Fotométricos .....	11
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	23
<b>OBSERVAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS E REDUÇÕES</b>	
2.1 - Observações .....	23
2.1.1 - Especificações Técnicas .....	23
2.1.2 - Estrelas Observadas .....	24
2.1.3 - Objetos de Referência .....	27
2.2 - Reduções .....	29
2.3 - Normalização do Contínuo .....	30
2.4 - Medidas de Largura Equivalente .....	33
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	41
<b>ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS</b>	
3.1 - Determinação dos Parâmetros Atmosféricos .....	41
3.1.1 - Modelo Atmosférico .....	41
3.1.2 - Cálculo dos gf Solares .....	41
3.1.3 - Cálculo dos Parâmetros Atmosféricos .....	42
3.2 - Temperatura Efetiva e Nível de Emissão Cromosférica a partir de H $\alpha$ .....	47
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	53
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	
4.1 - Melhores Candidatas .....	53
<b>APÊNDICE 1</b> .....	59

## INTRODUÇÃO

Gêmeas Solares são, por definição, estrelas não binárias idênticas ao Sol, dentro das incertezas observacionais, em todos os parâmetros astrofísicos: massa, idade, luminosidade, composição química, temperatura, gravidade superficial, campos fotosféricos de velocidade, campos magnéticos, velocidade de rotação e nível de atividade cromosférica. Tais objetos teriam o mesmo espectro de linhas e as mesmas cores que o Sol.

O Sol é a única estrela para a qual quase todos os parâmetros físicos fundamentais são conhecidos com boa precisão. Ele é também um objeto fundamental de calibração e referência na astrofísica estelar. Por ser uma estrela de tipo G, poderíamos concluir que as estrelas deste tipo espectral são as mais conhecidas. Infelizmente, a posição solar perante algumas medições estelares ainda permanece bastante incerta.

Uma das razões que motivam astrônomos a se preocuparem em encontrar estrelas semelhantes ao Sol, é que o Sol está muito próximo e é muito brilhante, o que dificulta a comparação direta com objetos muito fracos. Devido ao seu brilho, seu grande diâmetro aparente e o fato de que ele não pode ser observado à noite, as cores fotométricas do Sol são conhecidas com menos precisão do que para as estrelas em geral. Encontrando uma estrela idêntica ao Sol em todos os parâmetros físicos, poderíamos atribuir as cores conhecidas para esta estrela ao Sol, contribuindo para a solução deste problema.

Nosso conhecimento dos corpos menores do sistema solar, asteróides ou satélites planetários, depende fortemente do conhecimento das curvas de refletância, que por sua vez necessitam de um objeto que represente o espectro solar no céu noturno. Geralmente, estrelas de tipo G2V são usadas para descontar a assinatura solar dos espectros destes pequenos objetos. Uma gêmea solar moderadamente brilhante seria muito útil neste procedimento e minimizaria as incertezas.

Outra questão importante é a posição do Sol perante as estrelas da sua vizinhança. Nós não sabemos se o Sol é representativo entre as estrelas de tipo G. Ele é mais rico em metais que a média destas estrelas (Rocha Pinto & Maciel 1997 ; Rocha Pinto 2000); parece ter um alto valor de componente de velocidade na direção da rotação galáctica, em comparação com as estrelas G de mesma metalicidade situadas na sua vizinhança (Cayrel de Strobel 1996); possui ainda baixa excentricidade orbital para sua metalicidade, idade e distância ao centro da

Galáxia, o que proporciona uma órbita muito estável. A existência de gêmeas solares pode ajudar a esclarecer o quão típico é o Sol perante as outras estrelas de tipo G.

Recentemente, vários grupos de pesquisa têm trabalhado na busca de planetas fora do sistema solar. Se, por um lado, vários sistemas planetários extrasolares já foram identificados em estrelas de tipo solar da vizinhança solar (Butler et al. 2000), por outro lado, surge a questão se uma forte semelhança com o Sol é condição necessária para estas estrelas possuírem sistemas planetários similares ao nosso. Isto pode ser esclarecido se tivermos um bom número de estrelas gêmeas solares que pudessem ser investigadas quanto à existência de sistemas planetários.

Em uma série de trabalhos, Hardorp (1978, 1982) tentou encontrar estrelas cujos espectros identificam-se com o espectro ultravioleta do Sol, comparando as distribuições de energia estelar e solar nesta região, baseado na grande sensibilidade da banda de CN  $\lambda 3850$  aos parâmetros atmosféricos estelares. Hardorp encontrou apenas duas estrelas bastante semelhantes: HR7504 (16 Cyg B) e HR2290. Além dessas, encontrou outras estrelas menos parecidas com o Sol, mas que são casos bastante próximos: HR5072, HR5209, HR6269, HD112257, HD114174, HD105590 e BD +15 3364. Os trabalhos feitos por Hardorp estimularam outros autores na busca por estrelas gêmeas do Sol.

Cayrel de Strobel também desenvolveu uma série de trabalhos na tentativa de encontrar objetos semelhantes ao Sol. Em uma de suas publicações, Cayrel de Strobel (1996) faz uma revisão de seus trabalhos anteriores, investigando se estrelas classificadas fotometricamente como gêmeas solares continuam assim quando sujeitas a análises espectroscópicas. Em um trabalho em conjunto, Friel et al. (1993) encontram como as melhores candidatas a gêmeas solares as estrelas HR7503 e HR7504 do sistema binário 16 Cyg, sendo a componente A ligeiramente mais quente que o Sol e a componente B ligeiramente mais fria; ambas têm massa quase igual à do Sol, mas são consideravelmente mais velhas e mais evoluídas. As cores UBV das duas componentes são praticamente indistinguíveis das cores solares. A componente B parece ter um objeto do tamanho de Júpiter em uma órbita altamente excêntrica a 1,7 U.A. (Cochran et al. 1997), um sistema planetário muito diferente do nosso.

Até hoje, nenhuma estrela conhecida satisfaz todos os critérios necessários para ser considerada uma estrela idêntica ao Sol. No entanto, a estrela de tipo G2V HR6060 (18 Sco)

(Porto de Mello & da Silva 1997) foi identificada como o caso mais próximo, através de uma análise espectroscópica detalhada baseada em espectros de qualidade muito alta. Esta estrela possui temperatura efetiva, metalicidade, gravidade superficial, velocidade de microturbulência, grau de atividade cromosférica, massa, idade e cores indistinguíveis dos valores solares. Por outro lado, não possui, com alto grau de confiança, nenhuma companheira estelar ou subestelar (Duquennoy & Mayor, 1991), mas ainda continua sendo investigada por várias equipes de busca de planetas extrasolares.

Neste trabalho, realizamos a análise espectroscópica de uma amostra, completa até 40 parsecs, de estrelas candidatas a gêmeas solares com dados fotométricos e astrométricos disponíveis no catálogo Hipparcos. Para estas estrelas, determinamos valores de temperatura efetiva, metalicidade, gravidade superficial, microturbulência, estado evolutivo e nível de atividade cromosférica, a fim de encontrar estrelas cujos parâmetros atmosféricos se assemelham com os parâmetros solares.

No **capítulo 1**, definimos a base de dados fotométricos e astrométricos que utilizamos para a seleção de uma amostra. No final deste capítulo, listamos todas as estrelas que consideramos selecionadas como candidatas a gêmea solar. No **capítulo 2**, apresentamos os detalhes das observações e reduções dos espectros. A análise dos espectros reduzidos é feita no **capítulo 3**. Discutimos os resultados no **capítulo 4**, onde também abordamos nossas conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.



# CAPÍTULO 1

## ÍNDICES FOTOMÉTRICOS E SELEÇÃO DA AMOSTRA

### 1.1 - Índices de Cor Utilizados

Uma das melhores medidas da temperatura efetiva de uma estrela é através da inclinação do contínuo de Paschen (admitindo que não há avermelhamento provocado pelo meio interestelar). Ele é relativamente independente das linhas espectrais, não é afetado por complicações de não ocorrência do Equilíbrio Termodinâmico Local (ETL) e a dependência com a gravidade superficial é muito pequena (Gray 1976). Já que, para uma certa estrela, uma mudança na inclinação do contínuo de Paschen influencia os valores medidos dos índices de cor ( $B-V$ ) (definido pelo sistema  $UBV$  de Johnson), ( $B_T-V_T$ ) (catálogo Tycho do satélite HIPPARCOS, ESA 1997) e ( $b-y$ ) (definido pelo sistema  $uvby$  de Strömgen 1965), decidimos utilizar estas cores na determinação de temperaturas efetivas fotométricas para as estrelas que selecionamos como amostra (definida na seção 1.2). Os índices de cor ( $B-V$ ) que utilizamos para as estrelas são provenientes do catálogo INCA (Input Catalogue) do Hipparcos; ( $B_T-V_T$ ) foi obtido a partir do catálogo Tycho do Hipparcos; as cores ( $b-y$ ) provém dos catálogos de Olsen (1983) e Olsen (1993 e 1994).

O índice de cor  $m_1$ , também definido por Strömgen (1965), é uma medida da intensidade total de linhas metálicas na banda  $v$ . Portanto, sendo um índice sensível à metalicidade, utilizamos os valores de  $m_1$ , disponíveis nos catálogos de Olsen, para obtermos metalicidades fotométricas.

Na publicação de Olsen de 1983, chamada por ele de catálogo F, ele se concentra na obtenção de valores de ( $b-y$ ) e  $m_1$  para estrelas deste tipo espectral. Nas publicações de 1993 e 1994 (catálogos G), Olsen prossegue suas determinações de ( $b-y$ ) e  $m_1$  para estrelas mais frias. A base de dados principal de Olsen são os catálogos G, onde estão a maior parte das estrelas por ele analisadas. Por este motivo, ele obteve algumas equações de transformação dos valores de ( $b-y$ ) e  $m_1$  do catálogo F para os catálogos G. No entanto, como utilizamos em nossa análise algumas calibrações de cor,  $T_{ef}$  e  $[Fe/H]$  (Porto de Mello 2000) baseadas em estrelas contidas no catálogo F, optamos por efetuar transformações contrárias às realizadas



por Olsen, isto é, transformações dos catálogos G para o catálogo F. As equações estão listadas a seguir, onde as transformações de  $m_I$  são separadas em hemisfério norte e sul:

$$(b-y)_F = 1,1289 (b-y)_G - 0,0601 \quad (1.1)$$

$$m_{IF} = 0,9823 m_{IG} + 0,0133 \quad (\text{hemisfério norte}) \quad (1.2)$$

$$m_{IF} = m_{IG} - 0,1700 (b-y)_F + 0,0796 \quad (\text{hemisfério sul}) \quad (1.3)$$

Uma vez que não podemos medir as cores solares de forma direta, devido ao fato do Sol ser um objeto muito brilhante e de diâmetro angular extenso, determinamos seus dados fotométricos ( $B-V$ ,  $B_T-V_T$ ,  $b-y$  e  $m_I$ ) a partir de calibrações de cor versus temperatura efetiva e metalicidade (Porto de Mello 2000), construídas utilizando uma amostra de estrelas de tipo solar (cujos índices de cor também foram obtidos dos catálogos descritos acima) com temperaturas efetivas e metalicidades muito bem determinadas (Porto de Mello 1996).

De posse destas calibrações, da temperatura efetiva solar ( $T_{ef}^\odot = 5777$  K, Neckel 1986) e da metalicidade solar (por definição,  $^{1}[Fe/H]^\odot = 0,00$ ), obtemos os índices de cor do Sol:

$$(B-V)^\odot = 0,654 \pm 0,007 \quad (1.4a)$$

$$(B_T-V_T)^\odot = 0,733 \pm 0,009 \quad (1.4b)$$

$$(b-y)^\odot = 0,407 \pm 0,004 \quad (1.4c)$$

$$m_I^\odot = 0,217 \pm 0,005 \quad (1.4d)$$

Estas cores são obtidas simplesmente introduzindo os valores dos parâmetros atmosféricos solares e derivando os índices de cor correspondentes a cada calibração. As incertezas mencionadas são os erros *formais*, calculados a partir das incertezas associadas às calibrações.

---

<sup>1</sup> a razão de abundância [elemento/H] é definida pela relação:

$$[A/H] = \log(N_A/N_H)^* - \log(N_A/N_H)^\odot$$

A: elemento químico qualquer

$N_A$ : número populacional do elemento A

$N_H$ : número populacional do elemento Hidrogênio

## 1.2 - Seleção da Amostra

### 1.2.1 - Fonte de dados

Selecionamos a amostra a partir dos catálogos de dados fotométricos e astrométricos observados pelo satélite Hipparcos, a partir da definição de uma caixa  $2\sigma$  em torno dos valores solares de  $M_{VT}^{\odot}$  e  $(B_T - V_T)^{\odot}$ . A base de dados Hipparcos fornece valores acurados e homogêneos de paralaxes  $\pi$  e magnitudes  $B_T$  e  $V_T$ , com as quais calculamos o índice de cor  $(B_T - V_T)$ . Usando as medidas de magnitudes aparentes  $V_T$  e paralaxes  $\pi$ , calculamos valores de  $M_{VT}$  através da conhecida fórmula:

$$M_{VT} = V_T + 5 + 5 \log \pi \quad (1.5)$$

Adicionalmente, o catálogo Hipparcos lista as incertezas formais de  $\pi$ ,  $B_T$  e  $V_T$ , de modo que podemos calcular os erros formais para  $M_{VT}$  e  $(B_T - V_T)$ .

$$\sigma(M_{VT}) = \left| M_{VT} \{ \pi + \sigma(\pi), V_T + \sigma(V_T) \} - M_{VT} \{ \pi, V_T \} \right| \quad (1.6)$$

$$\sigma_{(B_T - V_T)}^2 = \sigma_{B_T}^2 + \sigma_{V_T}^2 \quad (1.7)$$

O valor da magnitude absoluta solar  $M_{VT}^{\odot}$  foi obtido considerando a estrela HR6060 como referência, já que esta estrela é muito parecida com o Sol. A grande semelhança entre os sistemas fotométricos das bandas V e  $V_T$  e a diferença muito pequena de  $M_V$  entre estes dois objetos, justificam a seguinte aproximação:

$$M_V^{\odot} - M_V^{HR6060} = M_{VT}^{\odot} - M_{VT}^{HR6060} \quad (1.8)$$

Os valores da magnitude absoluta  $M_V$  destas duas estrelas são  $M_V^{\odot} = 4,82$  (Neckel 1986) e  $M_V^{HR6060} = 4,77$ , a qual foi calculada usando  $\pi$  do Hipparcos e V do *Bright Star Catalogue* (BSC, Hoffleit 1982). Juntamente com o valor da magnitude absoluta  $M_{VT}^{HR6060} = 4,83$  (Tycho), podemos calcular  $M_{VT}$  para o Sol:

$$M_{VT}^{\odot} = 4,88 \quad (1.9)$$

A completeza de observação do catálogo Hipparcos é de 100 % para estrelas até o limite de magnitude aparente  $V_T = 9,0$  (aproximadamente uma distância de 67 parsecs para

uma estrela como o Sol). Isto significa que o satélite observou *todas* estas estrelas mais brilhantes; para os objetos mais fracos que este valor, o catálogo já não é completo. Uma vez que queremos ser completos dentro de um certo intervalo torno de  $M_{VT}^{\circ}$  e  $(B_T - V_T)^{\circ}$ , optamos inicialmente por restringir a amostra neste limite.

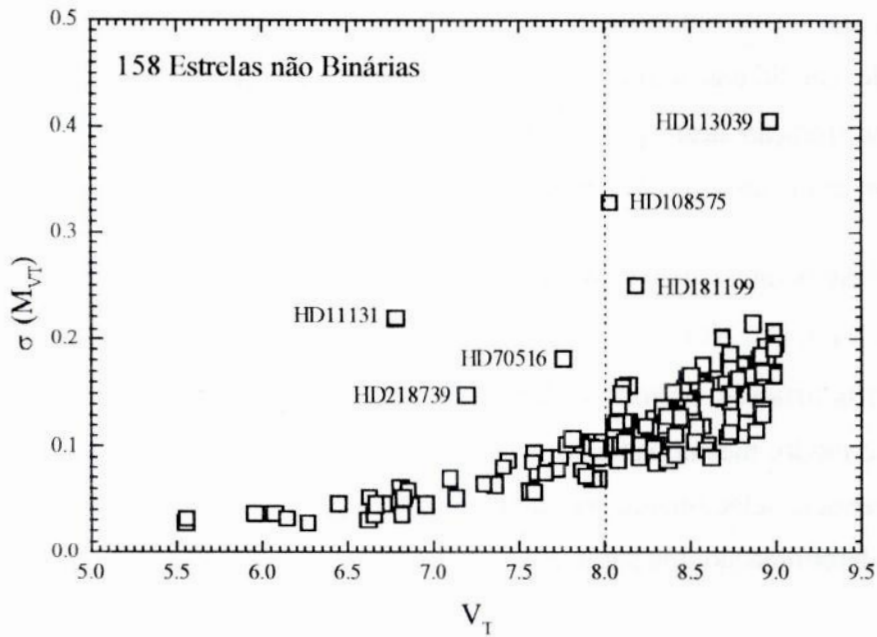
### 1.2.2 - Intervalos de Seleção

A escolha dos intervalos de seleção da amostra, utilizada na definição da caixa  $2\sigma$  em torno dos valores de  $M_{VT}^{\circ}$  e  $(B_T - V_T)^{\circ}$ , ocorreu após várias experimentações.

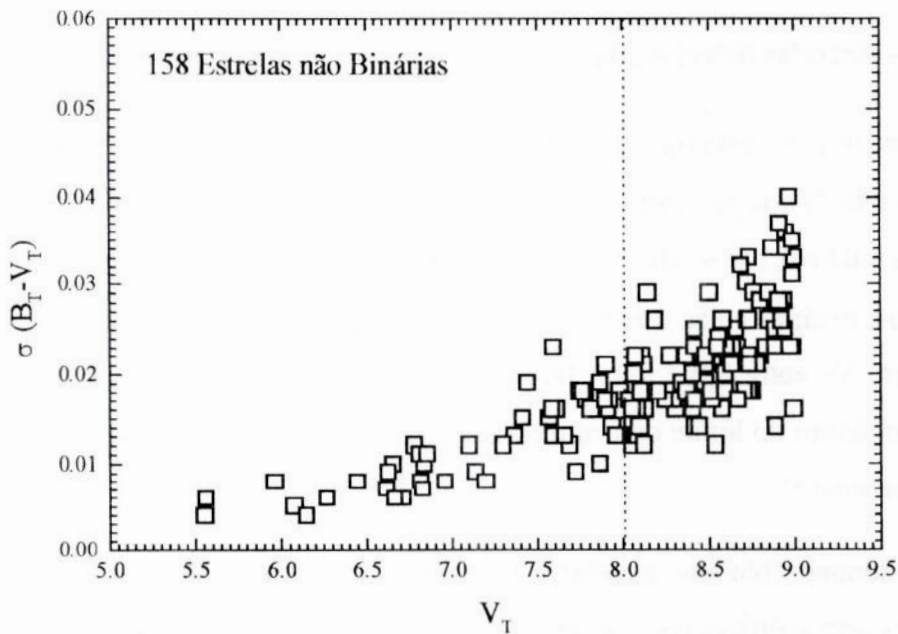
Primeiramente, selecionamos estrelas dentro de intervalos arbitrários em torno dos valores de  $M_{VT}^{\circ}$  e  $(B_T - V_T)^{\circ}$  e calculamos os erros internos médios nestes parâmetros para as estrelas selecionadas, mas mantendo o limite de magnitude em  $V_T = 8,0$  (o que equivale a uma distância de 42 parsecs para uma estrela com  $M_{VT}$  igual à do Sol). Em uma outra experimentação, fixamos intervalos arbitrários em torno dos mesmos parâmetros, agora variando o limite de magnitude  $V_T$ , e recalculamos os erros internos médios. Concluímos que os erros internos de  $M_{VT}$  e  $(B_T - V_T)$  dependem essencialmente do limite de magnitude aparente escolhido, sendo muito pouco dependentes do intervalo de cor e de magnitude absoluta definidos.

O objetivo destas experimentações foi selecionar estrelas dentro uma caixa  $2\sigma$  *formal* (ou seja, uma caixa que represente 95 % de confiabilidade estatística), cujos intervalos definidos em torno de  $M_{VT}^{\circ}$  e  $(B_T - V_T)^{\circ}$  ficassem de acordo com os erros internos médios em  $M_{VT}$  e  $(B_T - V_T)$  obtidos para as mesmas estrelas selecionadas dentro destes intervalos. Isto foi satisfeito com  $\bar{\sigma}(M_{VT}) = 0,07$  e  $\bar{\sigma}(B_T - V_T) = 0,013$ , para estrelas com  $V_T \leq 8,0$ .

A escolha deste limite de  $V_T = 8,0$  na definição dos intervalos de seleção foi baseada em alguns argumentos. Um deles é o fato de que todas as estrelas até este limite possuem dados fotométricos ( $b-y$  e  $m_1$ ) completos nos catálogos de Olsen (1983, 1993 e 1994). Precisamente, a partir de  $V_T = 8,1$  verificamos que grande parte das estrelas não possuem valores de  $(b-y)$  e  $m_1$  disponíveis nestes catálogos. Outro fato importante é que, entre os valores 8,0 e 9,0 de magnitude aparente  $V_T$ , os erros internos na magnitude absoluta  $M_{VT}$  e na cor  $(B_T - V_T)$  determinados pelo Hipparcos são consideravelmente maiores, em relação aos erros das estrelas mais brilhantes que  $V_T = 8,0$  (**Figura 1.2a** e **Figura 1.2b**).



**Figura 1.2a:** Erros nos valores de  $M_{V_T}$  obtidos para as estrelas não binárias da amostra ( $V_T \leq 9,0$ ). Podemos ver um crescente aumento nestes erros para magnitudes aparentes  $V_T$  maiores, conseqüência de um aumento da incerteza na medida da paralaxe para estrelas mais fracas e, portanto, mais distantes. Vemos também que o erro interno médio  $\bar{\sigma} (M_{V_T}) = 0,07$  está de acordo com as estrelas mais brilhantes que  $V_T = 8,0$ .



**Figura 1.2b:** Analogamente à figura anterior, os erros nas medidas de cor ( $B_T - V_T$ ) feitas pelo Hipparcos ficam maiores para as estrelas mais fracas. Aqui também vemos que  $\bar{\sigma} (B_T - V_T) = 0,013$  representa muito melhor as estrelas mais brilhantes que  $V_T = 8,0$ .

Outro argumento em favor de um limite operacional de  $V_T = 8,0$  está no fato de que a quantidade de candidatas assim selecionadas é um número factível de estrelas a serem observadas na duração deste projeto. Entretanto, todos estes argumentos não impediram a observação oportuna de algumas estrelas mais fracas que  $V_T = 8,0$ .

Escolhemos uma caixa  $2\sigma$  definida por intervalos que são mais representativos para as estrelas com  $V_T \leq 8,0$ , como podemos ver nas **Figuras 1.2a e 1.2b**. Estrelas mais fracas, possuindo erros maiores, definiriam formalmente um maior intervalo em torno dos valores solares. Deste modo, mesmo estando excluindo certas estrelas de magnitude entre 8,0 e 9,0, estamos na verdade selecionando as melhores candidatas, uma vez que, entre as estrelas mais brilhantes, a determinação dos parâmetros atmosféricos e luminosidades é mais confiável.

A completeza do catálogo Hipparcos em cor ( $B_T - V_T$ ) é de 92 % para estrelas de todos os tipos espectrais com  $V_T \leq 8,0$ , o que significa que 8 % das estrelas observadas pelo Hipparcos não possuem índice de cor ( $B_T - V_T$ ). Esta completeza sobe para 95 % quando consideramos apenas as estrelas de tipo G. Como a maior parte das estrelas da nossa amostra são de tipo espectral G, utilizamos este último valor para caracterizar a completeza do nosso processo de seleção de candidatas a gêmeas solares usando o catálogo Hipparcos.

### 1.2.3 - Estrelas Selecionadas

Procuramos no catálogo por estrelas dentro dos intervalos  $2\sigma$  ( $\bar{\sigma}(M_{VT}) = 0,07$  e  $\bar{\sigma}(B_T - V_T) = 0,013$ ) dos parâmetros solares ( $M_{VT}^\odot = 4,88$  e  $(B_T - V_T)^\odot = 0,733$ ), ou seja, com  $4,74 \leq M_{VT} \leq 5,02$  e  $0,707 \leq (B_T - V_T) \leq 0,759$ . Dentro destes intervalos, encontramos um total de 171 estrelas, binárias e não binárias. Entre elas, 56 possuem magnitude aparente  $V_T$  até 8,0 e 115 possuem  $V_T$  entre 8,0 e 9,0. Eliminando as estrelas binárias, restam 158 estrelas, das quais 52 estão dentro do limite de magnitude  $V_T \leq 8,0$  e 106 estão entre os limites 8,0 e 9,0 de magnitude aparente  $V_T$ .

Consideramos binárias aquelas estrelas que o catálogo Hipparcos determinou como sendo binárias astrométricas (para as quais são listados neste catálogo valores de diferença de magnitude e separação angular das componentes) ou aquelas contidas no catálogo de binárias espectroscópicas de Batten et al. (1989). Na verdade, é possível que uma estrela integrante de um sistema binário seja uma gêmea solar. Entretanto, estamos interessados em estrelas

isoladas, que possam ter tido uma história evolutiva semelhante à do Sol, e também em obter candidatas a possuir sistemas planetários semelhantes ao nosso.

Além das 158 estrelas selecionadas como descrito acima, consideramos em nossa amostra 2 outras estrelas (com  $V_T$  entre 8,0 e 9,0) que possuem a magnitude absoluta  $M_{VT}$  ligeiramente fora da caixa  $2\sigma$ . Estas duas estrelas estão incluídas apenas porque foram observadas espectroscopicamente como objetos de oportunidade.

### 1.3 - Definição do Índice de Similaridade Fotométrica

Com a seleção da amostra feita, temos um total de 160 estrelas com magnitude aparente  $V_T$  até 9,0 que poderiam ser observadas. Entretanto, dado este grande número de candidatas, seria mais viável restringir ainda mais a amostra, a fim de concentrar a atenção nos casos mais interessantes, isto é, nas estrelas que têm mais chances de serem ótimas candidatas a gêmeas solares. Decidimos então avaliar as estrelas até agora selecionadas através dos seus índices de cor. Para isto, definimos um **índice de similaridade de cor ( $S_C$ )** a partir dos desvios quadráticos das cores de cada estrela em relação às cores solares. A cada índice de cor  $(B-V)^{INCA}$ ,  $(B_T-V_T)^{Tycho}$ ,  $(b-y)^{Olsen}$  e  $m_1^{Olsen}$  foi atribuído um peso inversamente proporcional aos erros internos médios nas suas determinações dentro da amostra:

$$S_C = \alpha \left( \frac{[(B-V)^{\star} - (B-V)^{\odot}]^2}{\bar{\sigma}_{(B-V)}^2} + \frac{[(B_T-V_T)^{\star} - (B_T-V_T)^{\odot}]^2}{\bar{\sigma}_{(B_T-V_T)}^2} + \frac{[(b-y)^{\star} - (b-y)^{\odot}]^2}{\bar{\sigma}_{(b-y)}^2} + \frac{[m_1^{\star} - m_1^{\odot}]^2}{\bar{\sigma}_{m_1}^2} \right) \quad (1.10)$$

$\alpha$  é um parâmetro ajustado de modo que as próprias cores solares, acrescidas dos erros médios e substituídas na equação nos lugares de  $(B-V)^{\star}$ ,  $(B_T-V_T)^{\star}$ ,  $(b-y)^{\star}$  e  $m_1^{\star}$ , forneçam  $S_C = 0,50$  e assim teremos uma incerteza de  $2\sigma$  em  $S_C$  igual a 1,00. Por definição,  $S_C^{\odot} = 0,00$ .

Calculamos os erros médios, associados às várias cores, separando as estrelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ) daquelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ). Para as 52 estrelas com  $V_T \leq 8,0$  os erros médios nos índices de cor são:

$$\bar{\sigma}_{(B-V)} = 0,009 \quad (1.11a)$$

$$\bar{\sigma}_{(B_T-V_T)} = 0,012 \quad (1.11b)$$

$$\bar{\sigma}_{(b-y)} = 0,003 \quad (1.11c)$$

$$\bar{\sigma}_{m_1} = 0,005 \quad (1.11d)$$

Entre as 106 estrelas mais fracas, apenas 68 possuem índices de cor (b-y) e  $m_1$  disponíveis na literatura. Os erros médios em (B-V) e (B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>), calculados usando todas as 106 estrelas, incluindo as 2 estrelas extras citadas na seção 1.2 (cujos valores de magnitude absoluta  $M_{VT}$  estão ligeiramente fora da caixa  $2\sigma$ ), são:

$$\bar{\sigma}_{(B-V)} = 0,013 \quad (1.12a)$$

$$\bar{\sigma}_{(B_T-V_T)} = 0,020 \quad (1.12b)$$

e para as 68 estrelas com fotometria *uvby*, incluindo as 2 estrelas extras, os erros médios em (b-y) e  $m_1$  calculados são:

$$\bar{\sigma}_{(b-y)} = 0,003 \quad (1.13a)$$

$$\bar{\sigma}_{m_1} = 0,005 \quad (1.13b)$$

É importante lembrar que os erros em (B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>) são calculados a partir dos erros em B<sub>T</sub> e V<sub>T</sub> fornecidos pelo Hipparcos. Os erros de (B-V) são tabelados no catálogo INCA. Já os erros em (b-y) e  $m_1$  são listados, objeto a objeto, nos catálogos de Olsen. Além disso, este quatro erros são calculados utilizando as estrelas da nossa amostra, diferentemente daqueles erros nas cores solares determinados na seção 1.1 (equações 1.4), os quais são baseados nas calibrações de Porto de Mello (2000). Entretanto, o acordo entre estes dois casos é excelente.

#### 1.4 - Parâmetros Fotométricos

Calculamos, para as 122 estrelas da amostra (os 52 objetos com  $V_T \leq 8,0$ , os 68 objetos com  $8,0 < V_T \leq 9,0$  e as 2 estrelas extras) que possuem disponíveis todos os 4 índices fotométricos (B-V, B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>, b-y e  $m_1$ ), valores iniciais de temperatura efetiva e metalicidade, através de calibrações fotométricas. Também calculamos estes valores iniciais para uma outra estrela a qual, mesmo estando entre aquelas que não possuem todos os dados fotométricos, tivemos oportunidade de observar. Neste caso, os valores de temperatura efetiva e metalicidade fotométricos foram obtidos usando dois índices de cor apenas: (B-V) e (B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>).

Para obter a metalicidade, utilizamos a calibração de  $\delta m_1^{(b-y)}$  versus [Fe/H] de McNamara & Powel (1985), onde os valores  $\delta m_1$  ( $\delta m_1^{(b-y)} = m_1^{\text{Híades}} - m_1^{\text{observado}}$ ) foram calculados para um dado (b-y) usando a relação padrão de  $m_1$  para as Híades de Crawford



(1975). Introduzimos uma pequena correção de ponto zero nas metalicidades assim calculadas, uma vez que, quando aplicamos os valores solares de  $(b-y)^\odot$  e  $m_1^\odot$ , esta calibração fornece para o Sol  $[Fe/H] = -0,03$ .

Em seguida, obtivemos as temperaturas efetivas através de várias calibrações de cor versus  $T_{ef}$  e  $[Fe/H]$  de Porto de Mello (1996, 2000). Dadas as cores  $(B-V)$ ,  $(B_T-V_T)$ ,  $(b-y)$  e  $m_1$  obtidas conforme descrito na seção 1.1 e as metalicidades obtidas conforme descrito logo acima, o cálculo da temperatura efetiva é feito para cada estrela a partir das equações abaixo, obtendo uma temperatura para cada índice de cor:

$$T_{ef} ( K ) = (7747 \pm 58) - (3016 \pm 100) (B-V) \{1 - (0,15 \pm 0,04) [Fe/H]\} \quad (1.14a)$$

$$\sigma = 65 \text{ K}$$

$$T_{ef} ( K ) = (7551 \pm 57) - (2406 \pm 88) (B_T-V_T) \{1 - (0,20 \pm 0,05) [Fe/H]\} \quad (1.14b)$$

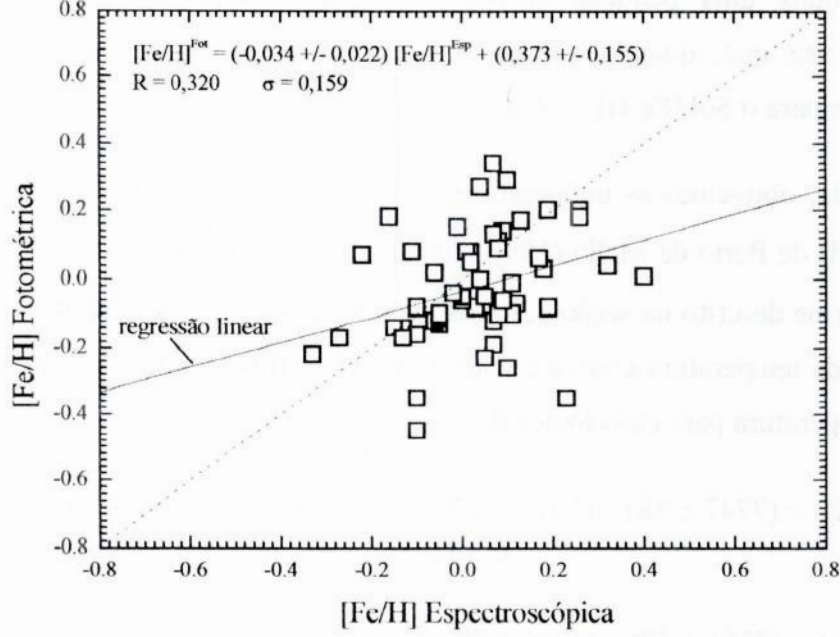
$$\sigma = 64 \text{ K}$$

$$T_{ef} ( K ) = (8124 \pm 58) - (5743 \pm 156) (b-y) \{1 - (0,10 \pm 0,02) [Fe/H]\} \quad (1.14c)$$

$$\sigma = 55 \text{ K}$$

A temperatura efetiva final foi resultante de uma média ponderada das várias temperaturas obtidas em cada uma destas calibrações, onde os pesos considerados foram os valores recíprocos das variâncias em  $T_{ef}$  decorrentes de cada calibração (equações 1.14). Também introduzimos uma pequena correção de ponto zero, de +3 K, na temperatura efetiva média, já que a calibração forneceu para o Sol  $T_{ef} = 5774 \text{ K}$ .

A fim de discutir os erros destas determinações fotométricas de temperatura efetiva e metalicidade, utilizamos um gráfico construído com os resultados espectroscópicos de metalicidade apresentados no capítulo 3. Este gráfico (**Figura 1.3**) mostra valores de  $[Fe/H]$  espectroscópica (a qual foi determinada para uma certa parte da amostra) versus valores de  $[Fe/H]$  fotométrica. Efetuando um teste estatístico chamado *teste de médias*, verificamos quantitativamente que existe um bom acordo entre os dois tipos de determinação de metalicidade (fotométrico e espectroscópico). Este teste compara a média e a dispersão nas medidas de duas amostras de dados e determina se são compatíveis entre si (Hoel 1971).



**Figura 1.3:** Metalicidade espectroscópica versus metalicidade fotométrica. A determinação do valores de  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Esp}}$  é discutida no capítulo 3. A linha pontilhada corresponde à bisettriz.

O erro médio na determinação espectroscópica da metalicidade, que é descrita no **capítulo 3**, é  $\bar{\sigma}[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Esp}} = 0,067 \text{ dex}$ . Aceitando a independência entre as duas determinações, hipótese que não é rigorosamente correta mas que pode ser aceita em primeira aproximação, temos que a relação entre os erros é a seguinte:

$$\left(\bar{\sigma}[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Esp}}\right)^2 + \left(\sigma[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}}\right)^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 = (0,159)^2 \quad (1.15)$$

onde  $\sigma_{\text{obs}}$  é aquele proveniente da regressão linear feita no gráfico da **Figura 1.3**.

Temos, portanto, que o valor estimado do erro nas nossas determinações fotométricas de metalicidade é o seguinte:

$$\sigma[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}} = 0,144 \text{ dex} \quad (1.16)$$

Neste valor, está automaticamente incluído o erro médio observado de  $m_1$  e o próprio erro da calibração  $\delta m_1^{(b-y)}$  versus  $[\text{Fe}/\text{H}]$  (McNamara & Powel 1985). O erro dos valores de  $m_1^{\text{Híades}}$  não é importante, uma vez que consideramos a relação padrão para as Híades (Crawford 1975) apenas como um ponto zero.

O erro na determinação fotométrica de temperatura efetiva foi estimado para uma estrela de parâmetros atmosféricos solares, através das calibrações de cor versus  $T_{\text{ef}}$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  (Porto de Mello 1996, 2000), considerando os erros provocados pelos índices de cor e pelas metalicidades. Nestas calibrações, aumentar os índices de cor e diminuir a metalicidade implica em diminuir a temperatura efetiva determinada, uma vez que estes parâmetros agem em sentidos opostos. Portanto, aplicamos nas calibrações o valor de  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\odot}$ , subtraído do erro na metalicidade fotométrica (equação 1.16), e os valores dos índices de cor solares  $(B-V)^{\odot}$ ,  $(B_T-V_T)^{\odot}$  e  $(b-y)^{\odot}$ , adicionados dos erros internos médios nas determinações das cores das 52 estrelas mais brilhantes (equações 1.11). Feito isto, encontramos um valor de temperatura efetiva 65 K menor do que a temperatura solar e, portanto, este é o erro estimado na determinação fotométrica de  $T_{\text{ef}}$ :

$$\sigma(T_{\text{ef}})^{\text{Fot}} = 65 \text{ K} \quad (1.17)$$

Os valores dos índices de cor  $(B-V)$ ,  $(B_T-V_T)$ ,  $(b-y)$  e  $m_I$  provenientes dos catálogos, os valores do índice  $S_C$  calculados, os valores fotométricos obtidos para  $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$  e para  $[\text{Fe}/\text{H}]$  e os dados de  $M_{V_T}$  estão listados nas 3 próximas tabelas: a **Tabela 1.1a** mostra as 52 estrelas mais brilhantes, com  $V_T \leq 8,0$ ; na **Tabela 1.1b** estão as 68 estrelas mais fracas, com  $8,0 < V_T \leq 9,0$ ; na **Tabela 1.1c** incluímos as duas estrelas extras (HD140690 e HD216436) citadas na seção 1.2, as quais possuem  $M_{V_T}$  ligeiramente fora da caixa  $2\sigma$ , e o caso da estrela que não possui índices de cor  $(b-y)$  e  $m_I$  (HD8291). Estas estrelas foram incluídas porque tiveram oportunidade de observação.

Também incluímos nestas tabelas os valores de magnitude absoluta bolométrica ( $M_{\text{bol}}$ ) de cada estrela, calculados a partir da relação entre a magnitude absoluta  $M_{V_T}$  e a correção bolométrica ( $C_{\text{bol}}$ ):

$$M_{\text{bol}} = M_{V_T} + C_{\text{bol}} \quad (1.18)$$

A correção bolométrica que utilizamos é proveniente da calibração  $T_{\text{ef}}$  versus  $C_{\text{bol}}$  feita por Habets & Heintze (1981), mas modificada para uma que escala fornece para o Sol  $C_{\text{bol}}^{\odot} = -0,07$ . Nesta calibração, utilizamos os valores de temperatura efetiva fotométrica média ( $T_{\text{ef}}^{\text{Fot média}}$ ). No **capítulo 4**, os valores de  $M_{\text{bol}}$  serão recalculados para aquelas estrelas que foram analisadas espectroscopicamente, quando então teremos valores de  $T_{\text{ef}}$  espectroscópica.

**Tabela 1.1a:** Resultados fotométricos para as 52 estrelas da amostra com  $V_T \leq 8,0$ . A  $T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$  foi obtida a partir das várias temperaturas determinadas em cada calibração fotométrica.

Objeto	$V_T$	B-V	$B_T - V_T$	b-y	$m_I$	$S_C$	$T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}}$	$M_{VT}$	$\sigma(M_{VT})$	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD1835	6,5	0,659	0,758	0,422	0,225	4,03	5686	-0,10	4,90	0,05	4,80	0,05
HD4308	6,6	0,655	0,723	0,402	0,198	2,24	5743	-0,17	4,93	0,03	4,84	0,04
HD9986	6,8	0,648	0,720	0,408	0,217	0,22	5785	-0,01	4,79	0,05	4,73	0,06
HD11131	6,8	0,654	0,711	0,403	0,188	4,85	5711	-0,31	4,98	0,22	4,88	0,23
HD13724	8,0	0,667	0,746	0,414	0,228	1,69	5753	0,04	4,78	0,09	4,70	0,10
HD18757	6,7	0,634	0,729	0,417	0,191	5,40	5639	-0,45	4,92	0,05	4,78	0,05
HD19518	7,9	0,642	0,731	0,399	0,203	2,10	5784	-0,08	4,84	0,10	4,78	0,11
HD24293	7,9	0,658	0,727	0,412	0,211	0,58	5724	-0,14	4,79	0,09	4,69	0,10
HD25680	6,0	0,620	0,720	0,397	0,212	3,45	5854	0,05	4,85	0,04	4,82	0,05
HD25874	6,8	0,667	0,747	0,410	0,227	1,06	5774	0,08	4,77	0,03	4,70	0,04
HD28471	8,0	0,650	0,717	0,399	0,210	1,38	5812	0,00	4,79	0,07	4,74	0,08
HD28701	7,9	0,650	0,710	0,402	0,186	5,64	5714	-0,32	4,76	0,07	4,66	0,08
HD28821	7,7	0,683	0,747	0,422	0,205	5,31	5597	-0,35	4,85	0,09	4,69	0,10
HD30495	5,6	0,632	0,710	0,399	0,213	2,18	5844	0,04	4,94	0,03	4,90	0,04
HD32963	7,7	0,664	0,743	0,403	0,237	2,46	5858	0,29	4,92	0,09	4,89	0,10
HD35041	7,7	0,636	0,731	0,395	0,213	2,58	5847	0,08	4,89	0,09	4,86	0,10
HD37773	7,8	0,692	0,746	0,429	0,236	10,90	5656	-0,08	4,90	0,10	4,77	0,11
HD64184	7,6	0,675	0,755	0,420	0,218	3,45	5661	-0,16	4,95	0,06	4,83	0,07
HD66653	7,6	0,655	0,726	0,400	0,222	0,85	5839	0,14	4,80	0,06	4,76	0,06
HD68168	7,4	0,667	0,729	0,419	0,224	2,52	5717	-0,07	4,79	0,09	4,69	0,09
HD70516	7,8	0,652	0,725	0,415	0,222	1,08	5753	-0,04	4,93	0,18	4,85	0,19
HD71334	7,9	0,643	0,746	0,408	0,220	0,39	5782	0,02	4,92	0,08	4,86	0,09
HD73350	6,8	0,655	0,731	0,405	0,224	0,31	5815	0,11	4,95	0,06	4,90	0,07
HD76151	6,1	0,661	0,752	0,410	0,239	2,93	5820	0,23	4,91	0,04	4,87	0,04
HD77006	8,0	0,651	0,707	0,384	0,202	9,07	5867	0,05	4,82	0,10	4,80	0,11
HD86226	8,0	0,647	0,719	0,381	0,204	10,48	5883	0,10	4,85	0,09	4,83	0,10
HD88072	7,6	0,647	0,753	0,404	0,221	0,63	5801	0,08	4,74	0,09	4,71	0,10
HD88084	7,6	0,649	0,712	0,399	0,215	1,33	5835	0,06	4,87	0,07	4,82	0,08
HD98618	7,7	0,642	0,713	0,404	0,208	1,10	5787	-0,07	4,78	0,08	4,72	0,09
HD108575	8,0	0,68	0,745	0,417	0,234	3,37	5745	0,07	4,90	0,33	4,82	0,34
HD112257	7,9	0,665	0,758	0,417	0,223	2,30	5707	-0,05	4,76	0,10	4,66	0,11
HD114174	6,9	0,667	0,757	0,418	0,233	3,72	5737	0,05	4,76	0,06	4,67	0,07
HD117939	7,4	0,669	0,738	0,409	0,208	0,83	5714	-0,13	4,96	0,06	4,86	0,07
HD134664	7,8	0,662	0,739	0,404	0,207	0,76	5746	-0,08	4,83	0,11	4,75	0,12
HD138573	7,3	0,656	0,745	0,413	0,228	1,24	5770	0,05	4,85	0,06	4,75	0,07
HD139777	6,7	0,665	0,723	0,413	0,211	0,95	5715	-0,15	4,94	0,03	4,87	0,04
HD142072	7,9	0,670	0,749	0,420	0,210	3,21	5640	-0,26	4,83	0,10	4,69	0,11
HD145825	6,6	0,646	0,727	0,395	0,228	2,74	5895	0,27	4,93	0,05	4,92	0,06
HD146233	5,6	0,652	0,736	0,400	0,221	0,78	5831	0,13	4,83	0,03	4,79	0,04
HD150248	7,1	0,653	0,740	0,412	0,212	0,52	5723	-0,12	4,83	0,07	4,74	0,08
HD155114	7,6	0,637	0,720	0,396	0,197	4,27	5791	-0,12	4,85	0,08	4,79	0,09

Tabela 1.1a (cont.)

Objeto	$V_T$	B-V	$B_T-V_T$	b-y	$m_I$	$S_C$	$T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}}$	$M_{VT}$	$\sigma(M_{VT})$	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD158222	7,9	0,667	0,727	0,414	0,219	0,99	5733	-0,06	4,83	0,07	4,74	0,08
HD164595	7,1	0,635	0,722	0,404	0,209	1,11	5790	-0,06	4,84	0,05	4,78	0,06
HD187237	7,0	0,660	0,718	0,402	0,215	0,62	5804	0,03	4,88	0,04	4,83	0,05
HD189567	6,1	0,648	0,718	0,399	0,199	2,76	5774	-0,13	4,90	0,03	4,86	0,04
HD189625	7,4	0,654	0,729	0,406	0,232	1,15	5840	0,20	4,74	0,08	4,67	0,09
HD190771	6,3	0,654	0,732	0,406	0,231	1,00	5834	0,18	4,89	0,03	4,85	0,04
HD202628	6,8	0,637	0,710	0,396	0,210	2,83	5845	0,03	4,95	0,05	4,91	0,06
HD207043	7,7	0,660	0,737	0,410	0,228	0,80	5791	0,09	5,01	0,07	4,95	0,08
HD214385	8,0	0,640	0,723	0,403	0,195	3,03	5740	-0,22	4,97	0,10	4,88	0,11
HD218739	7,2	0,658	0,716	0,398	0,212	1,53	5819	0,04	4,86	0,15	4,82	0,16
HD222143	6,7	0,665	0,724	0,402	0,220	0,65	5814	0,09	4,85	0,04	4,80	0,05

Tabela 1.1b: Resultados fotométricos das 68 estrelas da amostra com  $8,0 < V_T \leq 9,0$  e fotometria  $\nu by$ . A  $T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$  foi obtida a partir das várias temperaturas determinadas em cada calibração fotométrica.

Objeto	$V_T$	B-V	$B_T-V_T$	b-y	$m_I$	$S_C$	$T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}}$	$M_{VT}$	$\sigma(M_{VT})$	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD3810	8,8	0,638	0,713	0,396	0,196	4,19	5792	-0,14	4,96	0,16	4,90	0,17
HD6512	8,2	0,656	0,746	0,407	0,224	0,30	5791	0,09	4,81	0,11	4,75	0,12
HD7678	8,3	0,646	0,718	0,399	0,223	1,18	5862	0,17	4,91	0,10	4,88	0,11
HD12264	8,1	0,660	0,736	0,401	0,225	0,84	5833	0,17	4,85	0,12	4,81	0,13
HD15507	8,7	0,670	0,749	0,423	0,240	6,46	5732	0,06	4,87	0,13	4,78	0,14
HD15632	8,1	0,666	0,749	0,413	0,222	0,81	5736	-0,02	4,99	0,11	4,90	0,12
HD17439	8,7	0,668	0,747	0,416	0,237	3,33	5772	0,13	5,00	0,11	4,93	0,12
HD19617	8,8	0,682	0,746	0,430	0,245	11,89	5692	0,01	4,99	0,18	4,88	0,19
HD21543	8,3	0,619	0,713	0,388	0,176	14,44	5780	-0,31	5,00	0,13	4,94	0,14
HD26736	8,1	0,657	0,709	0,407	0,232	1,31	5846	0,19	4,83	0,12	4,79	0,13
HD26767	8,1	0,640	0,724	0,395	0,224	2,41	5888	0,22	4,88	0,16	4,86	0,17
HD27857	8,1	0,657	0,715	0,402	0,213	0,53	5802	0,01	4,81	0,12	4,76	0,13
HD28068	8,1	0,651	0,734	0,409	0,226	0,46	5799	0,09	4,80	0,16	4,74	0,16
HD31130	8,9	0,655	0,730	0,407	0,225	0,32	5807	0,10	4,97	0,14	4,91	0,14
HD34599	8,4	0,660	0,737	0,405	0,222	0,21	5799	0,09	5,00	0,09	4,94	0,10
HD35769	8,7	0,689	0,755	0,412	0,241	4,28	5789	0,24	4,98	0,18	4,92	0,19
HD36152	8,3	0,657	0,752	0,408	0,224	0,37	5780	0,08	4,99	0,12	4,93	0,13
HD41708	8,1	0,626	0,712	0,393	0,208	3,84	5862	0,04	4,85	0,12	4,82	0,13
HD43180	8,4	0,658	0,734	0,390	0,212	4,16	5848	0,12	4,87	0,09	4,83	0,10
HD45346	8,7	0,661	0,738	0,399	0,219	0,95	5820	0,12	4,78	0,11	4,73	0,12
HD75288	8,6	0,673	0,754	0,417	0,243	5,17	5779	0,19	4,75	0,12	4,68	0,13
HD76332	8,6	0,620	0,735	0,405	0,213	0,99	5802	-0,03	4,99	0,16	4,94	0,17
HD78130	8,8	0,674	0,755	0,413	0,236	2,75	5777	0,16	4,85	0,15	4,78	0,16
HD78660	8,4	0,665	0,724	0,406	0,227	0,62	5816	0,14	4,91	0,13	4,86	0,14
HD81700	8,6	0,650	0,733	0,402	0,211	0,53	5787	-0,01	4,89	0,10	4,83	0,11
HD90322	8,8	0,641	0,711	0,404	0,207	0,90	5785	-0,09	4,98	0,17	4,92	0,18

Tabela 1.1b (cont.)

Objeto	$V_T$	B-V	$B_T - V_T$	b-y	$m_1$	$S_C$	$T_{\text{ef Fot}}^{\text{média}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{Fot}}$	$M_{VT}$	$\sigma(M_{VT})$	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD90333	8,4	0,676	0,738	0,404	0,216	0,49	5768	0,02	4,91	0,11	4,84	0,12
HD93215	8,1	0,670	0,758	0,413	0,235	2,50	5774	0,15	4,75	0,11	4,69	0,12
HD98649	8,1	0,658	0,741	0,405	0,227	0,58	5816	0,15	4,91	0,10	4,86	0,11
HD105901	8,3	0,626	0,728	0,395	0,197	4,58	5800	-0,11	4,78	0,12	4,73	0,13
HD110668	8,3	0,672	0,752	0,408	0,223	0,54	5763	0,06	4,74	0,14	4,67	0,15
HD110869	8,1	0,662	0,748	0,414	0,223	0,97	5737	-0,02	4,81	0,09	4,72	0,10
HD110979	8,1	0,654	0,751	0,408	0,214	0,16	5746	-0,05	4,77	0,12	4,69	0,13
HD111069	8,7	0,630	0,720	0,399	0,236	3,17	5921	0,33	4,87	0,19	4,86	0,19
HD111938	8,5	0,632	0,713	0,407	0,207	0,98	5774	-0,12	4,91	0,12	4,84	0,13
HD115231	8,5	0,667	0,756	0,419	0,217	2,29	5671	-0,16	4,86	0,14	4,74	0,15
HD115382	8,5	0,630	0,731	0,408	0,205	1,16	5750	-0,16	4,80	0,16	4,72	0,17
HD118598	8,3	0,652	0,721	0,407	0,213	0,12	5772	-0,05	4,84	0,12	4,77	0,13
HD121205	9,0	0,675	0,756	0,395	0,212	2,61	5791	0,07	4,87	0,18	4,81	0,19
HD123682	8,4	0,690	0,756	0,410	0,209	1,56	5679	-0,14	4,93	0,13	4,81	0,14
HD126267	8,9	0,680	0,743	0,421	0,229	3,97	5700	-0,04	4,83	0,15	4,72	0,16
HD129920	8,3	0,659	0,711	0,409	0,211	0,40	5754	-0,10	4,90	0,08	4,82	0,09
HD133430	8,6	0,669	0,729	0,406	0,196	2,39	5695	-0,25	4,99	0,10	4,88	0,11
HD134702	8,4	0,645	0,716	0,405	0,213	0,28	5794	-0,03	4,91	0,15	4,85	0,16
HD143337	8,1	0,639	0,729	0,406	0,180	7,03	5664	-0,45	4,80	0,14	4,67	0,15
BD+153364	8,7	0,647	0,733	0,411	0,213	1,38	5744	-0,10	4,83	0,16	4,74	0,17
HD153458	8,1	0,652	0,723	0,405	0,216	0,09	5794	0,01	4,85	0,11	4,79	0,12
HD154221	8,7	0,640	0,710	0,402	0,232	1,78	5888	0,25	4,77	0,20	4,75	0,21
HD155968	8,5	0,687	0,752	0,416	0,245	5,96	5782	0,23	4,86	0,15	4,79	0,15
HD157750	8,1	0,670	0,721	0,405	0,231	1,26	5834	0,20	4,88	0,15	4,84	0,16
HD158415	8,4	0,681	0,744	0,406	0,222	0,71	5769	0,08	4,85	0,09	4,78	0,09
HD163441	8,5	0,685	0,750	0,402	0,217	1,14	5767	0,06	4,76	0,14	4,69	0,15
<del>HD163859</del>	<del>8,6</del>	<del>0,660</del>	<del>0,753</del>	<del>0,411</del>	<del>0,213</del>	<del>0,45</del>	<del>5717</del>	<del>-0,10</del>	<del>4,92</del>	<del>0,09</del>	<del>4,82</del>	<del>0,10</del>
HD171226	8,9	0,648	0,720	0,420	0,233	3,70	5767	0,02	4,97	0,18	4,89	0,19
HD181199	8,2	0,656	0,752	0,407	0,199	1,73	5694	-0,22	4,78	0,25	4,67	0,26
HD183579	8,8	0,653	0,727	0,399	0,216	0,90	5824	0,08	4,91	0,16	4,87	0,17
HD188298	8,5	0,657	0,718	0,408	0,229	0,81	5822	0,14	4,92	0,16	4,88	0,17
HD191487	8,6	0,654	0,729	0,390	0,217	4,01	5873	0,19	4,79	0,15	4,77	0,16
HD200633	8,4	0,639	0,728	0,406	0,201	1,46	5741	-0,19	4,76	0,15	4,67	0,16
HD202072	8,2	0,665	0,725	0,399	0,198	2,80	5749	-0,14	4,78	0,12	4,70	0,13
HD204627	8,7	0,610	0,727	0,391	0,196	7,20	5833	-0,09	4,98	0,15	4,94	0,16
HD206772	8,4	0,653	0,709	0,394	0,210	2,77	5842	0,06	4,79	0,09	4,75	0,10
HD209262	8,1	0,687	0,752	0,411	0,225	1,46	5739	0,05	4,77	0,12	4,69	0,13
HD211786	8,1	0,666	0,726	0,394	0,197	4,46	5771	-0,10	4,96	0,10	4,89	0,11
HD214635	8,7	0,672	0,733	0,400	0,211	1,10	5779	0,01	4,91	0,15	4,85	0,16
HD215942	8,1	0,664	0,723	0,404	0,213	0,31	5778	-0,01	4,80	0,10	4,74	0,11
HD221343	8,4	0,657	0,733	0,404	0,235	1,75	5858	0,26	4,84	0,13	4,81	0,14
BD+405199	8,2	0,652	0,731	0,397	0,191	4,77	5742	-0,21	5,01	0,09	4,93	0,10

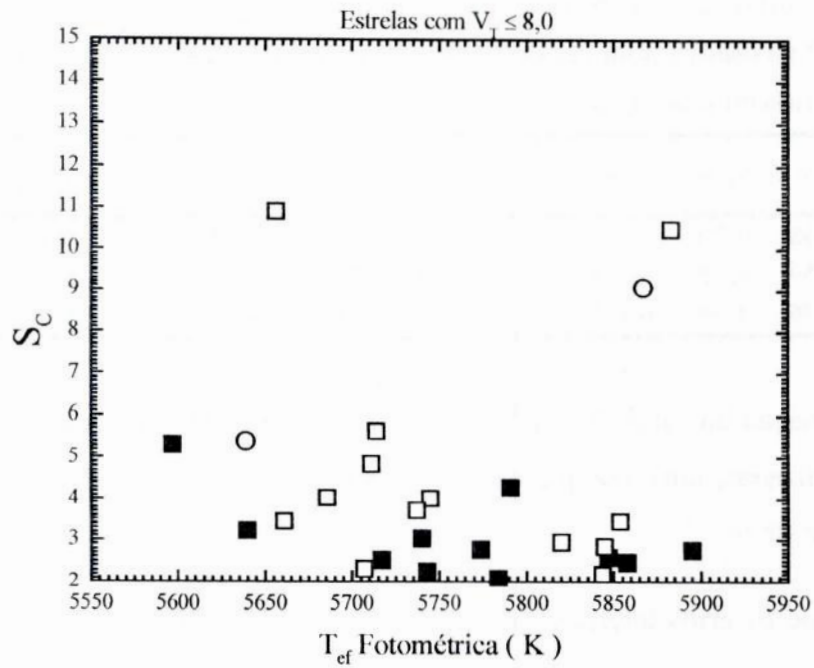
**Tabela 1.1e:** Resultados fotométricos para a estrela observada que não possui cores ( $b-y$ ) e  $m_1$  disponíveis na literatura e para as duas estrelas cujos valores de  $M_{VT}$  encontram-se ligeiramente fora do intervalo de seleção  $4,74 \leq M_{VT} \leq 5,02$ . A  $T_{ef\text{Fot}}^{\text{média}}$  foi obtida a partir das várias temperaturas determinadas em cada calibração fotométrica, sendo que para a estrela HD8291 temos apenas resultados para (B-V) e (B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>).

Objeto	V <sub>T</sub>	B-V	B <sub>T</sub> -V <sub>T</sub>	b-y	m <sub>1</sub>	S <sub>C</sub>	T <sub>efFot</sub> <sup>média</sup> (K)	[Fe/H] <sup>Fot</sup>	M <sub>VT</sub>	σ (M <sub>VT</sub> )	M <sub>bol</sub>	σ (M <sub>bol</sub> )
HD8291	8,7	0,638	0,736	--	--	--	5794	0,00	4,83	0,16	4,78	0,17
HD140690	8,6	0,659	0,729	0,415	0,210	1,19	5699	-0,19	4,73	0,11	4,63	0,12
HD216436	8,7	0,676	0,740	0,415	0,222	1,80	5720	-0,04	4,73	0,11	4,64	0,11

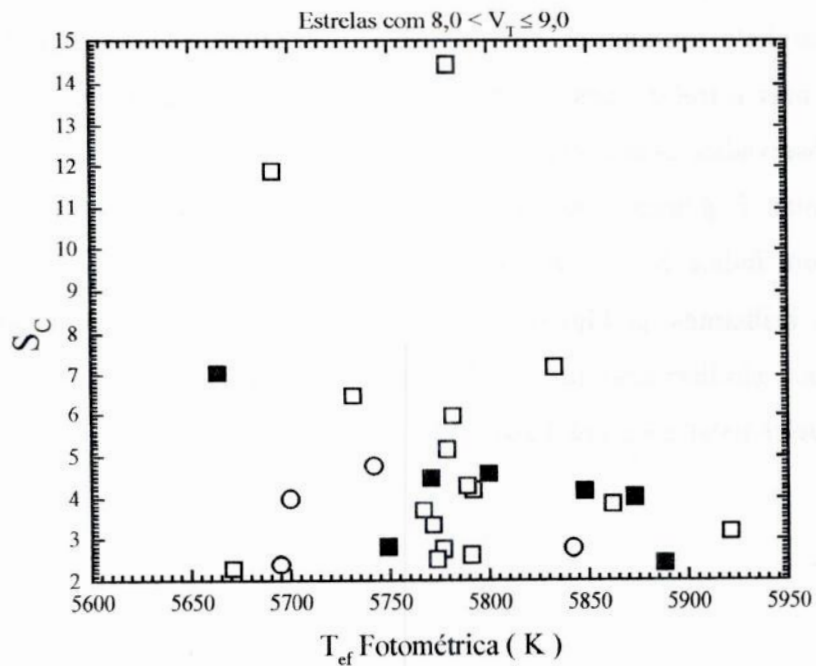
Na determinação inicial de  $T_{ef\text{Fot}}^{\text{média}}$  para a estrela HD8291, adotamos  $[Fe/H] = 0,00$  nas calibrações utilizadas, uma vez que não temos para esta estrela o valor de metalicidade determinada a partir de  $m_1$ .

Uma vez que os erros internos médios da fotometria foram calculados separando as estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ) daquelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ) e que, portanto, os valores do índice  $S_C$  são definidos diferentemente para cada intervalo de magnitude  $V_T$ , construímos dois conjuntos de diagramas de  $T_{ef}$  versus  $S_C$  que mostram separadamente as estrelas mais brilhantes e as estrelas mais fracas.

Nos dois primeiros gráficos a seguir (as estrelas mais brilhantes na **Figura 1.4a** e as mais fracas na **Figura 1.4b**), estão as estrelas com índices  $S_C$  entre 2 e 15, as quais não apresentam similaridade fotométrica com o Sol. Construímos estes dois gráficos a fim de mostrar que algumas estrelas, mesmo não possuindo similaridade fotométrica com o Sol, também foram observadas, com o objetivo de verificar se este tipo de diagrama seleciona as melhores candidatas à gêmea solar. Como veremos no **capítulo 3**, todas as melhores candidatas possuem índice  $S_C < 1,50$ , o que corresponde a limites de  $3\sigma$ . Os outros dois gráficos (as mais brilhantes na **Figura 1.4c** e as mais fracas na **Figura 1.4d**) mostram as estrelas com maior similaridade fotométrica com o Sol ( $S_C < 2,00$ ). Os valores de  $T_{ef}$  utilizados são aqueles mostrados nas **Tabelas 1.1**.

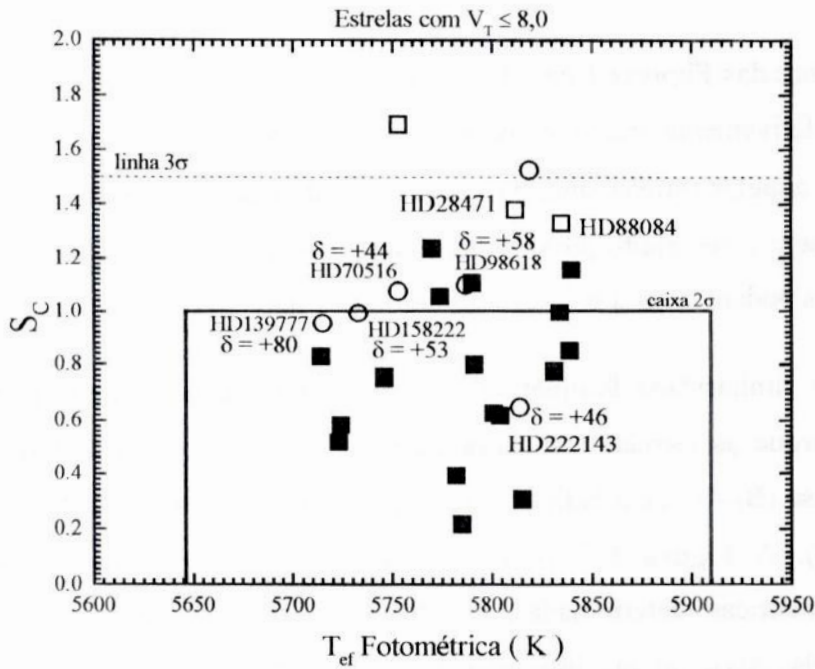


**Figura 1.4a:** Índice de Similaridade de Cor  $S_C$  versus temperatura efetiva fotométrica para as estrelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ), mostrando apenas aquelas cujos valores de  $S_C$  estão entre 2 e 15. As estrelas marcadas com o símbolo (■) tiveram observações espectroscópicas. Aquelas com o símbolo (○) não foram observadas porque são muito boreais.

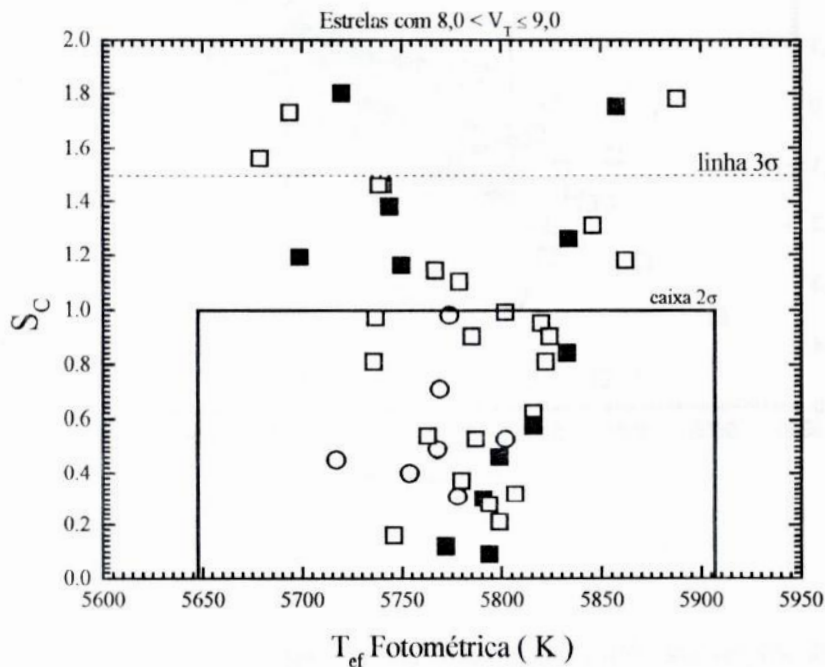


**Figura 1.4b:** O mesmo da Figura 1.4a, mas para as estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ).





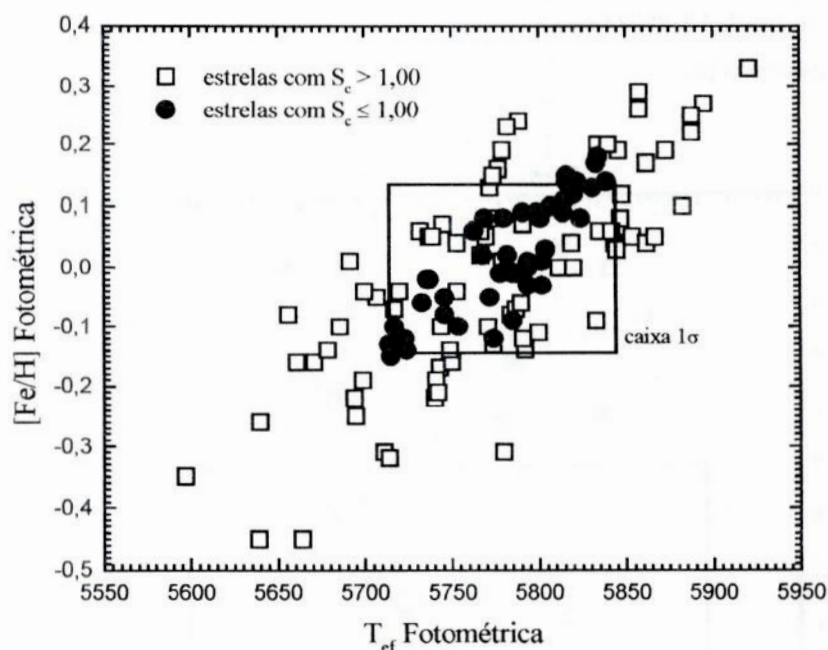
**Figura 1.4c:** Índice de Similaridade de Cor  $S_C$  versus temperatura efetiva fotométrica para as estrelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ), mostrando apenas aquelas cujos índices de cor mais se assemelham com os valores solares ( $S_C < 2,00$ ). Com exceção das estrelas muito boreais, marcadas com o símbolo (O), da estrela HD28471 (não pôde ser observada) e da estrela HD88084 (espectro sub-exposto), vemos que todas aquelas abaixo da linha  $3\sigma$  tiveram observações espectroscópicas.



**Figura 1.4d:** Índice de Similaridade de Cor  $S_C$  versus temperatura efetiva fotométrica para as estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ) e para as duas estrelas extras (HD140690 e HD216436). Mostramos aquelas estrelas cujas cores mais se assemelham com os valores solares ( $S_C < 2,00$ ). Símbolos: os mesmos da Figura 1.4a.

Nos diagramas das **Figuras 1.4c e 1.4d**, além daquelas estrelas que têm os parâmetros espectroscópicos efetivamente muito parecidos com os parâmetros solares, também estão dentro da caixa  $2\sigma$  aquelas estrelas que, por alguma combinação fortuita entre temperatura e metalicidade, possuem cores muito próximas das cores solares, uma vez que combinações de parâmetros estelares podem levar a índices fotométricos semelhantes aos do Sol.

O índice de similaridade fotométrica  $S_C$  tem a capacidade de melhor selecionar as candidatas. Isto porque as estrelas até agora foram selecionadas considerando apenas um índice de cor, no caso  $(B_T - V_T)$ , e o índice  $S_C$  considera todos as cores simultaneamente ( $B - V$ ,  $B_T - V_T$ ,  $b - y$  e  $m_I$ ). A **Figura 1.5** mostra um gráfico de temperaturas efetivas versus metalicidades fotométricas determinadas, construído com os valores das **Tabelas 1.1**, enfatizando as estrelas cujos valores de  $S_C$  são menores que 1,00 (limite  $2\sigma$ ).



**Figura 1.5:** Diagrama de temperatura efetiva versus metalicidade fotométricas. Aqui vemos que as estrelas com os menores valores do índice de similaridade fotométrica  $S_C$  (maior similaridade com o Sol) encontram-se todas dentro ou muito próximas da caixa  $1\sigma$  em  $T_{ef}$  e  $[Fe/H]$ .

Nesta figura, apesar de ainda aparecerem os casos de estrelas com uma certa combinação de temperatura efetiva e metalicidade que simula índices de cor semelhantes às cores do Sol, conforme visto pela correlação entre  $T_{\text{ef}}$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , vemos que o índice de similaridade  $S_C$  foi muito mais eficiente do que a seleção anterior (baseada em  $M_{\text{VT}}$  e  $B_{\text{T}}-V_{\text{T}}$ ) em selecionar as estrelas com temperatura efetiva e metalicidade mais próximas dos valores solares. Mais adiante discutiremos que, pelo menos para as estrelas com  $V_{\text{T}} \leq 8,0$ , este índice mostra boa capacidade de identificar estrelas com parâmetros atmosféricos muito parecidos com os parâmetros do Sol.

## CAPÍTULO 2

### OBSERVAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS E REDUÇÕES

#### 2.1 - Observações

##### 2.1.1 - Especificações Técnicas

Realizamos observações espectroscópicas com o espectrógrafo *coudé* do telescópio de 1,60 m do Observatório do Pico dos Dias (OPD, Brasópolis), operado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/CNPq), e os espectrógrafos *cassegrain* Boller & Chivens e *echelle* FEROS do telescópio de 1,52 m do European Southern Observatory (ESO, Chile).

Para os espectros OPD/LNA utilizamos uma câmara CCD de 1.024 x 1.024 pixels (pixel de 24  $\mu\text{m}$ ) e uma rede de 1.800  $l/mm$  em primeira ordem direta. Com uma fenda de 250  $\mu\text{m}$  (o que corresponde a uma projeção sobre 2,4 pixels) e uma dispersão linear de 0,13  $\text{\AA}/\text{pixel}$ , tivemos um poder resolutor de aproximadamente  $R = 20.000$  ( $R = \lambda/\Delta\lambda$ ). O objetivo foi obter uma relação sinal/ruído (S/R) da ordem de 100 ou superior. Usando o espectrógrafo Boller & Chivens fizemos observações de algumas estrelas na região do ultravioleta, de 3600  $\text{\AA}$  a 4500  $\text{\AA}$ . A resolução destes espectros é da ordem de 1  $\text{\AA}$ . O espectrógrafo FEROS é do tipo *echelle* de bancada, alimentado a fibra óptica e com o instrumento conhecido como *image slicer*, que direciona várias “fatias” da imagem para uma única fenda; estas características tornam este espectrógrafo excepcionalmente estável e eficiente. Sua cobertura espectral vai de 3560  $\text{\AA}$  a 9200  $\text{\AA}$ . O CCD utilizado possui 2.048 x 4.096 pixels (pixel de 15  $\mu\text{m}$  – amostragem de 0,03  $\text{\AA}/\text{pixel}$ ) e o poder resolutor nominal é aproximadamente  $R = 48.000$ . No entanto, por questões de homogeneidade entre as estrelas da amostra, fizemos uma degradação da amostragem dos espectros FEROS, através de um *binning* de fator 4 na direção da dispersão. Deste modo, a amostragem mudou de 0,03  $\text{\AA}/\text{pixel}$  para aproximadamente 0,12  $\text{\AA}/\text{pixel}$  e o poder resolutor real assim obtido é da ordem de  $R = 30.000$ , calculado a partir de medidas de FWHM (*Full Width Half Maximum* – largura a meia altura de um perfil gaussiano) feitas em Ganimedes, que é um objeto representativo do espectro solar. Com a execução do *binning*, a relação S/R dos espectros FEROS melhora.

### 2.1.2 - Estrelas Observadas

Baseados no fato de serem muitos os objetos selecionados com magnitude aparente entre 8,0 e 9,0, e considerando os erros maiores na determinação de seus parâmetros fotométricos, visamos observar sistematicamente apenas as estrelas mais brilhantes que  $V_T = 8,0$ . Entre aquelas 52 estrelas que satisfazem este critério e com exceção de 5 que são muito boreais, observamos espectroscopicamente todas as estrelas que se encontram dentro da caixa  $2\sigma$  em  $S_C$ , mostrado na **Figura 1.4c**, e mais algumas fora da caixa  $2\sigma$ , o que resultou na observação de 29 estrelas. Entre as 68 estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ) da **tabela 1.1b**, pudemos observar 17. Juntamente com as 3 estrelas da **tabela 1.1c**, temos um total de 49 estrelas observadas espectroscopicamente.

Realizamos 5 missões de observação no OPD/LNA (setembro/97, julho/98, setembro/98, abril/99 e outubro/99), envolvendo 2 regiões: a região de  $\lambda 6070$  a  $\lambda 6220$  ( $\lambda_C 6145$ ) possui contínuo acessível, é livre de linhas telúricas e é excelente para se obter abundância do ferro utilizando linhas do Fe I e Fe II; entre  $\lambda 6485$  a  $\lambda 6630$  está a linha H $\alpha$  ( $\lambda 6563$ ), cujo centro é ótimo indicador do nível de atividade cromosférica da estrela (Pasquini & Pallavicini 1991) e cujas asas são muito sensíveis à temperatura efetiva, mas pouco sensíveis à metalicidade e à gravidade superficial (Fuhrmann et al. 1993 e Gehren 1981)

As observações no UV (Boller & Chivens), realizadas pelo Dr. Licio da Silva (CNPq/Observatório Nacional – ON) ocorreram em duas missões (setembro/97 e outubro/98). A faixa do ultravioleta abaixo de  $\lambda 4000$  é a mais sensível para discriminar análogas solares, pois as absorções atômicas e moleculares nas estrelas de tipo G estão localizadas principalmente nesta região (Dragon & Mutschlecner 1980). Nesta região está presente a banda CN em  $\lambda 3860$ , que é muito sensível aos parâmetros atmosféricos, e as linhas H e K do Ca II (respectivamente  $\lambda 3969$  e  $\lambda 3934$  Å), que também são excelentes indicadoras de atividade cromosférica (Henry et al. 1996, Pasquini 1992 e Duncan et al. 1991).

Com o espectrógrafo FEROS foram observadas 15 estrelas, também pelo Dr. Licio da Silva (CNPq/ON), em um total de 3 missões (janeiro/99, setembro/99 e dezembro/99). Os espectros FEROS, devido à alta cobertura e ao alto poder resolutor, contém uma imensa quantidade de informação: neles também está contida a região do UV, que foi observada com espectrógrafo Boller & Chivens; possuem a região do infravermelho onde estão as 3 linhas do

triplete do Mg (aproximadamente em  $\lambda 8520$ ), das quais também se pode obter informações sobre o nível de atividade cromosférica de uma estrela. Entretanto, em nossa análise desses espectros para este trabalho, tivemos a oportunidade de usar apenas a região entre  $\lambda 6070$  e  $\lambda 6220$  (comprimento de onda central  $\lambda 6145$ ). A região da linha  $H\alpha$  nos espectros FEROS não é muito confiável, uma vez que os espectros *echelle* obtidos possuem função de *blaze* (função instrumental) muito intensa, devido ao uso de ordens muito altas, o que deforma o perfil de  $H\alpha$  que é muito largo.

É importante nos certificarmos da homogeneidade dos dados obtidos em missões em diferentes locais ou de diferentes datas em um mesmo local. Por este motivo, algumas das estrelas da amostra foram observadas mais de uma vez e usadas como objetos de controle com o intuito de comparar os resultados finais obtidos nestes diferentes casos. Nas observações feitas no OPD/LNA é onde se encontra a maior parte das estrelas da amostra; nestas missões observamos mais de uma vez os objetos HD73350, HD146233 (HR6060) e HD189625. Para as comparações entre as missões no OPD/LNA e as missões FEROS, usamos 7 estrelas que tiveram observações nestes dois locais: HD19518, HD66653, HD73350, HD146233, HD98649, HD105901 e HD115382.

Listamos todas as estrelas observadas espectroscopicamente nas **Tabelas 2.1a** (estrelas com  $V_T \leq 8,0$ ) e **2.1b** (estrelas com  $8,0 < V_T \leq 9,0$  incluindo aquelas da **Tabela 1.1c**), os locais de observação e os valores da relação S/R estimadas para a região de  $\lambda 6145$ . As relações S/R médias dos espectros em  $\lambda 6145$  são  $\langle S/R \rangle_{\text{OPD/LNA}} = 130$  e  $\langle S/R \rangle_{\text{FEROS}} = 420$ . Foram excluídos da média os espectros das poucas estrelas com número HR (BSC), que são as mais brilhantes. Nas regiões  $\lambda 6563$  e UV não estão disponíveis boas janelas de contínuo para estimarmos a relação S/R.

O tempo de exposição dos espectros observados no OPD/LNA é de 900 s para todos os objetos, variando apenas o número de imagens de 1 a 6 para objetos mais brilhantes e mais fracos, respectivamente (com exceção de Io, com 1 imagem de 180 s e do céu diurno 8 imagens para  $\lambda 6563$  e 15 imagens para  $\lambda 6145$ , ambas de 30 s). Para os espectros FEROS, o tempo de exposição variou de 300 s a 1800 s, com no máximo 2 exposições. Por fim, o tempo de exposição dos espectros observados no ESO variou de 60 s a 1200 s, com 2 a 6 imagens por objeto. O objetivo foi obter níveis de contagem semelhantes entre os objetos.

**Tabela 2.1a:** As 29 estrelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ) observadas, juntamente com o local de observação e uma estimativa da relação S/R para os espectros em  $\lambda 6145$ . Vemos que a maioria das estrelas observadas no OPD/LNA em  $\lambda 6145$  possuem relação S/R ainda maior do que o valor 100 esperado.

Objeto	Fonte	Região	S/R
HD4308	OPD set/98	$\lambda 6145$	280
		$\lambda 6563$	–
	ESO out/98	UV	–
HD9986	ESO set/99	FEROS	220
HD13724	OPD jul/98	$\lambda 6145$	70
		$\lambda 6563$	–
	ESO set/97	UV	–
HD19518	OPD jul/98	$\lambda 6145$	120
		ESO out/98	UV
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	450
HD24293	OPD set/97	$\lambda 6145$	60
		OPD jul/98	$\lambda 6563$
		ESO set/97	UV
HD25874	OPD out/99	$\lambda 6145$	170
		$\lambda 6563$	–
HD28821	OPD set/98	$\lambda 6145$	80
		$\lambda 6563$	–
	ESO out/98	UV	–
HD32963	ESO out/98	UV	–
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	410
HD35041	ESO out/98	UV	–
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	250
HD37773	ESO out/98	UV	–
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	610
HD66653	OPD abr/99	$\lambda 6145$	130
		ESO out/98	UV
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	560
HD68168	ESO set/97	UV	–
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	630
HD71334	ESO out/98	UV	–
		ESO jan/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	660
HD73350	OPD jul/98	$\lambda 6145$	110
		$\lambda 6563$	–
		$\lambda 6145$	180
	OPD abr/99	$\lambda 6563$	–
	ESO jan/99	FEROS	700

Objeto	Fonte	Região	S/R
HD88072	ESO dez/99	FEROS	250
HD117939	OPD jul/98	$\lambda 6145$	140
		$\lambda 6563$	–
HD134664	OPD jul/98	$\lambda 6145$	100
		$\lambda 6563$	–
HD138573	OPD set/98	$\lambda 6145$	130
		OPD abr/99	$\lambda 6563$
	OPD abr/99	$\lambda 6563$	–
HD142072	OPD set/98	$\lambda 6145$	120
		OPD abr/99	$\lambda 6563$
	OPD abr/99	$\lambda 6563$	–
HD145825	OPD jul/98	$\lambda 6145$	180
		$\lambda 6563$	–
		$\lambda 6145$	340
	OPD set/97	$\lambda 6563$	–
HD146233 (HR6060)	OPD jul/98	$\lambda 6145$	280
		$\lambda 6563$	–
		ESO set/97	UV
	ESO set/99	FEROS	380
HD150248	OPD jul/98	$\lambda 6145$	180
		$\lambda 6563$	–
HD155114	OPD abr/99	$\lambda 6145$	140
		$\lambda 6563$	–
	ESO out/98	UV	–
HD164595	OPD abr/99	$\lambda 6145$	190
		$\lambda 6563$	–
HD187237	ESO set/99	FEROS	100
		OPD set/97	$\lambda 6145$
	OPD set/97	$\lambda 6145$	120
HD189625	OPD jul/98	$\lambda 6145$	150
		$\lambda 6563$	–
		ESO set/97	UV
	ESO set/97	UV	–
HD190771 (HR7683)	OPD set/97	$\lambda 6145$	290
		$\lambda 6563$	–
	ESO set/97	UV	–
HD207043	OPD out/99	$\lambda 6145$	130
		$\lambda 6563$	–
HD214385	OPD abr/99	$\lambda 6145$	120
		ESO out/98	UV
	ESO out/98	UV	–

**Tabela 2.1b:** As 17 estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ) observadas, as 2 estrelas extras e aquela que não possui fotometria Strömgen, juntamente com o locais de observação e uma estimativa da relação S/R para os espectros em  $\lambda 6145$ . Aqui também vemos que a maioria das estrelas observadas no OPD/LNA em  $\lambda 6145$  possui relação S/R ainda maior do que o valor 100 esperado.

Objeto	Fonte	Região	S/R
HD6512	ESO out/98	UV	–
HD8291	OPD jul/98	$\lambda 6145$	90
	ESO out/98	$\lambda 6563$	–
HD12264	OPD jul/98	$\lambda 6145$	80
	ESO set/97	$\lambda 6563$	–
HD26767	ESO out/98	UV	–
HD28068	ESO out/98	UV	–
HD43180	ESO out/98	UV	–
HD98649	OPD jul/98	$\lambda 6145$	120
	ESO jan/99	$\lambda 6563$	–
HD105901	OPD jul/98	FEROS	420
	ESO jan/99	$\lambda 6145$	110
HD115382	OPD jul/98	$\lambda 6563$	–
	ESO jan/99	FEROS	330
HD118598	OPD jul/98	$\lambda 6145$	140
	OPD abr/99	$\lambda 6563$	–
HD140690	OPD jul/98	$\lambda 6145$	130
	ESO set/97	UV	–
HD143337	OPD jul/98	$\lambda 6145$	110

Objeto	Fonte	Região	S/R
HD143337	OPD jul/98	$\lambda 6563$	–
	ESO jan/99	UV	–
BD+153364	OPD jul/98	$\lambda 6145$	110
	OPD jul/98	$\lambda 6563$	–
HD153458	OPD set/98	$\lambda 6145$	140
	OPD set/98	$\lambda 6563$	–
HD157750	OPD abr/99	$\lambda 6145$	110
	ESO jan/99	$\lambda 6563$	–
HD191487	OPD set/97	UV	–
	ESO set/97	$\lambda 6145$	100
HD202072	OPD set/97	$\lambda 6563$	–
	ESO set/97	UV	–
HD211786	OPD jul/98	$\lambda 6145$	90
	ESO out/98	$\lambda 6563$	–
HD216436	OPD jul/98	UV	–
	ESO out/98	$\lambda 6145$	130
HD221343	OPD jul/98	$\lambda 6563$	–
	ESO out/98	UV	–
HD216436	OPD jul/98	$\lambda 6145$	70
	ESO set/97	$\lambda 6563$	–
HD221343	OPD set/97	UV	–
	ESO set/97	$\lambda 6145$	50
HD221343	OPD set/97	$\lambda 6563$	–
	ESO set/97	UV	–

### 2.1.3 - Objetos de Referência

Os espectros na região de  $H\alpha$  e do UV foram analisados após serem divididos por algum objeto que representasse o espectro do Sol. Normalmente são usados alguns satélites de Júpiter para tal comparação, em especial Ganimedes (Hardorp 1982), tipicamente o satélite mais brilhante.





No ESO (com os espectrógrafos Boller & Chivens e FEROS) foram observados Ganimedes, Europa e Calisto; no OPD/LNA, além do céu diurno, tivemos a oportunidade de observar os quatro satélites galileanos: Ganimedes, Europa, Calisto e Io (observado apenas na região de H $\alpha$ ). O nosso interesse em observar outros satélites além de Ganimedes está em verificar se os mesmos também são bons representantes do espectro do Sol, uma vez que Ganimedes não está sempre em condições de observação.

Deve ser lembrado, no entanto, que a luz solar espalhada por estes pequenos corpos do sistema solar pode representar bem o Sol somente em limitadas partes do espectro, devido a efeitos do albedo destes corpos que pode enfraquecer bandas de absorção solares intensas ou intensificar bandas de absorção fracas (Hardorp 1981). A refletância particular destes corpos distorce grandemente cores de banda larga, tais como (B-V) e (B<sub>T</sub>-V<sub>T</sub>), o que não ocorre com estruturas espectrais estreitas em intervalos da ordem de 100 Å a 200 Å, ou menos. Como outro exemplo, estes objetos possuem largas bandas de absorção mineral na região do infravermelho e não devem ser usados como representantes do Sol nesta parte do espectro. Colocamos estes objetos e os locais onde foram observados na **Tabela 2.2**.

**Tabela 2.2:** Os objetos de referência observados, juntamente com o locais de observação e os valores de S/R estimados para a região  $\lambda 6145$ .

Objeto	Fonte	Região	S/R	Objeto	Fonte	Região	S/R	
Ganimedes	OPD jul/98	$\lambda 6145$	250	Calisto	ESO set/97	UV	-	
		$\lambda 6563$	-			Europa	OPD jul/98	$\lambda 6145$
	OPD out/99	$\lambda 6145$	110		$\lambda 6563$			-
		ESO set/97	$\lambda 6563$		-		ESO set/97	UV
	ESO out/98		UV		-		ESO set/99	FEROS
	ESO jan/99	FEROS	220		Io	OPD jul/98	$\lambda 6563$	-
Calisto	OPD jul/98	$\lambda 6145$	440	Céu diurno	OPD set/97	$\lambda 6145$	370	
		$\lambda 6563$	-			$\lambda 6563$	-	
					ESO jan/99	FEROS	190	

## 2.2 - Reduções

Para efetuar o tratamento das imagens de cada estrela observada, dos objetos de referência (Ganimedes, Europa, Calisto e Io) e do céu diurno, também fizemos imagens de *bias* e *flat-field* nas missões no OPD/LNA e nas missões onde foi usado o espectrógrafo Boller & Chivens.

O processo de redução das imagens (das estrelas, dos objetos de referência e do céu diurno) obtidas no OPD/LNA foi feito utilizando tarefas do pacote *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF). Nas imagens bidimensionais executamos um corte (*trimming*), com o objetivo de selecionar as seções úteis da imagem. Em seguida, as imagens estelares e dos outros objetos foram subtraídas do *bias* e divididas pelo *flat-field*. O próximo passo realizado foi ajustar polinômios fora do perfil de cada imagem, a fim de subtrair a luz espalhada e o fundo de céu da mesma. Após isto, as imagens bidimensionais puderam ser transformadas em espectros unidimensionais.

Com os espectros extraídos, criamos uma escala de comprimentos de onda para cada objeto, usando como referência uma lista de linhas contidas nos espectros, criada com base no espectro de Ganimedes (OPD jul/98), tanto para a região de  $\lambda 6145$  quanto para a região de  $\lambda 6563$ . Estas linhas foram selecionadas com o auxílio do atlas de fluxo solar de Kurucz et al. (1984), o qual daqui em diante será referido como Atlas Solar, e do catálogo do espectro solar de Moore et al. (1966), que daqui em diante será referido como Catálogo Solar.

Finalmente, executamos a correção do deslocamento *doppler* de cada espectro, devido à velocidade radial da estrela em relação ao observador, sempre usando como referência o espectro de Ganimedes da missão OPD/LNA de julho de 1998, o qual foi arbitrariamente considerado como escala de comprimento de onda em referencial de repouso.

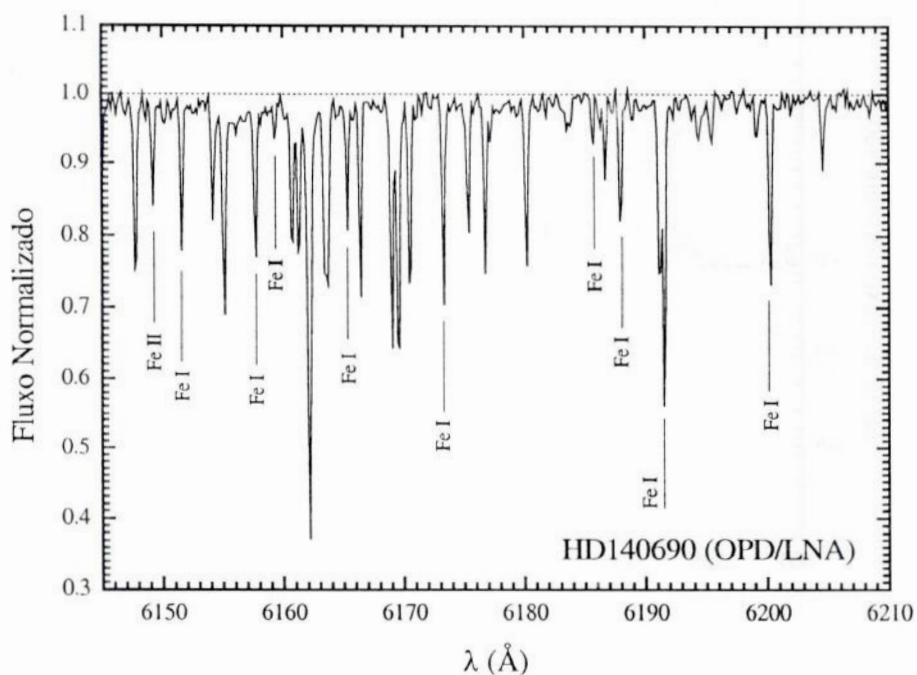
Analogamente ao que foi feito com os espectros OPD/LNA, os espectros Boller & Chivens do ESO também passaram pelo processo de redução, realizado pelo Dr. Licio da Silva (CNPq/ON), mas utilizando o pacote *Munich Image Data Analysis System* (MIDAS – ESO). Os espectros FEROS são pré-reduzidos, isto é, um programa de redução é acoplado à saída do sistema telescópio-detector e os espectros já saem unidimensionais e em escala de comprimento de onda.

### 2.3 - Normalização do Contínuo

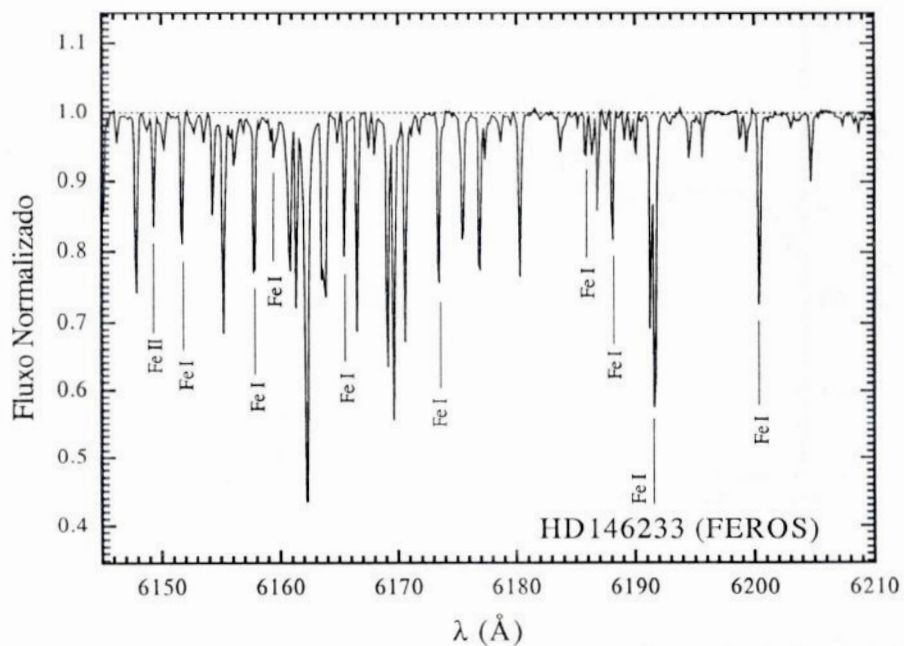
Utilizando um pacote computacional (Magalhães & da Silva 1990) e com o auxílio do Atlas Solar e do Catálogo Solar, selecionamos em cada espectro algumas janelas e pontos que estivessem livres de linhas, a fim de determinar a posição do contínuo aparente. Em seguida, aplicamos o método dos mínimos quadrados, ajustando um polinômio aos pontos selecionados. Os espectros foram então divididos pelo polinômio e o fluxo no contínuo aparente é colocado no valor unitário. Isto foi feito para a região de  $\lambda 6145$  dos espectros OPD/LNA e FEROS (**Figuras 2.1a e 2.1b**) e do ultravioleta dos espectros Boller & Chivens.

Os espectros normalizados das estrelas observadas na região do UV (missão ESO set/97) foram divididos pelo espectro de Ganimedes da missão ESO set/97, também normalizado. As estrelas da missão ESO out/98 tiveram seus espectros normalizados e divididos pelo espectro de Ganimedes da missão ESO out/98 (**Figuras 2.2a e 2.2b**). Com os espectros de razão, podemos verificar as diferenças, ou semelhanças, na banda CN e nas linhas H e K do Ca II que existem entre uma certa estrela e o Sol, representado pelo espectro de Ganimedes. Nestes espectros divididos, realizamos um *binning* na direção da dispersão, a fim de melhorar a relação S/R dos espectros e também poder analisar mais facilmente as características globais da banda CN. A dispersão final foi então de  $5 \text{ \AA}/\text{pixel}$ .

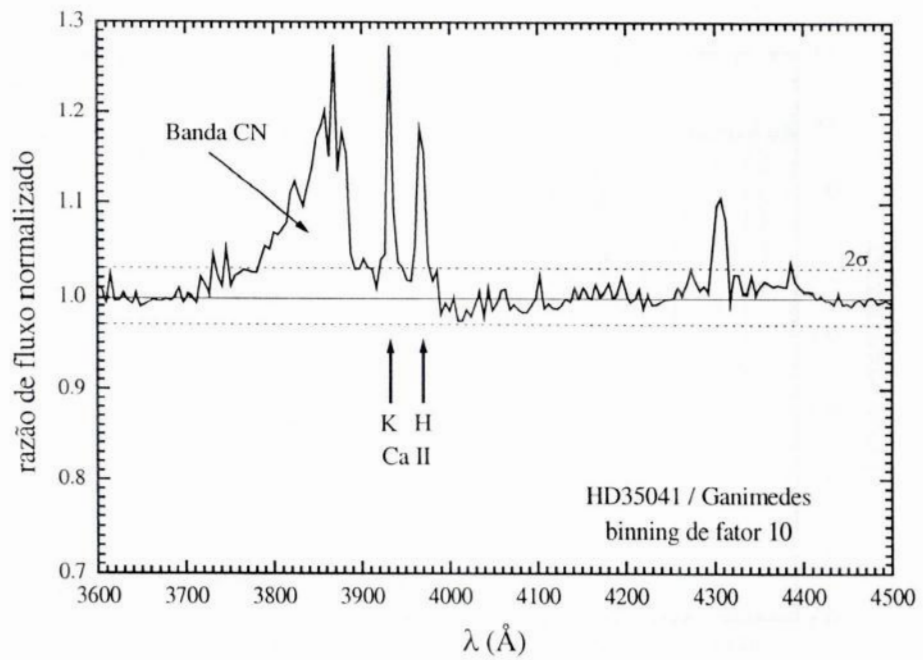
Na região da linha  $H\alpha$ , a cobertura espectral não era grande o suficiente para selecionarmos boas janelas de contínuo e, portanto, não aplicamos rigorosamente o procedimento de normalização. Trabalhamos com os espectros de razão, dividindo os espectros das estrelas pelo de Ganimedes não normalizados, um procedimento que leva a resultados aceitáveis para os nossos objetivos.



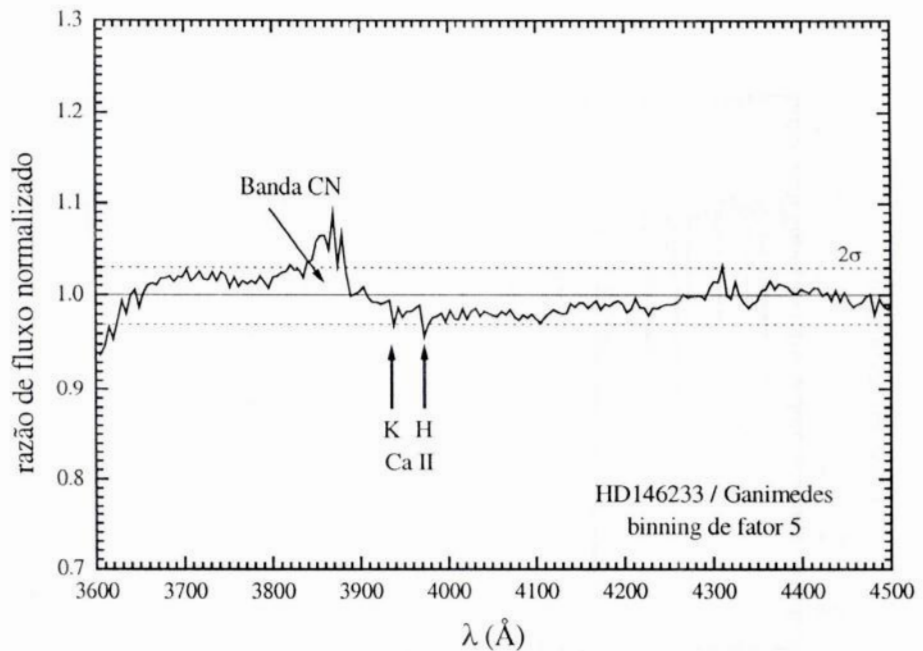
**Figura 2.1a:** Exemplo de espectro (HD140690, OPD/LNA jul/98) normalizado na região de comprimento de onda central  $\lambda$ 6145, mostrando algumas linhas de Fe I e Fe II que utilizamos para determinar a metalicidade em cada estrela observada nesta região.



**Figura 2.1b:** O mesmo da Figura 2.1a, mas para a estrela HD146233 observada com o FEROS.



**Figura 2.2a:** Exemplo de espectro (HD35041 dividido por Ganimedes, OPD/LNA jul/98) normalizado na região do ultravioleta, mostrando as linhas H e K do Ca II e a banda CN.



**Figura 2.2b:** Exemplo de espectro (HD146233, OPD/LNA set/98, dividido por Ganimedes, OPD/LNA jul/98) normalizado na região do ultravioleta, mostrando as linhas H e K do Ca II e a banda CN.

## 2.4 - Medidas de Largura Equivalente

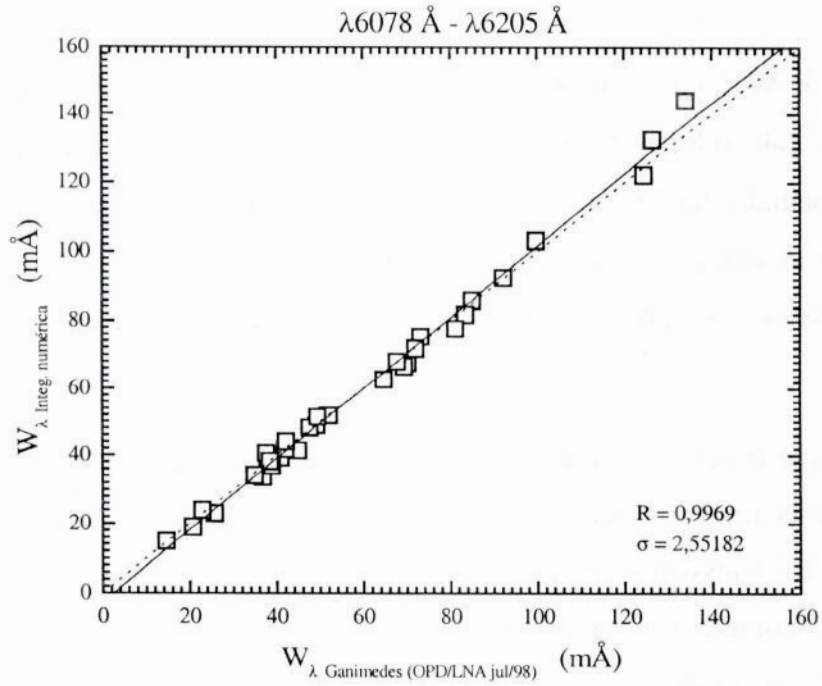
Na região de  $\lambda 6145$ , fizemos uma seleção de linhas do Fe I e do Fe II baseando-nos no Atlas Solar e no Catálogo Solar, para as quais medimos larguras equivalentes ( $W_\lambda$ ) usadas na determinação da abundância do ferro. Também medimos algumas linhas de outros elementos (Ni, Si, Ba, Na e Ca), mas para estes não determinamos abundâncias. As larguras equivalentes são medidas através de um ajuste gaussiano no perfil da linha, tomando o contínuo como referência.

Sabemos que o perfil de uma linha de absorção é modelado pela função de Voigt (convolução de uma função lorentziana com um função gaussiana) e que o seu centro é dominado pelo perfil gaussiano, enquanto que nas suas asas predomina o perfil lorentziano. As linhas intensas começam a desenvolver asas e, portanto, o perfil lorentziano começa a atuar. Por este motivo, escolhemos linhas nem muito fracas e nem muito intensas, pois linhas muito fracas são excessivamente afetadas por incertezas na determinação do contínuo e linhas muito intensas começam a apresentar perfil não-gaussiano.

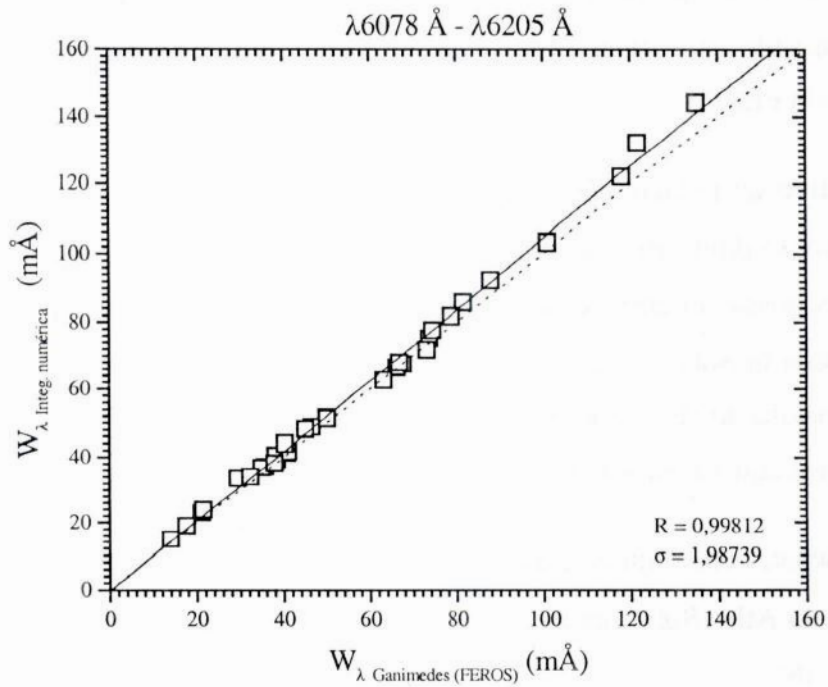
Todas as medidas de larguras equivalentes realizadas em  $\lambda 6145$  estão listadas no **Apêndice 1**, separando as estrelas observadas no OPD/LNA daquelas estrelas observadas com o espectrógrafo FEROS.

Com objetivo de reduzir possíveis erros sistemáticos gerados nas nossas medidas e permitir a comparação direta entre missões diferentes ou com outros autores, realizamos uma transformação das nossas larguras equivalentes para a escala de Meylan et al. (1993). Esta escala foi construída ajustando funções de Voigt aos perfis observados no Atlas Solar, que possui altíssima resolução ( $R > 500.000$ ) e relação S/R em torno de 3.000, possibilitando a obtenção de larguras equivalentes muito próximas do seu valor verdadeiro.

Primeiramente, construímos duas relações: entre as  $W_\lambda$  de Ganimedes (OPD/LNA e FEROS) e as  $W_\lambda$  do Atlas Solar obtidas por integração numérica direta dos perfis das linhas (**Figuras 2.3a e 2.3b**).



**Figura 2.3a:** Calibração entre os valores de  $W_{\lambda}$  de Ganimedes (OPD/LNA) versus  $W_{\lambda}$  obtidas por integração numérica a partir do Atlas Solar.



**Figura 2.3b:** Calibração entre os valores de  $W_{\lambda}$  de Ganimedes (FEROS) versus  $W_{\lambda}$  obtidas por integração numérica a partir do Atlas Solar.

As regressões lineares das **Figuras 2.3a** e **2.3b** fornecem as seguintes correlações:

$$W_{\lambda \text{ Integ. numérica}} = 1,041 W_{\lambda \text{ Ganimedes (OPD/LNA jul/98)}} - 2,533 \text{ (m\AA)} \quad (2.1a)$$

$$W_{\lambda \text{ Integ. numérica}} = 1,046 W_{\lambda \text{ Ganimedes (FEROS)}} - 0,323 \text{ (m\AA)} \quad (2.1b)$$

Uma outra calibração, entre as  $W_{\lambda}$  do Atlas Solar obtidas por integração numérica e as  $W_{\lambda}$  obtidas por ajuste de funções de Voigt, foi realizada por Porto de Mello (1996), que verificou excelente acordo entre as duas medidas. A correlação por ele obtida foi a seguinte:

$$W_{\lambda \text{ Voigt}} = 1,014 W_{\lambda \text{ Integ. numérica}} + 0,3 \text{ (m\AA)} \quad (2.2)$$

Aplicando as equações **2.1a** e **2.1b** na equação **2.2**, obtemos as transformações finais para larguras equivalentes medidas:

$$W_{\lambda \text{ Voigt}} = 1,05 W_{\lambda \text{ Ganimedes (OPD/LNA jul/98)}} \quad (2.3a)$$

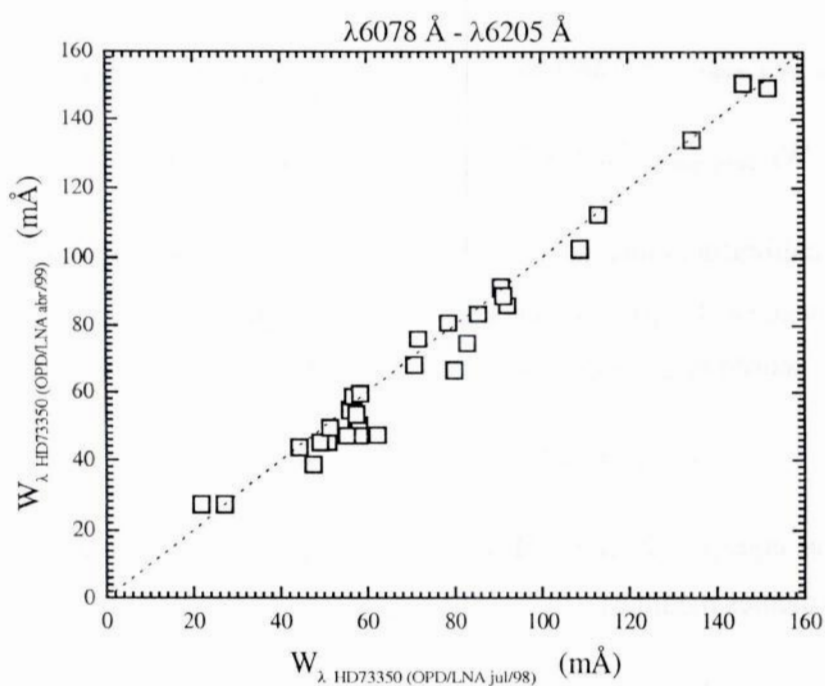
$$W_{\lambda \text{ Voigt}} = 1,06 W_{\lambda \text{ Ganimedes (FEROS)}} \quad (2.3b)$$

onde desprezamos os coeficientes lineares, um vez que não possuem significância estatística. Tal resultado para as  $W_{\lambda}$  medidas no OPD/LNA está em excelente acordo com dados de melhor qualidade obtidos anteriormente pelo nosso grupo.

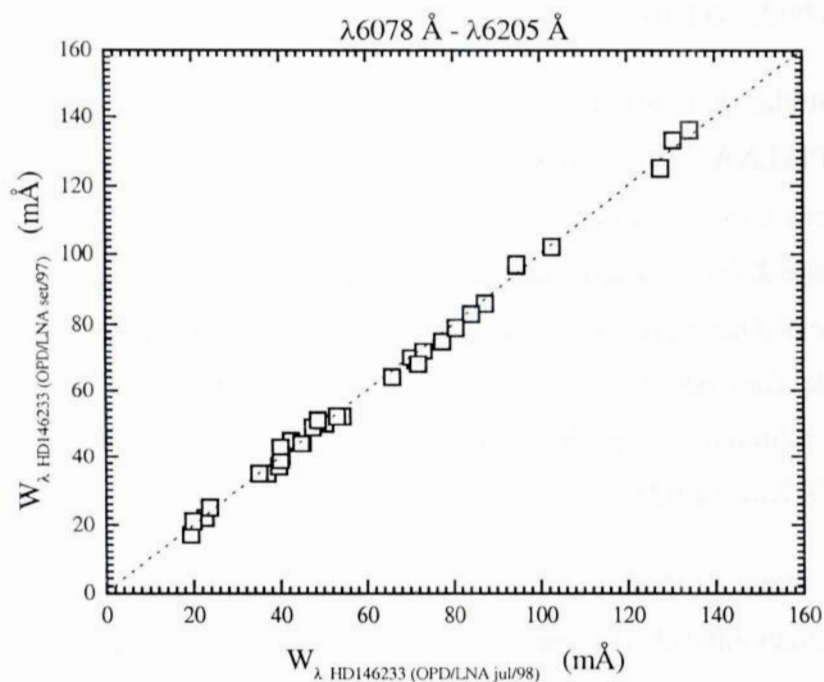
Três das estrelas da amostra foram observadas na região de  $\lambda 6145$  em duas missões diferentes no OPD/LNA. Para estas estrelas (HD73350, HD146233 e HD189625), construímos gráficos com as larguras equivalentes medidas comparando as duas missões (**Figuras 2.5a, 2.5b e 2.5c**). Também comparamos as larguras equivalentes dos espectros dos objetos de referência (Ganimedes da missão OPD de out/99, Europa, Calisto e céu diurno) com o espectro de Ganimedes da missão OPD/LNA de jul/98, uma vez que queremos verificar se existem diferenças significativas entre estes “representantes” do espectro do Sol. (**Figuras 2.6a, 2.6b, 2.6c e 2.6d**).

Aplicamos o teste de médias (Hoel 1971) em todas as comparações e verificamos que as larguras equivalentes em cada comparação concordam entre si, ou seja, o espalhamento nos valores medidos, observado nestes gráficos, não é devido a diferenças sistemáticas.

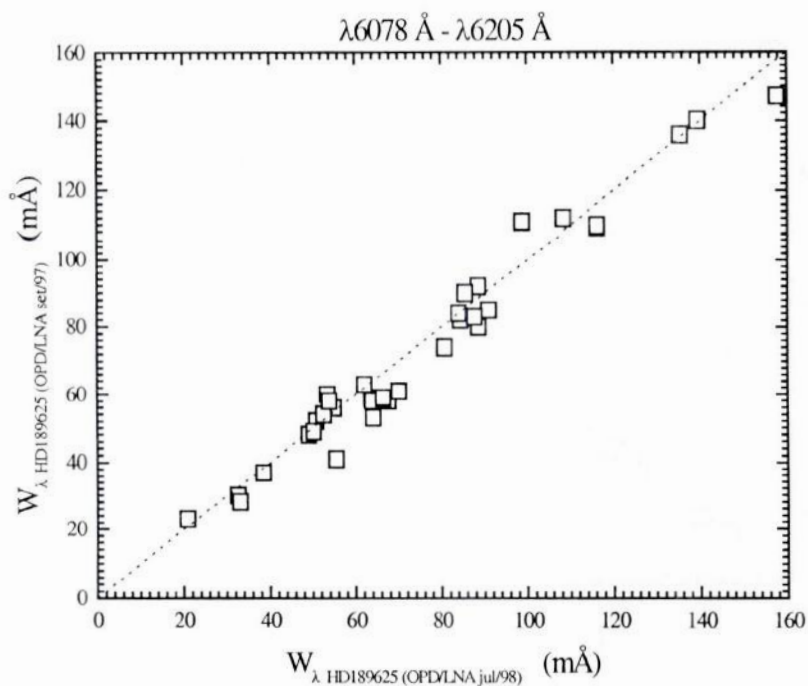




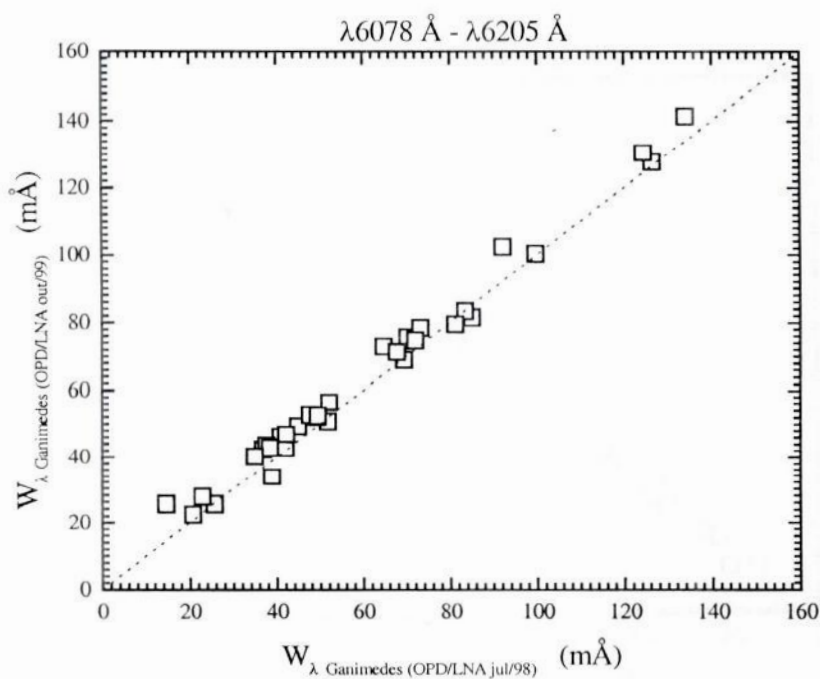
**Figura 2.5a:** Comparação entre as larguras equivalentes medidas nas duas observações da estrela HD73350 (valores das tabela no Apêndice 1): missão OPD/LNA de abr/99 e missão OPD/LNA de jul/98. A reta pontilhada, assim como nas 6 figuras seguintes, representa a bissetriz.



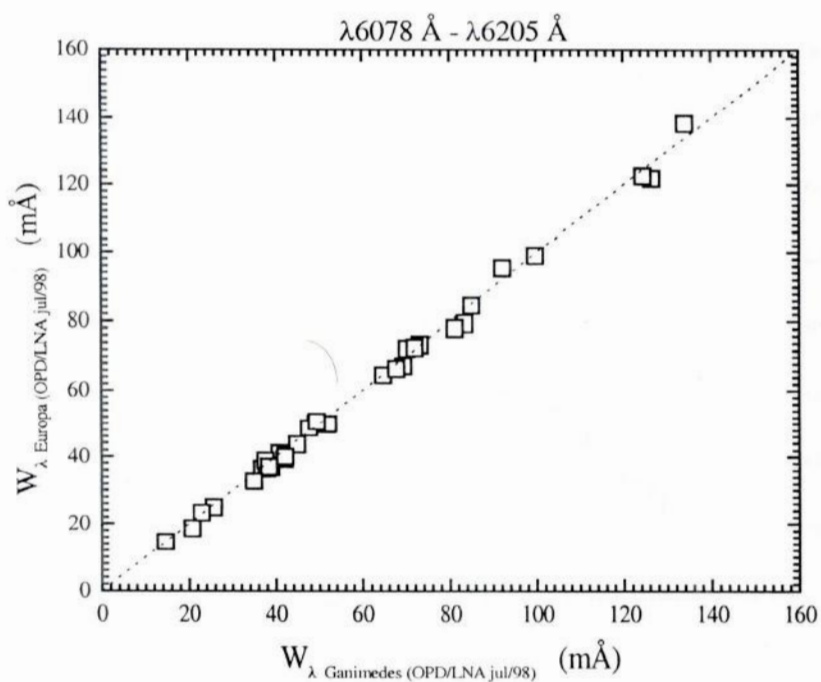
**Figura 2.5b:** Comparação entre as larguras equivalentes medidas nas duas observações da estrela HD146233 (valores das tabela no Apêndice 1): missão OPD/LNA de set/97 e missão OPD/LNA de jul/98.



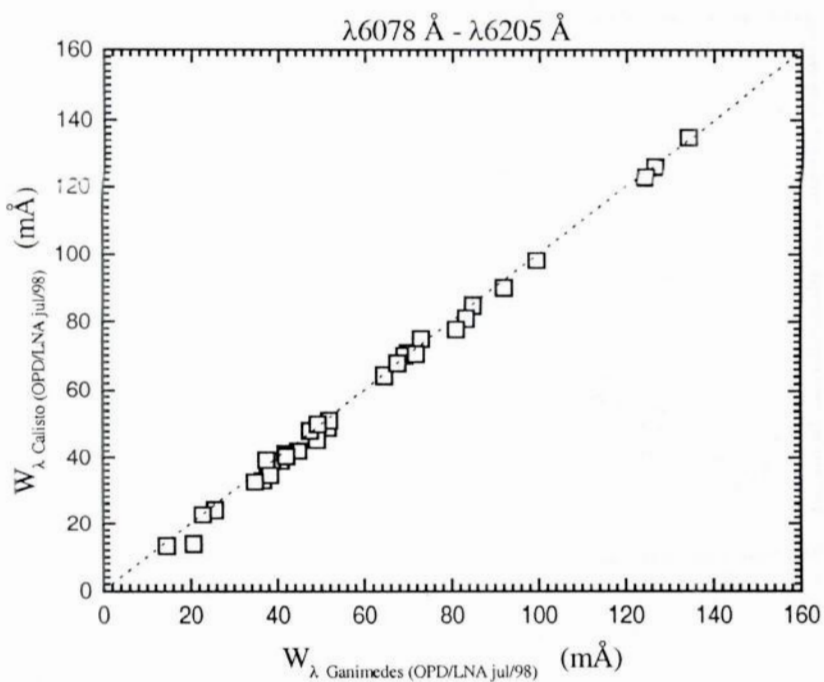
**Figura 2.5c:** Comparação entre as larguras equivalentes medidas nas duas observações da estrela HD189625 (valores das tabela no Apêndice 1): missão OPD/LNA de set/97 e missão OPD/LNA de jul/98.



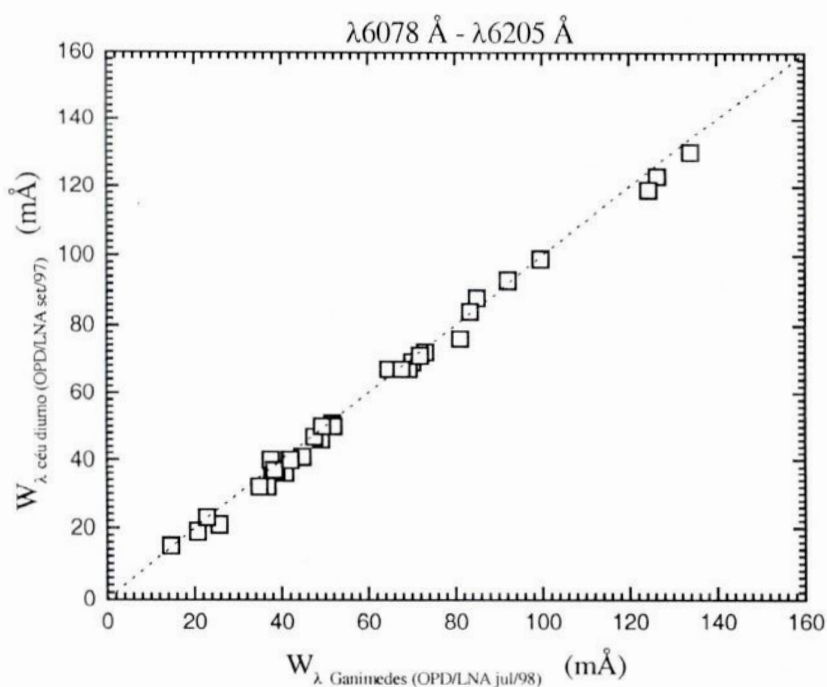
**Figura 2.6a:** Comparação entre as larguras equivalentes medidas em Ganímedes da missão OPD/LNA de out/99 e aquelas medidas em Ganímedes da missão OPD/LNA de jul/98 (valores das tabela no Apêndice 1).



**Figura 2.6b:** O mesmo da Figura 2.6a, mas para os espectros de Europa (OPD/LNA jul/98) e de Ganimedes (OPD/LNA de jul/98).



**Figura 2.6c:** O mesmo da Figura 2.6a, mas para os espectros de Calisto (OPD/LNA jul/98) e de Ganimedes (OPD/LNA de jul/98).



**Figura 2.6d:** Mesmo da Figura 2.6a, mas para o espectro do céu diurno (OPD/LNA set/98) e de Ganimedes (OPD/LNA de jul/98).

Estes resultados mostram que as larguras equivalentes obtidas destes espectros são de ótima qualidade, além de altamente homogêneas e repetíveis entre as diferentes missões de observação.

O procedimento de normalização dos espectros é de certa forma um tanto subjetivo, uma vez que se baseia na *escolha* visual dos melhores pontos de contínuo aparente (entre os selecionados do Atlas Solar), o que varia de espectro para espectro devido às flutuações de ruído, e na *escolha* do melhor polinômio de ajuste. Uma vez que normalizações diferentes levam a medidas de largura equivalente diferentes, efetuamos independentemente duas normalizações de um espectro de Ganimedes através de duas pessoas diferentes, a fim de verificar se existe bom acordo. Aplicamos então o *teste de médias* e verificamos que o acordo é excelente, não havendo diferenças sistemáticas entre as larguras equivalentes medidas. Isto demonstra que, pelo menos neste caso particular, esta fonte de erro não é importante.

De qualquer forma, todas as estrelas normalizadas tiveram o processo de normalização realizado por uma só pessoa, o que intensifica ainda mais a afirmação de não ocorrência de erros sistemáticos neste procedimento.



## CAPÍTULO 3

### ANÁLISES ESPECTROSCÓPICAS

#### 3.1 - Determinação dos Parâmetros Atmosféricos

##### 3.1.1 - Modelo Atmosférico

Os modelos de atmosferas estelares adotados para a nossa análise são os derivados por Edvardsson et al. (1993), que são válidos para estrelas com temperatura efetiva de 5.250 K a 6.000 K, gravidade superficial ( $\log g$ ) de 2,5 dex a 5,0 dex e metalicidade de -2,3 dex a +0,30 dex. Estes modelos baseiam-se na aproximação plano-paralela com Equilíbrio Termodinâmico Local (ETL) e equilíbrio radiativo.

Calculamos os modelos atmosféricos a partir de um programa fornecido pela Dra. Monique Spite (Observatório de Meudon, Paris), o qual interpola a lei  $T(\tau)$  tabelada por Edvardsson et al. (1993). Este programa gera um modelo de atmosferas para uma estrela se seus parâmetros atmosféricos são conhecidos.

##### 3.1.2 - Cálculo dos $gf$ Solares

Uma vez que as estrelas de nossa amostra são de tipo solar, fizemos uma análise diferencial em relação ao Sol para determinarmos os parâmetros atmosféricos estelares:  $T_{\text{ef}}$ , abundância de metais (metalicidade), velocidade de microturbulência ( $\xi$ ) e  $\log g$ . A microturbulência é um parâmetro que visa justificar o alargamento complementar das linhas espectrais nas atmosferas estelares, o que não é explicado somente pelo mecanismo *doppler térmico*. Para calcular um modelo solar utilizamos  $T_{\text{ef}}^{\odot} = 5.777$  K (Neckel 1986),  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,00$  dex (por definição),  $\xi = 1,30$  Km/s (Porto de Mello 2000),  $\log g = 4,44$  dex (Allen 1973) e  $n_{\text{He}}/n_{\text{H}} = 0,10$  (razão populacional entre os átomos de He e H; Grevesse e Noels, 1993).

Os pesos estatísticos  $g$  e as probabilidades de transição entre níveis eletrônicos  $f$  (forças de oscilador) são propriedades intrínsecas dos átomos e a formação de uma dada linha atômica na atmosfera estelar depende desses valores para os dois níveis envolvidos na transição. Geramos os  $gf$  a partir do modelo atmosférico adotado para o Sol, aplicado às

larguras equivalentes das linhas de Fe I e Fe II medidas em Ganimedes (missão OPD jul/98 e missão FEROS jan/99), já corrigidas para a escala de Meylan et al. (1993). Neste cálculo de gf, a finalidade é forçar as linhas do ferro a fornecerem o valor solar de abundância do ferro, que é aquele fornecido por Grevesse & Noels (1993):  $\log N(\text{Fe}) = 7,50$ .

### 3.1.3 - Cálculo dos Parâmetros Atmosféricos

Para os espectros com observações em  $\lambda 6145$ , determinamos iterativamente valores de metalicidade, temperatura efetiva, microturbulência e gravidade superficial, a partir das larguras equivalentes das linhas de Fe medidas nos espectros, dos índices de cor catalogados e dos modelos atmosféricos adotados.

Os valores de  $[\text{Fe}/\text{H}]$  são obtidos através das medidas de  $W_\lambda$  das linhas do Fe I. Através desta metalicidade espectroscópica e dos índices de cor, derivamos valores de  $T_{\text{ef}}$ , a qual chamamos de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ . A partir da análise das intensidades das linhas do Fe I, determinamos os valores de microturbulência ( $\xi$ ). Obtivemos os valores de gravidade superficial através do equilíbrio de ionização entre linhas de Fe I e Fe II.

O programa de cálculo de abundâncias de Spite necessita dos valores de  $W_\lambda$  medidos e corrigidos e, como já foi mencionado, de parâmetros atmosféricos de entrada. Para cada estrela, utilizamos como entrada os valores fotométricos de metalicidade listados nas **Tabelas 1.1a, 1.1b e 1.1c**, com as quais obtivemos a temperatura efetiva usando as calibrações de cor versus  $T_{\text{ef}}$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  de Porto de Mello (2000). Os valores iniciais de  $\xi$ ,  $\log g$  e  $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$  são aqueles considerados para o Sol, sendo que  $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$  permanece inalterado durante a análise.

Elaboramos um pacote de programas que lê os parâmetros iniciais de entrada e efetua uma seqüência de cálculos, separada em ciclos, que altera estes dados de acordo com condições preestabelecidas, fornecendo os parâmetros atmosféricos finais da estrela.

O pacote inicia seus cálculos alterando o valor da microturbulência e da metalicidade. A velocidade de microturbulência que admitimos como sendo a correta é aquela que permite que linhas de intensidades diferentes forneçam a mesma abundância do Fe, na média. O pacote calcula uma média das abundâncias obtidas por cada linha de Fe I, determinando o valor da metalicidade, e efetua uma regressão linear com as abundâncias individuais calculadas. A metalicidade determinada é verificada a cada alteração de  $\xi$ , comparada com o

valor imediatamente anterior e alterada se necessário. Quando o coeficiente angular da regressão é zero, considerando sua incerteza, o programa fecha um primeiro ciclo.

Com o novo valor de metalicidade, recalcula-se a temperatura efetiva usando a calibração de cor versus temperatura efetiva e metalicidade. Se esta nova temperatura diferir muito da anterior, o primeiro ciclo é novamente executado. Quando estes três parâmetros (temperatura efetiva, metalicidade e microturbulência) estão autoconsistentes, isto é, quando forem dados como parâmetros de entrada e recuperados como parâmetros de saída aproximadamente iguais, o pacote considera concluída a determinação de metalicidade a partir das linhas de Fe I e segue para a análise da gravidade superficial.

O valor de  $\log g$  é determinado quando a abundância de ferro indicada pelas linhas de Fe I (espécie neutra) for igual à abundância indicada pelas linhas de Fe II (espécie ionizada). Em estrelas de tipo solar, o número de átomos de Fe II representa a maior parte dos átomos de ferro contidos na sua atmosfera e, por este motivo, a metalicidade indicada pelas linhas de Fe II é mais sensível a mudanças de gravidade superficial (Gray 1976). Por exemplo, um aumento da gravidade desfavorece a população de Fe II, devido ao aumento da pressão eletrônica no meio e, como consequência, o programa responde a esta diminuição de população com um aumento da abundância determinada pela mesma, uma vez que as larguras equivalentes permanecem inalteradas. Quando ambas as espécies indicam a mesma abundância, encontramos então o valor correto da gravidade superficial, pois nenhuma população do ferro está sendo favorecida. A alteração da gravidade influencia os outros parâmetros e, se esta influência for significativa, o pacote volta ao início do primeiro ciclo e analisa tudo novamente, seguindo os mesmos passos.

O resultado final é aquele cujos quatro parâmetros são autoconsistentes, dentro de um certo nível de erro pré-determinado. Uma vez que o programa altera os dados de entrada usando um certo passo para cada parâmetro, estabelecemos que este resultado final ocorre quando as diferenças entre os valores de entrada e os valores imediatamente calculados pelo programa são menores que os passos fixados. Os passos são os seguintes:

$$T_{\text{ef}} : 10 \text{ K} \quad (3.1a)$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] : 0,01 \text{ dex} \quad (3.1b)$$

$$\xi : 0,05 \text{ Km/s} \quad (3.1c)$$

$$\log g : 0,10 \text{ dex} \quad (3.1d)$$



Veremos logo a seguir que estes passos são muito inferiores aos erros finais estimados para estes parâmetros.

Realizamos esta análise para todas as estrelas que tiveram observações na região de  $\lambda 6145$ , tanto no OPD/LNA quanto com o FEROS. Os parâmetros atmosféricos finais de cada estrela estão listados nas **Tabelas 3.1a** e **3.1b**. Para as estrelas observada no OPD/LNA e com o FEROS, citamos nestas tabelas apenas os valores de  $M_{\text{bol}}$  baseados nos espectros FEROS (missões no ESO), pois estes possuem melhor relação S/R. Para a estrela HD189625, a qual foi observada em duas missões no OPD/LNA, citamos apenas o valor de  $M_{\text{bol}}$  referente à missão OPD/LNA de julho de 1998, já que é nesta missão onde se encontra a nossa maior base observacional.

Recalculamos os valores de  $M_{\text{bol}}$  para aquelas estrelas que tiveram observações espectroscópicas. Desta vez, a calibração de  $T_{\text{ef}}$  versus  $C_{\text{bol}}$ , citada no **capítulo 1**, foi baseada nos valores de temperatura efetiva obtida a partir de  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$  e dos índices de cor de cada estrela ( $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ ).

**Tabela 3.1a:** Parâmetros atmosféricos finais para as estrelas mais brilhantes ( $V_T \leq 8,0$ ) que foram observadas em  $\lambda 6145$ . Identificamos aquelas estrelas que foram observadas em mais de um local (OPD/LNA e FEROS/ESO). A magnitude  $M_{\text{bol}}$  é derivada baseada nas temperaturas  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ .

Objeto	$T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$	$\sigma[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$	$\xi$ (Km/s)	log g	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD4308	5727	-0,27	0,05	1,2	4,4	4,83	0,04
HD9986	5824	0,11	0,05	1,3	4,5	4,74	0,06
HD13724	5840	0,32	0,09	1,4	4,2	4,74	0,10
HD19518 (OPD jul/98)	5780	-0,11	0,07	1,6	4,3	--	--
HD19518 (ESO jan/99)	5785	-0,10	0,04	1,2	4,4	4,78	0,11
HD24293	5734	-0,13	0,08	2,0	3,9	4,75	0,10
HD25874	5767	0,02	0,06	1,5	4,4	4,70	0,04
HD28821	5682	-0,10	0,06	1,3	4,6	4,69	0,10
HD32963	5806	0,10	0,03	1,3	4,4	4,87	0,10
HD35041	5796	-0,11	0,04	1,5	4,4	4,84	0,10
HD37773	5700	0,03	0,03	1,4	4,3	4,80	0,11
HD66653 (OPD abr/99)	5929	0,44	0,08	0,8	4,5	--	--
HD66653 (ESO jan/99)	5832	0,09	0,04	1,5	4,4	4,76	0,06
HD68168	5782	0,12	0,03	1,3	4,4	4,72	0,09
HD71334	5767	-0,06	0,04	1,3	4,5	4,85	0,09
HD73350 (OPD jul/98)	5820	0,10	0,07	1,6	4,5	--	--

**Tabela 3.1a** (cont.)

Objeto	$T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ (K)	[Fe/H] <sup>esp</sup>	$\sigma[\text{Fe/H}]^{\text{esp}}$	$\xi$ (Km/s)	log g	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD73350 (OPD abr/99)	5820	0,12	0,04	1,7	4,4	--	--
HD73350 (ESO jan/99)	5811	0,08	0,03	1,5	4,4	4,90	0,07
HD88072	5787	0,01	0,05	1,6	4,2	4,68	0,10
HD117939	5740	-0,05	0,07	1,1	4,4	4,88	0,07
HD134664	5833	-0,19	0,06	1,3	4,4	4,79	0,12
HD138573	5773	0,02	0,05	1,2	4,4	4,78	0,07
HD142072	5753	0,10	0,05	1,8	4,4	4,75	0,11
HD145825	5827	0,04	0,03	1,5	4,5	4,89	0,06
HD146233 (OPD set/97)	5813	0,05	0,03	1,3	4,4	--	--
HD146233 (OPD jul/98)	5813	0,06	0,05	1,1	4,6	--	--
HD146233 (ESO set/99)	5822	0,07	0,06	0,7	4,6	4,78	0,04
HD150248	5747	-0,06	0,06	1,4	4,4	4,75	0,08
HD155114	5854	0,07	0,08	1,0	4,5	4,81	0,09
HD164595	5813	-0,00	0,06	1,0	4,7	4,79	0,06
HD187237	5847	0,18	0,10	1,3	4,4	4,85	0,05
HD189625 (OPD set/97)	5845	0,19	0,09	1,7	4,2	--	--
HD189625 (OPD jul/98)	5860	0,26	0,08	1,6	4,4	4,71	0,09
HD190771	5860	0,26	0,04	1,3	4,5	4,82	0,04
HD207043	5786	0,08	0,07	1,3	4,5	4,94	0,08
HD214385	5714	-0,33	0,06	1,7	4,2	4,87	0,11

**Tabela 3.1b:** Parâmetros atmosféricos finais e  $M_{\text{bol}}$  para as estrelas mais fracas ( $8,0 < V_T \leq 9,0$ ) que foram observadas em  $\lambda 6145$ , incluindo as três estrelas extras da Tabela 1.1c. Identificamos aquelas estrelas que foram observadas em mais de um local (OPD/LNA e FEROS/ESO).

Objeto	$T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ (K)	[Fe/H] <sup>esp</sup>	$\sigma[\text{Fe/H}]^{\text{esp}}$	$\xi$ (Km/s)	log g	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD8291	5813	0,04	0,12	1,3	4,3	4,78	0,17
HD12264	5820	0,13	0,05	1,1	4,5	4,80	0,13
HD98649 (OPD jul/98)	5772	-0,01	0,06	1,1	4,7	--	--
HD98649 (ESO jan/99)	5780	0,04	0,05	1,1	4,6	4,84	0,11
HD105901 (OPD jul/98)	5825	-0,05	0,03	1,4	4,4	--	--
HD105901 (ESO jan/99)	5847	0,04	0,07	1,3	4,5	4,74	0,13
HD115382 (OPD jul/98)	5777	-0,10	0,04	1,3	4,4	--	--
HD115382 (ESO jan/99)	5786	-0,07	0,05	1,4	4,3	4,73	0,17
HD118598	5793	0,00	0,09	1,4	4,5	4,78	0,13
HD140690	5780	0,07	0,07	1,4	4,4	4,67	0,12
HD143337	5780	-0,10	0,11	0,9	4,4	4,73	0,15
HD153458	5909	0,40	0,14	0,3	4,9	4,84	0,12
BD+153364	5813	0,11	0,09	1,3	4,4	4,78	0,17
HD157750	5840	0,19	0,08	1,5	4,5	4,85	0,16

Tabela 3.1b (cont.)

Objeto	$T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ (K)	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$	$\sigma[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$	$\xi$ (Km/s)	$\log g$	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD191487	5780	-0,16	0,14	2,3	4,0	4,90	0,16
HD202072	5753	-0,15	0,11	1,2	4,5	4,70	0,13
HD211786	5793	-0,05	0,07	1,2	4,5	4,90	0,11
HD216436	5740	-0,02	0,15	1,8	3,9	4,65	0,11
HD221343	5721	-0,22	0,09	2,5	3,6	4,77	0,14

O erro interno médio da metalicidade foi calculado realizando uma média simples dos valores obtidos para cada estrela. Calculamos erros médios separadamente para as estrelas observadas no OPD/LNA e no FEROS. Os resultados são os seguintes:

$$\bar{\sigma} [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{OPD/LNA}} = 0,08 \text{ dex} \quad (3.2a)$$

$$\bar{\sigma} [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{FEROS}} = 0,04 \text{ dex} \quad (3.2b)$$

Para fazermos uma estimativa do erro na determinação em  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ , utilizamos como referência às estrelas HD207043 (para o OPD/LNA) e HD115382 (para o FEROS), pois elas possuem relações S/R representativas da média de cada um dos dois conjuntos de observações (respectivamente  $S/R = 130$  e  $S/R = 330$ ). Aos parâmetros obtidos para estas estrelas, consideramos os erros internos médios na obtenção da metalicidade (equações 3.2) e os erros internos médios na obtenção dos índices de cor (equações 1.11), e encontramos os seguintes erros na determinação da temperatura efetiva listada nas Tabelas 3.1a e 3.1b:

$$\sigma (T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}})_{\text{OPD/LNA}} = 45 \text{ K} \quad (3.3a)$$

$$\sigma (T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}})_{\text{FEROS}} = 35 \text{ K} \quad (3.3b)$$

No caso da gravidade superficial, também consideramos como referência às estrelas HD207043 (para o OPD/LNA) e HD115382 (para o FEROS) para a estimativa do erro. Fixamos os valores de  $T_{\text{ef}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  e  $\xi$  e variamos o valor de  $\log g$  até que a metalicidade, (fornecida pelo programa como saída) baseada nas linhas de Fe II estivesse a  $1\sigma$  (erros mostrados nas equações 3.2) do valor de metalicidade baseado nas linhas de Fe I. A diferença entre este valor de  $\log g$  e o valor anterior é o nosso erro estimado. Obtivemos que o erro em

$\log g$  é de 0,20 dex para as estrelas observadas no OPD/LNA e de 0,15 dex para as estrelas observadas com o FEROS.

Para a microturbulência, a estimativa do erro foi feita com um procedimento análogo ao caso da gravidade superficial. Desta vez, fixamos os valores de  $T_{\text{ef}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  e  $\log g$  e variamos o valor de  $\xi$  até que o valor do coeficiente angular da regressão linear das abundâncias das linhas de Fe I contra suas larguras equivalente se afastasse de zero por um valor exatamente igual a sua incerteza formal de  $1\sigma$ . A diferença entre este valor de  $\xi$  e o valor adotado fornece a incerteza desejada. Encontramos erros de 0,4 Km/s para o OPD/LNA e 0,2 Km/s para o FEROS.

A determinação de microturbulência realizada não é muito confiável, uma vez que possui erros internos relativamente grandes. Isto ocorre devido à pouca quantidade de linhas do Fe I utilizadas. Conforme será discutido a seguir, os resultados apenas confirmam que todas as estrelas analisadas têm, essencialmente, valores de  $\xi$  compatíveis com o valor solar, dentro desses erros relativamente grandes.

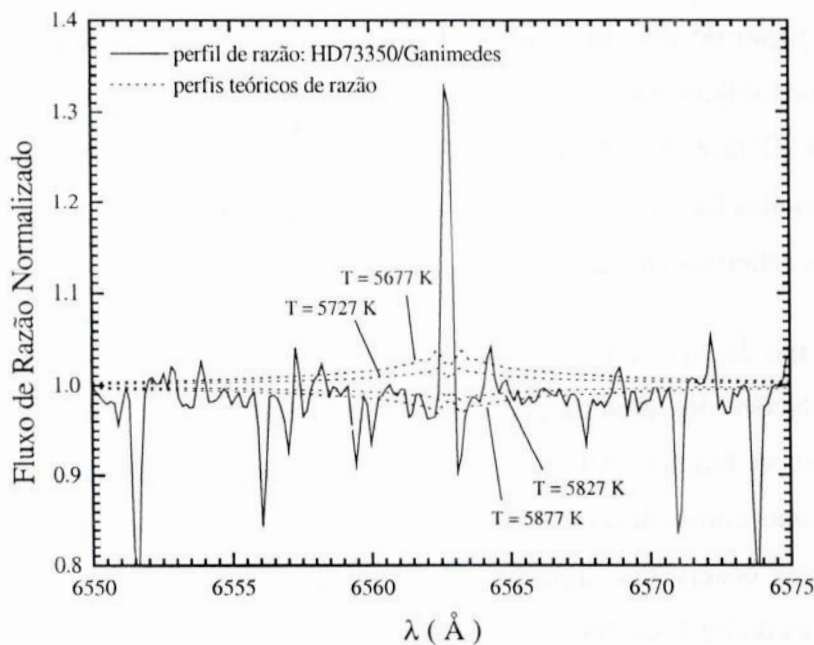
Um outro tipo de análise possível seria considerar o potencial de excitação das linhas de Fe I. As populações dos átomos estão diretamente relacionadas com a temperatura do meio. Um alto valor de temperatura efetiva favorece a formação de linhas com alto potencial de excitação e, como conseqüência, uma menor abundância bastaria para corresponder às larguras equivalentes observadas, uma vez que estas são preservadas. No entanto, a pouca quantidade de linhas do Fe I que temos disponíveis inviabiliza este tipo de método, conforme verificamos no início deste projeto.

### **3.2 - Temperatura Efetiva e Nível de Emissão Cromosférica a partir de $H\alpha$**

Com as observações da região onde se encontra a linha  $H\alpha$  (OPD/LNA), determinamos temperaturas efetivas através da análise dos perfis de suas asas. Analisamos também o nível de atividade cromosférica, das estrelas observadas nesta região, através do preenchimento cromosférico no centro da linha.

As asas da linha  $H\alpha$ , aproximadamente entre  $\lambda 6558$  e  $\lambda 6561$  e entre  $\lambda 6565$  e  $\lambda 6568$ , são muito sensíveis a pequenas variações de temperatura efetiva e pouco sensíveis a variações

de metalicidade e gravidade superficial. Utilizamos um programa, desenvolvido por Praderie (1967), que calcula modelos teóricos do perfil de  $H\alpha$ . Na verdade, como trabalhamos com espectros de razão, calculamos modelos teóricos de razão. Efetuamos um ajuste visual dos perfis teóricos aos observados, utilizando um outro programa que superpõe ao espectro estelar cinco perfis teóricos: o calculado com os parâmetros solares, dois com  $T_{ef}$  maior (50 K e 100 K mais quente que o Sol) e dois outros com  $T_{ef}$  menor (50 K e 100 K mais fria que o Sol). A temperatura adotada para cada estrela foi aquela cujo modelo teórico melhor se ajusta, visualmente e interpolando se necessário, às regiões sensíveis. Um exemplo deste procedimento é mostrado na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1:** Espectro de razão normalizado na região da linha  $H\alpha$ , mostrando o ajuste visual dos perfis teóricos às asas da linha. Para a estrela exemplificada (HD73350), podemos dizer que sua temperatura efetiva é, no mínimo, 50 K maior que a temperatura solar. Vemos também o pico de emissão central, devido ao fato desta estrela possuir maior nível de atividade cromosférica que o Sol.

Os modelos teóricos utilizados nesta determinação de  $T_{ef}$  através das asas de  $H\alpha$  foram calculados baseados nos parâmetros solares: metalicidade, microturbulência e gravidade superficial. Mesmo tendo usado estes modelos, superpostos aos perfis de  $H\alpha$ , em estrelas cujos mesmos parâmetros não são, necessariamente, iguais aos do Sol, o único parâmetro que efetivamente influencia é a  $T_{ef}$ . Isto significa que, quando analisamos as asas de  $H\alpha$ , de uma certa estrela em relação ao Sol, e verificamos que os perfis são significativamente diferentes,

podemos dizer que esta diferença é, essencialmente, devido à diferença de  $T_{\text{ef}}$  entre esta estrela e o Sol.

O nível de atividade cromosférica em uma estrela pode ser medido através da componente cromosférica que atua na formação do perfil central da linha  $H\alpha$ . Quando dividimos o espectro da estrela pelo espectro do Sol, no nosso caso representado por Ganimedes, podemos ver, através do espectro de razão, se existe alguma diferença localizada no centro da linha  $H\alpha$ , entre a estrela e o Sol. Se existir, atribuímos esta diferença a um efeito de preenchimento no centro da linha, provocado por um maior nível de atividade cromosférica, na estrela em relação ao Sol ou vice-versa. No caso das estrelas cromosféricamente mais ativas que o Sol, o preenchimento cromosférico é mais intenso, o que aumenta o fluxo residual no centro da linha. Como exemplo, na **Figura 3.1** mostramos o espectro de razão normalizado de uma estrela mais ativa que o Sol, para a qual o fluxo de razão central é maior do que 1. O contrário é encontrado para estrelas menos ativas que o Sol.

Com o auxílio de um programa computacional (Magalhães & da Silva 1990), pudemos medir, através dos espectros de razão, a largura equivalente da estrutura central de emissão (se a estrela for mais ativa que o Sol) ou da estrutura central de absorção (se a estrela for menos ativa que o Sol), relativa à componente cromosférica. Assim, para as estrelas mais ativas que o Sol, encontramos valores negativos da largura equivalente da componente cromosférica, e o oposto para as estrelas menos ativas.

Apresentamos na **Tabela 3.2** as temperaturas efetivas e as larguras equivalentes ( $W_{\text{crom.}}$ ) da estrutura central de emissão (ou absorção) cromosférica determinadas a partir de  $H\alpha$ . Para as estrelas que foram observadas mais de uma vez no OPD/LNA, os valores de  $W_{\text{crom.}}$  mostrados na tabela a seguir são uma média simples das respectivas medidas em cada espectro. A temperatura efetiva média ( $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$ ) listada nesta tabela é a média simples entre  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$  e  $T_{\text{ef}}(H\alpha)$ . Para aquelas estrelas que foram observadas tanto no OPD/LNA quanto com o FEROS, escolhemos os valores de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$  determinadas a partir dos espectros FEROS, uma vez que estes espectros possuem melhor relação S/R.

**Tabela 3.2:** Temperaturas efetivas calculadas a partir da linha  $H\alpha$  e valores de medidas da componente cromosférica que atua na formação do centro desta linha.

Objeto	$T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ (K)	$T_{\text{ef}}(\text{H}\alpha)$ (K)	$T_{\text{ef}}^{\text{média}}$ (K)	$W_{\text{crom.}}$ (mÅ)
HD4308	5727	5727	5727	-30
HD8291	5813	5850	5832	-94
HD12264	5820	5827	5824	-186
HD13724	5840	5800	5820	-108
HD24293	5734	5727	5731	-6
HD25874	5767	5800	5784	+24
HD28821	5682	5677	5680	+19
HD73350	5811	5850	5831	-153
HD98649	5772	5777	5775	-18
HD105901	5825	5877	5851	+13
HD115382	5777	5802	5790	+10
HD117939	5740	5752	5746	+9
HD118598	5793	5717	5755	-28
HD134664	5833	5777	5805	-10
HD138573	5773	5800	5787	-3
HD140690	5780	5727	5754	+42
HD142072	5753	5727	5740	-280
HD143337	5780	5727	5754	+7
HD145825	5827	5877	5852	-60
HD146233	5822	5782	5802	-7
HD150248	5747	5702	5725	+38
BD+153364	5813	5827	5820	-14
HD153458	5909	5827	5868	-216
HD155114	5854	5877	5866	-130
HD157750	5840	5827	5834	-163
HD164595	5813	5800	5807	+28
HD189625	5860	5777	5819	-48
HD190771	5860	5777	5819	-269
HD191487	5780	5777	5779	-198
HD202072	5753	5727	5740	-10
HD207043	5786	5727	5757	-151
HD211786	5793	5852	5823	+15
HD216436	5740	5750	5745	+15
HD221343	5721	5677	5699	-262

As incertezas estimadas para as temperaturas obtidas a partir do perfil de  $H\alpha$  dependem de vários efeitos. Os predominantes são erros na gravidade superficial usada para calcular o modelo e, principalmente, as incertezas visuais na escolha da melhor temperatura que ajusta cada uma das asas, assim como as diferenças entre as temperaturas atribuídas a cada uma delas. Cada um destes efeitos tem magnitude na faixa de 25 – 30 K, e sua composição quadrática sugere um valor de 50 K, o qual adotamos.

Para a medida da largura equivalente da componente cromosférica do perfil de  $H\alpha$ , estimamos uma incerteza na faixa de 10 – 20 mÅ, a partir de espectros dos mesmos objetos observados em ocasiões diferentes.

Por fim, conforme pode ser visto na **Tabela 2.1a**, alguns poucos objetos foram observados apenas na região UV com o espectrógrafo Boller & Chivens. Para estas estrelas, não pudemos determinar parâmetros atmosféricos e, portanto, não as discutimos no contexto deste trabalho.





## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 - Melhores Candidatas

Primeiramente, selecionamos as melhores candidatas a gêmea solar através dos valores de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  espectroscópica e magnitude absoluta bolométrica  $M_{\text{bol}}$ . Todos os valores destes parâmetros são aqueles listados nas **Tabelas 3.1a e 3.1b**.

Por razões de homogeneidade, como não temos observações em  $\text{H}\alpha$  para todas as estrelas, optamos por considerar os valores de  $M_{\text{bol}}$  calculados a partir de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ , e não a partir da temperatura efetiva média listada na **Tabela 3.2** ( $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$ ).

Os valores de microturbulência, devidos aos grandes erros encontrados, não são úteis como critério de seleção das melhores candidatas. Dentro dos níveis de erro, praticamente todas as estrelas possuem valores de  $\xi$  compatíveis com os valores solares. A gravidade superficial também não foi utilizada. Os valores de  $\log g$  encontrados confirmam, dentro dos erros, que todas as estrelas analisadas espectroscopicamente são compatíveis com o estado evolutivo de estrelas anãs, próximas da sequência principal, com exceção de algumas poucas estrelas para as quais os valores inferiores ou próximos de  $\log g = 4,00$  sugerem a possibilidade de que elas sejam sub-gigantes (**Tabelas 3.2a e 3.1b**).

Portanto, nos baseamos nos valores de temperatura efetiva, metalicidade e magnitude absoluta bolométrica das **Tabelas 3.1** e escolhemos como melhores candidatas aquelas estrelas que possuem estes parâmetros a  $1\sigma$  dos parâmetros solares ( $T_{\text{ef}}^{\odot} = 5.777 \text{ K}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\odot} = 0,00$  e  $M_{\text{bol}}^{\odot} = 4,81$ ). Os erros em temperatura efetiva são aqueles estimados na seção **3.1** (equações **3.3**): 45 K para os espectros OPD/LNA e 35 K para os espectros FEROS. Os erros em metalicidade também são discutidos nesta seção: 0,08 dex no caso do OPD/LNA e 0,04 no caso do FEROS (equações **3.2**). Em  $M_{\text{bol}}$ , os erros são aqueles listados nas **Tabelas 3.1**.

As melhores candidatas assim selecionadas estão listadas na **Tabela 4.1**, onde estão as estrelas que satisfizeram todos os critérios de seleção até agora aplicados, além daquelas que tiveram um parâmetro ou outro ligeiramente fora do limite de erro de  $1\sigma$ .

**Tabela 4.1:** As melhores candidatas selecionadas por temperatura efetiva ( $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ ), metalicidade espectroscópica  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$  e magnitude absoluta bolométrica  $M_{\text{bol}}$ .

Objeto	$[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$	$T_{\text{ef}}^{\text{cor+FeI}}$ (K)	$M_{\text{bol}}$	$\sigma(M_{\text{bol}})$
HD8291	0,04	5813	4,78	0,17
HD71334	-0,06	5767	4,85	0,09
HD88072	0,01	5787	4,68	0,10
HD98649	-0,01	5772	4,84	0,11
HD105901	-0,05	5825	4,74	0,13
HD117939	-0,05	5740	4,88	0,07
HD118598	0,00	5793	4,78	0,13
HD138573	0,02	5773	4,78	0,07
HD140690	0,07	5780	4,67	0,12
HD143337	-0,10	5780	4,73	0,15
HD145825	0,04	5827	4,89	0,06
HD146233	0,07	5822	4,78	0,04
HD150248	-0,06	5747	4,75	0,08
HD164595	-0,00	5813	4,79	0,06
HD207043	0,08	5786	4,94	0,08
HD211786	-0,05	5793	4,90	0,11

Analisando as estrelas desta tabela que possuem temperatura efetiva derivada a partir da linha  $\text{H}\alpha$  e considerando a média direta com os valores de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ , excluimos as estrelas HD105901 e HD145825, pois possuem temperatura efetiva mais quente que a temperatura solar (**Tabela 3.2**), dentro das incertezas.

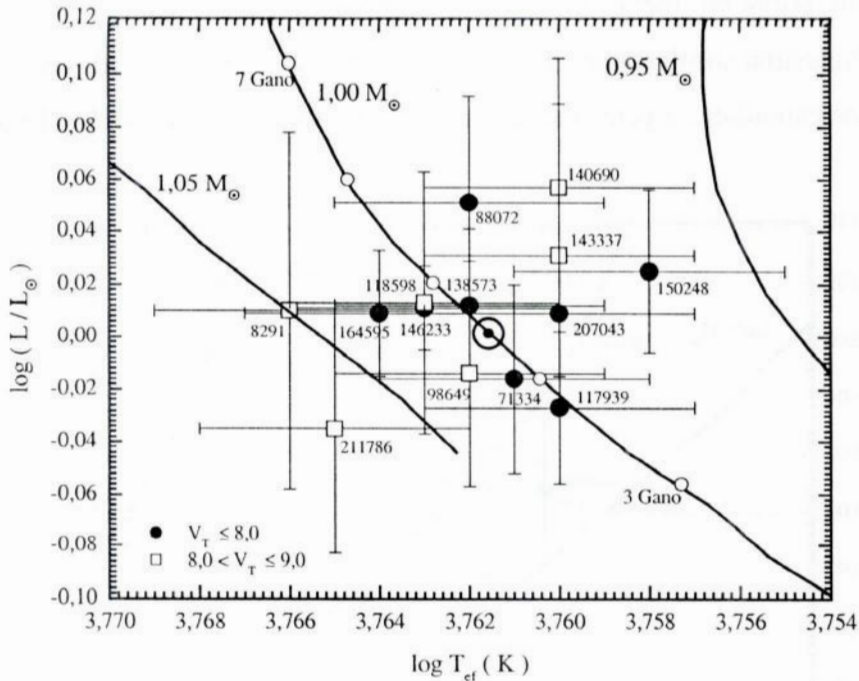
O erro estimado no cálculo de  $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$  é uma composição entre os erros estimados na determinação de  $T_{\text{ef}}(\text{H}\alpha)$  e de  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ , separando os dados provenientes do FEROS e do OPD/LNA. Em  $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$  temos:

$$\sigma(T_{\text{ef}}^{\text{média}})_{\text{FEROS}} = \sigma(T_{\text{ef}}^{\text{FeI} + \text{cores}})_{\text{FEROS}} = 35 \text{ K} \quad (4.1a)$$

$$\sigma(T_{\text{ef}}^{\text{média}})_{\text{OPD/LNA}} = \sqrt{\frac{\sigma(T_{\text{ef}}(\text{H}\alpha))^2 + \sigma(T_{\text{ef}}^{\text{FeI} + \text{cores}})^2}{4}} = \sqrt{\frac{(50 \text{ K})^2 + (45 \text{ K})^2}{4}} = 35 \text{ K} \quad (4.1b)$$

Adotamos o valor de 40 K como sendo o erro em temperatura efetiva média, o qual usaremos daqui em diante.

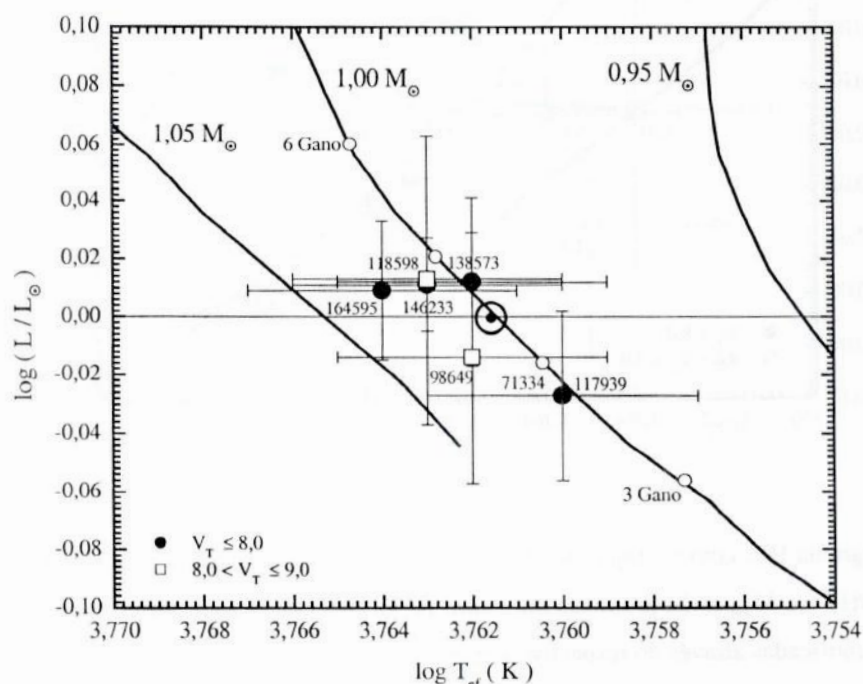
Com exceção destas duas estrelas excluídas, construímos um diagrama HR com as estrelas da **Tabela 4.1**. Neste diagrama mostramos as trajetórias evolutivas teóricas de Fuhrmann et al. (1997), para estrelas de metalicidade solar. Neste diagrama, mostramos as trajetórias evolutivas para  $0,95 M_{\odot}$ ,  $1,00 M_{\odot}$  e  $1,05 M_{\odot}$ , a fim de determinar a massa e o estado evolutivo destas estrelas. Ao longo da trajetória de  $1,00 M_{\odot}$ , estão mostrados os pontos de interseção entre esta trajetória e as isócronas separadas por 1 Gano (um bilhão de anos), também calculadas baseadas nos parâmetros solares.



**Figura 4.1:** Diagrama HR, com as trajetórias evolutivas, das estrelas candidatas a gêmea solar cujos parâmetros  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$  e  $M_{\text{bol}}$  estão próximas ou dentro de um intervalo  $1\sigma$  em torno dos parâmetros solares. As estrelas estão identificadas através do respectivo número HD.

Entre as estrelas da **Figura 4.1**, vamos selecionar aquelas que, rigorosamente, possuem parâmetros iguais aos do Sol, dentro das incertezas. Vamos considerar os valores de temperatura efetiva ( $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$ , para as estrelas que possuem temperatura de  $\text{H}\alpha$ , ou  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I} + \text{cores}}$ , para aquelas que não foram observadas no OPD/LNA na região de  $\text{H}\alpha$ ), metalicidade, magnitude absoluta bolométrica e índices de cor, verificado através dos valores do índice de similaridade  $S_C$ .

Seguindo este critério, eliminamos 8 estrelas da **Figura 1.4**. Entre aquelas mais brilhantes, descartamos a estrela HD150248, que possui valor de temperatura efetiva média ( $T_{\text{ef}}^{\text{média}}$ ) ligeiramente fora de  $1\sigma$  da temperatura solar. A estrela HD71334 é ligeiramente mais pobre que o Sol. As estrelas HD88072 e HD207043, que possuem valores de  $M_{\text{bol}}$  fora do limite  $1\sigma$  do valor de  $M_{\text{bol}}^{\odot}$  por 0,03 e 0,05, respectivamente. As outras quatro estrelas eliminadas são mais fracas que  $V_T = 8,0$ . Uma delas, a estrela HD140690, possui temperatura efetiva e metalicidade solares, mas está fora do limite  $1\sigma$  em  $M_{\text{bol}}$ . A estrela HD211786 é ligeiramente mais quente que o Sol e suas cores não são compatíveis com as cores solares, o que é indicado pelo seu valor de  $S_C = 4,46$ . A estrela HD8291 foi eliminada por ser mais quente que o Sol. O último caso de estrela fraca eliminada é aquela de HD143337. Esta estrela é ligeiramente pobre em metais e, além disso, possui um alto valor do índice de  $S_C$ , o que representa pouquíssima similaridade com os índices de cor do Sol. Usando as estrelas que realmente são ótimas candidatas a gêmea solar, construímos outro diagrama HR (**Figura 4.2**).



**Figura 4.2:** Diagrama HR, com as trajetórias evolutivas, das estrelas ótimas candidatas a serem gêmeas solares. Seus parâmetros  $T_{\text{ef}}^{\text{Fe I + cores}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]^{\text{esp}}$  e  $M_{\text{bol}}$  estão rigorosamente dentro de um intervalo  $1\sigma$  em torno dos parâmetros solares. Todas estas estrelas também têm índice  $S_C$  menores que  $3\sigma$ , mostrando boa similaridade com as cores solares. As estrelas estão identificadas através do respectivo número HD. Vemos que as massas e idades destas estrelas são compatíveis com os mesmos valores solares, dentro das barras de erro mostradas

Estas candidatas finais foram ainda verificadas quanto ao nível de atividade cromosférica. Para isto, analisamos a componente de preenchimento cromosférico no centro da linha H $\alpha$ , através das medidas da largura equivalente  $W_{\text{crom}}$  listada na **Tabela 3.2**.

Através da largura equivalente da componente cromosférica do perfil da linha, apenas duas estrelas possuem nível de atividade cromosférica ligeiramente diferente do nível de atividade solar. São elas a estrela HD118598, que é ligeiramente mais ativa ( $W_{\text{crom.}} = -28 \text{ m\AA}$ ) e a estrela HD164594 ( $W_{\text{crom.}} = +28 \text{ m\AA}$ ), que é ligeiramente menos ativa. Notamos entretanto que estas diferenças estão muito próximas do nível estimado de incerteza.

Apenas a estrela HD146233, entre estas ótimas candidatas, possui espectro na região UV. Segundo as linhas H e K, esta estrela possui nível de atividade cromosférica um pouco menor do que a atividade solar. A banda CN no espectro desta estrela mostra-se um pouco mais fraca que a mesma banda no espectro solar, o que é mostrado pelo fluxo de razão maior que a unidade no espectro apresentado na **Figura 2.2b**.

Os espectros UV, se analisados quantitativamente, são indicadores muito sensíveis de pequenas diferenças dos parâmetros das estrelas em relação ao Sol. Esta análise será deixada para um trabalho futuro.

Todo o processo de seleção que realizamos conduziu-nos a encontrar 5 novas gêmeas solares, além da estrela HD146233 (HR6060), que é a mais brilhantes de todas. Duas estrelas são fracas o suficiente (HD98649,  $V_T = 8,1$ , e HD118598,  $V_T = 8,3$ ) para serem utilizadas como objetos de calibração para grandes telescópios, os quais necessitam de estrelas de referência relativamente fracas.

O objetivo de agora em diante é estudar em detalhe estes objetos e obter o padrão detalhado de abundâncias para as mesmas, com espectros de melhor qualidade, assim como descrever o grau de atividade cromosférica com mais indicadores. Acreditamos que o estudo detalhado das propriedades destas estrelas possa auxiliar na compreensão da posição do Sol em relação à população local de estrelas de tipo G.

Finalmente, sugerimos uma atenção particular sobre estes objetos por parte dos grupos de pesquisa de busca de planetas extrasolares, assim como de escuta de possíveis sinais de rádio de civilizações tecnológicas extraterrestres.



## APÊNDICE 1

**Tabela A:** Larguras equivalentes ( $W_\lambda$ ) do Fe I, FeII, Ni I, Si I, Ba II, Na I e Ca I medidas na região de  $\lambda 6145$  para todos os objetos observados no OPD/LNA.

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	Ganimedes Jul/98	Ganimedes Out/99	Calisto	Europa	céu diurno
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	85,1	81,4	84,7	84,5	88,0
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	51,8	50,7	49,0	49,6	51,0
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	25,7	25,4	24,0	24,9	21,0
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	49,2	52,1	45,4	50,0	46,0
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	40,9	46,2	39,0	41,0	36,0
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	36,8	42,2	33,0	36,4	32,0
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	44,9	49,2	42,0	43,6	41,0
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	92,2	102,3	89,8	95,3	93,0
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	70,2	75,6	70,7	72,3	69,0
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	37,9	43,0	37,9	36,5	37,0
6125,025	Si I	5,61	-1,453	38,9	33,7	38,9	36,9	37,0
6141,727	Ba II	0,70	0,267	126,5	127,6	125,7	121,8	123,0
6142,494	Si I	5,62	-1,430	37,6	43,5	39,2	38,9	40,0
6145,020	Si I	5,61	-1,404	42,0	42,7	41,3	39,2	40,0
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	38,4	42,7	34,6	37,0	37,0
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	52,1	56,5	51,2	49,9	50,0
6154,230	Na I	2,10	-1,541	42,1	46,9	40,4	40,0	40,0
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	69,4	69,0	69,9	67,2	67,0
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	14,6	25,4	13,2	14,6	15,0
6160,753	Na I	2,10	-1,153	64,7	72,9	64,2	64,6	67,0
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	47,6	52,7	48,1	48,6	47,0
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	73,2	78,4	74,9	73,4	72,0
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	99,7	100,3	98,1	99,0	99,0
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	124,5	130,4	122,8	122,5	119,0
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	72,0	74,7	70,4	72,6	71,0
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	67,8	71,2	67,7	66,4	67,0
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	20,7	22,3	13,8	18,6	19,0
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	34,9	40,2	32,6	32,7	32,0
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	49,4	52,4	50,1	50,6	50,0
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	83,5	83,3	80,9	79,3	84,0
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	134,1	141,4	134,9	138,4	130,0
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	81,2	79,4	77,6	78,0	76,0
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	22,9	27,5	22,7	23,1	23,0



Tabela A (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	HD4308	HD8291	HD12264	HD13724	HD19518	HD24293	HD25874	HD28821
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	67,8	87,1	90,6	--	82,8	87,0	83,9	79,4
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	35,8	60,2	54,4	63,3	45,0	57,0	48,1	44,9
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	16,8	25,8	21,4	36,6	22,5	28,0	25,2	20,1
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	35,5	50,9	51,1	--	52,1	46,0	51,0	46,4
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	28,2	39,6	45,6	53,6	34,1	36,0	44,8	38,4
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	28,7	48,3	42,2	51,2	36,8	32,0	42,9	35,5
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	--	45,8	46,3	53,5	40,5	32,0	46,2	39,6
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	77,4	85,0	97,6	95,1	81,7	92,0	100,9	101,0
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	59,1	65,5	71,4	90,5	68,7	81,0	76,8	67,4
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	28,3	42,9	40,2	41,9	33,2	38,0	47,2	34,6
6125,025	Si I	5,61	-1,453	31,0	32,4	39,6	57,9	41,8	35,0	41,8	32,5
6141,727	Ba II	0,70	0,267	106,5	130,3	144,8	144,9	123,4	123,0	129,5	120,2
6142,494	Si I	5,62	-1,430	37,8	32,2	38,2	69,4	38,6	43,0	47,7	39,2
6145,020	Si I	5,61	-1,404	38,5	51,7	47,6	63,8	35,5	45,0	47,0	38,9
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	29,6	48,8	45,7	60,4	43,7	49,0	43,2	31,4
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	40,6	39,8	52,0	58,8	49,3	53,0	57,0	52,9
6154,230	Na I	2,10	-1,541	33,5	45,9	45,0	62,0	34,8	44,0	35,8	36,1
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	57,4	71,0	75,8	85,5	68,8	61,0	76,1	68,0
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	12,0	--	21,5	29,6	10,1	16,0	17,4	17,1
6160,753	Na I	2,10	-1,153	50,4	51,0	70,0	86,6	57,4	71,0	75,8	52,6
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	38,0	44,5	47,7	69,2	49,0	44,0	49,2	45,6
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	71,0	82,5	80,2	88,0	71,6	74,0	80,9	76,8
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	94,0	92,5	105,0	125,5	98,4	105,0	102,0	101,1
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	113,3	118,9	129,6	144,5	117,4	124,0	129,3	124,1
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	62,3	76,1	75,0	84,8	75,3	79,0	62,1	74,7
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	45,6	64,4	75,1	93,4	65,0	67,0	73,9	62,5
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	11,5	27,0	25,0	35,4	16,7	17,0	20,4	17,8
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	26,5	26,7	30,8	43,2	33,1	33,0	36,7	34,3
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	34,2	44,7	51,6	63,6	49,7	53,0	53,5	51,0
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	72,8	87,8	76,1	92,8	77,5	74,0	85,4	73,8
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	118,0	125,0	137,2	150,0	130,6	143,0	141,4	122,2
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	70,8	80,6	77,2	89,9	76,1	83,0	81,5	83,0
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	15,0	33,7	22,0	37,4	17,6	18,0	28,4	21,2

Tabela A (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	HD66653	HD73350 Jul/98	HD73350 Abr/99	HD98649	HD105901	HD115382	HD117939	HD118598
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	92,1	90,8	91,3	82,9	83,8	82,4	72,9	80,6
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	55,9	56,0	54,7	53,3	54,7	48,0	45,2	51,7
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	33,7	27,1	27,1	23,8	--	25,2	23,1	21,0
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	63,3	57,5	52,7	39,1	50,0	47,8	42,5	45,9
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	51,6	51,0	45,2	43,1	41,3	36,4	40,2	37,2
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	54,0	49,1	45,1	39,9	34,7	37,5	37,0	38,3
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	52,3	58,1	50,3	44,1	43,9	42,1	44,4	50,7
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	100,3	108,9	102,5	98,0	88,4	85,6	86,6	100,6
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	79,6	83,0	74,4	79,8	74,1	70,8	64,8	75,4
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	42,6	--	42,5	38,5	38,5	32,7	28,8	41,9
6125,025	Si I	5,61	-1,453	53,3	44,3	43,7	38,1	52,0	32,3	34,0	46,4
6141,727	Ba II	0,70	0,267	140,6	146,3	150,5	126,0	126,8	121,4	124,2	136,0
6142,494	Si I	5,62	-1,430	53,7	58,2	47,1	40,9	45,1	37,2	37,2	37,1
6145,020	Si I	5,61	-1,404	51,1	51,4	49,5	39,8	39,2	35,1	36,1	40,9
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	51,9	55,3	47,1	36,1	40,2	42,1	34,6	43,5
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	63,0	56,8	58,6	54,7	55,5	52,4	47,5	58,0
6154,230	Na I	2,10	-1,541	69,1	62,3	47,3	44,7	49,8	43,3	40,4	45,8
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	82,6	80,0	66,4	71,3	77,8	63,4	68,3	72,6
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	27,1	19,0	17,1	16,9	25,3	24,6	16,7	26,9
6160,753	Na I	2,10	-1,153	81,3	70,8	68,0	65,0	61,2	62,5	56,4	66,5
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	61,4	57,5	53,4	51,5	49,5	48,6	41,2	58,8
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	82,5	92,2	86,2	72,1	74,2	72,4	76,1	76,6
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	116,1	113,1	112,3	101,2	99,5	97,3	98,1	104,9
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	131,6	134,6	134,0	116,6	121,4	119,5	121,9	126,3
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	79,2	78,6	80,8	69,6	73,5	70,1	70,2	73,2
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	82,2	71,7	75,7	64,1	69,1	61,8	60,3	68,8
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	35,4	21,8	27,1	18,9	21,6	19,3	16,0	15,8
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	44,1	47,5	38,7	31,2	34,1	--	34,8	36,5
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	63,0	58,4	59,3	47,1	53,1	48,0	47,8	48,5
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	88,3	85,5	83,5	82,8	78,0	78,8	78,2	89,6
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	140,9	152,0	149,1	136,8	133,0	133,8	130,8	127,8
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	84,2	91,3	89,0	81,0	75,7	74,1	80,1	79,8
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	30,2	--	28,0	28,1	--	23,6	20,9	25,2

Tabela A (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	HD134664	HD138573	HD140690	HD142072	HD143337	HD145825	HD146233 Set/97	HD146233 Jul/98
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	92,8	84,5	86,1	98,4	78,8	92,0	86,0	87,4
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	57,0	50,4	46,8	64,3	31,8	56,0	50,0	50,4
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	28,4	23,7	26,2	30,1	18,6	28,8	22,0	22,7
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	52,2	52,5	43,6	53,2	42,6	51,2	49,0	47,5
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	49,3	41,7	45,9	50,7	28,3	43,1	40,0	40,2
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	51,4	36,6	42,2	44,4	37,2	38,4	35,0	36,9
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	47,5	47,8	52,3	51,4	39,3	45,5	44,0	43,2
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	97,8	85,5	95,5	115,2	85,4	95,9	97,0	94,6
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	78,9	71,1	78,9	76,1	70,0	66,9	69,0	71,3
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	52,3	36,7	32,2	--	32,0	35,2	37,0	39,6
6125,025	Si I	5,61	-1,453	53,1	36,6	45,3	44,9	49,5	41,5	39,0	40,0
6141,727	Ba II	0,70	0,267	140,8	127,2	123,2	129,3	115,2	135,3	133,0	130,5
6142,494	Si I	5,62	-1,430	41,3	30,5	42,4	49,3	30,2	43,6	45,0	42,4
6145,020	Si I	5,61	-1,404	43,3	44,8	50,0	51,6	33,6	47,3	44,0	45,1
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	50,6	42,2	44,6	48,1	37,1	39,0	43,0	40,0
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	60,1	53,3	57,0	59,2	47,3	51,7	52,0	54,4
6154,230	Na I	2,10	-1,541	59,7	48,4	55,6	45,6	--	47,9	44,0	44,8
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	71,5	70,8	73,7	86,6	65,2	72,4	70,0	70,3
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	20,5	20,6	19,9	21,7	14,6	16,2	17,0	19,4
6160,753	Na I	2,10	-1,153	69,6	69,3	75,9	74,2	57,9	64,5	64,0	65,9
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	--	50,5	49,4	55,3	42,2	47,3	51,0	48,7
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	84,1	77,3	78,3	83,0	71,4	77,5	75,0	77,5
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	99,1	98,1	108,1	118,4	95,5	101,2	102,0	102,7
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	127,7	123,2	127,6	144,9	117,4	128,5	125,0	127,6
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	79,0	76,4	77,9	85,4	58,9	73,4	72,0	73,2
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	70,2	68,9	74,6	76,2	59,2	69,1	68,0	71,9
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	29,7	19,1	18,9	27,1	--	21,0	21,0	19,9
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	46,3	34,5	35,3	45,8	31,2	35,4	35,0	35,1
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	54,5	50,9	56,9	62,1	41,5	53,7	52,0	53,1
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	81,7	86,9	84,5	92,6	94,7	84,5	83,0	84,2
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	144,3	131,9	136,6	155,5	110,6	137,6	136,0	134,3
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	85,6	80,5	84,7	93,9	65,8	84,8	79,0	80,6
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	29,5	22,8	30,2	28,9	23,7	27,6	25,0	23,7

Tabela A (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	HD150248 Jul/98	BD+153364	HD153458	HD155114	HD157750	HD164595	HD189625 Set/97	HD189625 Jul/98
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	83,6	86,5	90,3	75,4	94,3	79,0	111,0	98,8
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	46,9	46,9	52,0	47,6	55,1	47,8	59,0	63,8
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	24,8	24,0	19,8	24,4	26,5	18,1	37,0	38,5
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	56,3	51,3	62,8	43,2	56,8	46,1	58,0	67,6
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	44,1	44,0	49,7	39,9	47,9	37,2	56,0	54,9
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	34,3	39,9	50,4	37,3	45,4	34,4	41,0	55,5
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	41,5	55,1	53,5	45,0	52,7	43,6	58,0	63,9
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	90,8	101,8	107,1	88,1	109,6	91,1	110,0	116,2
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	74,8	78,5	83,0	65,4	76,4	72,1	82,0	84,5
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	--	49,3	45,2	34,1	49,3	39,1	53,0	64,1
6125,025	Si I	5,61	-1,453	38,2	51,6	49,4	31,2	43,9	35,2	52,0	50,8
6141,727	Ba II	0,70	0,267	118,4	121,2	153,0	144,0	144,9	122,6	140,0	139,4
6142,494	Si I	5,62	-1,430	44,9	45,4	49,2	36,4	49,2	42,7	54,0	52,6
6145,020	Si I	5,61	-1,404	46,6	44,0	51,0	39,6	48,9	43,1	60,0	53,5
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	38,9	48,7	48,1	39,8	50,9	38,2	48,0	49,1
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	53,0	48,9	65,0	56,3	59,5	53,4	63,0	62,1
6154,230	Na I	2,10	-1,541	45,2	44,2	43,9	20,3	58,2	43,0	58,0	53,9
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	70,4	73,8	80,8	68,1	81,1	66,5	74,0	80,8
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	22,4	22,8	25,8	--	23,4	13,5	23,0	20,9
6160,753	Na I	2,10	-1,153	59,8	71,6	--	54,8	74,8	64,3	80,0	88,7
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	45,6	50,5	57,7	48,8	62,7	48,4	59,0	66,4
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	74,5	81,2	88,4	67,4	85,6	77,2	92,0	88,6
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	98,9	91,4	112,9	99,4	110,5	101,2	112,0	108,4
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	123,6	116,2	132,9	123,0	142,1	119,5	136,0	135,4
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	74,1	73,1	80,0	71,4	89,1	72,5	85,0	91,1
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	68,4	73,7	75,0	61,5	79,5	60,8	84,0	84,1
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	19,5	11,5	29,9	20,2	30,2	19,5	30,0	32,6
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	33,6	31,5	38,8	32,2	44,9	30,7	49,0	50,2
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	52,2	54,1	58,7	45,0	60,9	50,6	61,0	70,1
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	83,4	88,5	87,6	71,4	85,4	80,0	90,0	85,6
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	135,4	138,0	144,3	124,4	151,2	132,8	147,0	157,7
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	74,9	87,5	90,3	78,6	85,1	75,7	83,0	87,8
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	28,3	19,0	28,1	18,7	29,9	22,4	28,0	33,1

Tabela A (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (eV)	log gf	HD190771	HD191487	HD202072	HD207043	HD211786	HD214385	HD216436	HD221343
6078,499	Fe I	4,79	-0,215	102,0	110,0	72,9	84,2	78,0	66,0	90,0	84,0
6079,016	Fe I	4,65	-0,931	61,0	--	36,6	56,0	46,5	33,3	53,1	55,0
6084,105	Fe II	3,20	-3,840	26,0	30,0	20,2	23,9	22,1	22,2	38,4	32,0
6086,288	Ni I	4,26	-0,450	55,0	48,0	38,5	54,5	48,3	42,5	50,6	29,0
6089,574	Fe I	5,02	-0,890	49,0	--	44,1	46,0	41,2	45,7	--	29,0
6093,649	Fe I	4,61	-1,352	43,0	36,0	34,8	38,3	42,9	26,3	37,4	28,0
6096,671	Fe I	3,98	-1,754	55,0	39,0	49,3	50,1	37,3	33,6	38,4	35,0
6102,183	Fe I	4,83	-0,108	105,0	102,0	85,3	106,0	88,6	86,1	100,1	90,0
6108,125	Ni I	1,68	-2,410	74,0	74,0	67,8	73,2	68,5	65,9	71,9	73,0
6111,078	Ni I	4,09	-0,747	45,0	41,0	36,6	38,7	33,2	31,2	46,4	35,0
6125,025	Si I	5,61	-1,453	51,0	47,0	35,6	38,3	38,9	23,2	44,9	37,0
6141,727	Ba II	0,70	0,267	156,0	145,0	125,0	148,2	121,7	115,5	129,5	135,0
6142,494	Si I	5,62	-1,430	49,0	43,0	35,6	45,5	--	25,8	44,4	52,0
6145,020	Si I	5,61	-1,404	53,0	42,0	47,0	44,6	--	32,6	42,3	50,0
6149,249	Fe II	3,89	-2,768	49,0	44,0	32,1	41,7	38,0	32,3	50,6	54,0
6151,623	Fe I	2,18	-3,312	59,0	48,0	48,4	51,4	49,5	42,1	52,8	48,0
6154,230	Na I	2,10	-1,541	49,0	32,0	27,9	42,2	39,1	31,8	48,0	39,0
6157,733	Fe I	4,07	-1,165	78,0	70,0	61,3	73,3	63,1	59,6	--	66,0
6159,382	Fe I	4,61	-1,774	15,0	10,0	12,8	21,5	15,0	16,5	22,7	27,0
6160,753	Na I	2,10	-1,153	79,0	58,0	54,2	63,9	50,5	49,9	61,0	71,0
6165,363	Fe I	4,14	-1,492	61,0	49,0	38,0	55,2	39,7	36,7	57,8	50,0
6166,440	Ca I	2,52	-1,106	85,0	76,0	65,9	81,1	67,3	64,9	81,6	77,0
6169,044	Ca I	2,52	-0,662	113,0	96,0	90,8	109,5	93,5	91,6	111,7	99,0
6169,564	Ca I	2,52	-0,410	132,0	121,0	112,2	138,3	110,2	108,4	124,8	141,0
6173,341	Fe I	2,22	-2,794	85,0	70,0	58,8	69,2	71,8	61,1	80,7	85,0
6176,816	Ni I	4,09	-0,153	79,0	66,0	56,9	--	57,2	49,6	65,1	72,0
6185,704	Fe I	5,65	-0,736	30,0	21,0	11,7	23,7	17,4	--	31,9	--
6186,717	Ni I	4,10	-0,846	43,0	33,0	23,8	37,7	23,9	22,0	39,1	31,0
6187,995	Fe I	3,94	-1,614	59,0	50,0	41,4	25,3	42,4	35,7	45,8	66,0
6191,186	Ni I	1,68	-2,073	92,0	75,0	72,4	78,9	72,8	66,6	90,1	79,0
6191,571	Fe I	2,43	-1,617	148,0	141,0	124,6	147,7	127,2	119,6	141,7	150,0
6200,321	Fe I	2,61	-2,334	87,0	77,0	70,9	83,1	76,1	70,4	75,0	89,0
6204,610	Ni I	4,09	-1,096	28	22	12,8	20,5	20,4	17	22,4	23,0

**Tabela B:** Larguras equivalentes ( $W_\lambda$ ) do Fe I, FeII, Ni I, Si I, Ba II, Na I e Ca I medidas na região de  $\lambda 6145$  para todos os objetos observados com o espectrógrafo FEROS.

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (V)	log gf	Ganimedes	Europa	céu diurno	HD9986	HD19518	HD35041
6078,499	Fe I	4,79	-0,314	81,6	83,0	85,0	89,3	73,7	80,0
6079,016	Fe I	4,65	-0,962	50,0	51,0	48,8	53,5	40,8	49,5
6084,105	Fe II	3,20	-3,832	21,1	25,1	28,5	23,4	19,7	21,2
6086,288	Ni I	4,26	-0,422	46,5	48,3	48,2	45,0	39,3	36,8
6089,574	Fe I	5,02	-0,848	38,4	41,3	41,3	40,0	32,9	35,3
6093,649	Fe I	4,61	-1,408	29,4	37,6	39,1	36,1	25,9	28,0
6096,671	Fe I	3,98	-1,762	40,7	41,1	37,7	44,2	35,3	36,3
6102,183	Fe I	4,83	-0,192	87,9	86,9	83,1	87,8	78,8	87,5
6108,125	Ni I	1,68	-2,456	67,6	66,4	64,9	74,2	61,4	58,7
6111,078	Ni I	4,09	-0,796	35,7	35,1	31,8	37,3	29,3	29,6
6125,025	Si I	5,61	-1,489	34,9	34,3	35,7	40,2	30,7	29,5
6141,727	Ba II	0,70	0,239	121,7	120,8	121,3	129,8	123,1	148,9
6142,494	Si I	5,62	-1,424	38,1	38,2	37,2	42,8	33,4	31,8
6145,02	Si I	5,61	-1,384	41,0	42,3	37,3	44,8	36,4	33,5
6149,249	Fe II	3,89	-2,752	37,9	37,5	39,4	41,2	35,5	35,2
6151,623	Fe I	2,18	-3,320	50,1	52,8	49,6	55,2	46,5	47,2
6154,23	Na I	2,10	-1,533	40,3	40,7	38,3	43,5	33,2	29,9
6157,733	Fe I	4,07	-1,189	66,2	66,1	65,3	73,0	60,5	61,5
6159,382	Fe I	4,61	-1,838	14,0	14,0	14,8	17,5	12,0	12,6
6160,753	Na I	2,10	-1,178	63,2	63,2	61,0	65,9	51,8	48,9
6165,363	Fe I	4,14	-1,530	45,0	48,1	45,1	50,7	43,0	41,1
6166,44	Ca I	2,52	-1,087	73,7	73,5	68,0	79,3	69,5	71,0
6169,044	Ca I	2,52	-0,660	101,0	100,9	96,5	102,7	91,8	92,2
6169,564	Ca I	2,52	-0,441	118,1	118,3	115,2	125,1	113,2	122,6
6173,341	Fe I	2,22	-2,797	73,1	71,8	68,4	78,4	65,1	69,8
6176,816	Ni I	4,09	-0,203	66,8	67,3	62,5	69,7	60,2	59,2
6185,704	Fe I	5,65	-0,766	17,6	17,2	14,7	18,6	12,8	12,6
6186,717	Ni I	4,10	-0,860	32,3	32,6	--	34,1	24,9	24,1
6187,995	Fe I	3,94	-1,621	50,1	49,9	44,0	52,3	42,7	43,2
6191,186	Ni I	1,68	-2,219	78,8	78,5	78,3	80,4	72,4	71,7
6191,571	Fe I	2,43	-1,576	135,1	136,4	128,7	137,9	124,2	135,6
6200,321	Fe I	2,61	-2,393	74,5	76,7	73,7	78,4	69,8	73,3
6204,61	Ni I	4,09	-1,127	21,5	23,5	24,1	28,5	17,3	16,1

Tabela B (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (V)	log gf	HD32963	HD37773	HD66653	HD68168	HD71334	HD73350
6078,499	Fe I	4,79	-0,314	87,5	86,3	88,3	89,0	77,6	89,9
6079,016	Fe I	4,65	-0,962	53,1	53,2	54,4	55,0	44,7	55,0
6084,105	Fe II	3,20	-3,832	25,4	23,8	26,7	25,0	19,5	25,1
6086,288	Ni I	4,26	-0,422	53,6	51,0	51,6	53,9	43,2	50,3
6089,574	Fe I	5,02	-0,848	41,8	42,6	42,6	43,9	36,7	42,3
6093,649	Fe I	4,61	-1,408	36,9	35,7	36,5	37,3	30,1	36,8
6096,671	Fe I	3,98	-1,762	44,5	45,2	45,4	47,4	37,1	45,3
6102,183	Fe I	4,83	-0,192	91,0	92,1	95,8	92,5	85,5	97,2
6108,125	Ni I	1,68	-2,456	74,6	74,2	70,7	76,5	66,9	68,6
6111,078	Ni I	4,09	-0,796	42,1	42,1	41,9	42,7	33,7	38,2
6125,025	Si I	5,61	-1,489	41,6	39,9	42,2	43,1	33,5	38,8
6141,727	Ba II	0,70	0,239	123,9	121,6	130,9	126	116,9	145,3
6142,494	Si I	5,62	-1,424	42,1	41,3	45,3	44,4	34,8	42,6
6145,02	Si I	5,61	-1,384	45,7	45,3	47,6	47,5	38,2	44,3
6149,249	Fe II	3,89	-2,752	39,5	39,7	43,0	41,8	33,8	41,5
6151,623	Fe I	2,18	-3,320	54,6	56,3	53,2	58,0	50,2	54,3
6154,23	Na I	2,10	-1,533	48,6	49,1	48,4	47,2	40,8	43,5
6157,733	Fe I	4,07	-1,189	68,9	70,9	71,4	71,6	65,3	71,8
6159,382	Fe I	4,61	-1,838	15,8	15,5	16,5	16,6	11,9	16,6
6160,753	Na I	2,10	-1,178	69,5	71,2	68,0	67,7	56,2	62,6
6165,363	Fe I	4,14	-1,530	51,7	52,0	51,5	53,2	45,4	52,0
6166,44	Ca I	2,52	-1,087	78,6	79,4	77,8	79,8	72,3	79,0
6169,044	Ca I	2,52	-0,660	103,5	105,5	104,2	106,3	100,5	107,8
6169,564	Ca I	2,52	-0,441	125,4	125,1	126,7	126,2	121,7	131,5
6173,341	Fe I	2,22	-2,797	76,1	77,2	74,9	76,5	69,6	77,1
6176,816	Ni I	4,09	-0,203	71,8	73,6	74,4	73,8	63,5	71,0
6185,704	Fe I	5,65	-0,766	19,6	19,7	19,4	21,1	15,3	19,7
6186,717	Ni I	4,10	-0,860	36,2	36,5	36,1	39,4	29,2	33,8
6187,995	Fe I	3,94	-1,621	53,6	55,2	52,5	56,7	46,9	54,1
6191,186	Ni I	1,68	-2,219	85,1	85,8	97,1	86,4	77,0	81,2
6191,571	Fe I	2,43	-1,576	138,7	143	144,3	142,6	133,3	145,2
6200,321	Fe I	2,61	-2,393	79,7	81,4	80,0	82,5	75,1	81,7
6204,61	Ni I	4,09	-1,127	25,9	26,7	26,9	27,8	21,0	24,4

Tabela B (cont.)

$\lambda$ (Å)	Elem.	$\chi$ (V)	log gf	HD88072	HD98649	HD105901	HD115382	HD146233	HD187237
6078,499	Fe I	4,79	-0,314	93,7	79,7	79,2	77,3	76,9	90,2
6079,016	Fe I	4,65	-0,962	60,8	48,5	45,7	44,0	44,6	54,2
6084,105	Fe II	3,20	-3,832	33,5	14,6	20,8	19,5	19,4	28,3
6086,288	Ni I	4,26	-0,422	51,4	43,7	41,6	40,7	45,5	44,7
6089,574	Fe I	5,02	-0,848	42,5	37,3	34,5	32,5	39,9	39,7
6093,649	Fe I	4,61	-1,408	37,2	32,0	29,6	29,7	34,9	35,0
6096,671	Fe I	3,98	-1,762	47,9	39,6	37,5	35,9	35,7	42,6
6102,183	Fe I	4,83	-0,192	93,5	87,9	84,2	80,2	80,5	92,8
6108,125	Ni I	1,68	-2,456	76,5	67,3	64,1	63,1	59,7	79,6
6111,078	Ni I	4,09	-0,796	39,2	34,7	34,2	32,6	33,4	36,5
6125,025	Si I	5,61	-1,489	38,9	31,3	35,3	31,7	32,8	35,5
6141,727	Ba II	0,70	0,239	130,5	119,1	121,6	115	114,3	137,5
6142,494	Si I	5,62	-1,424	47,0	35,7	36,6	34,7	35,7	38,9
6145,02	Si I	5,61	-1,384	46,3	38,7	42,3	36,4	39,9	42,5
6149,249	Fe II	3,89	-2,752	42,8	35,8	38,4	35,3	36,2	41,8
6151,623	Fe I	2,18	-3,320	57,5	50,7	47,7	46,8	47,8	55,9
6154,23	Na I	2,10	-1,533	46,7	37,2	35,1	35,3	37,8	43,3
6157,733	Fe I	4,07	-1,189	71,5	64,3	63,3	60,7	63,9	83,5
6159,382	Fe I	4,61	-1,838	14,6	11,8	11,1	10,8	16,6	25,7
6160,753	Na I	2,10	-1,178	67,5	57,5	55,4	53,3	73,9	59,9
6165,363	Fe I	4,14	-1,530	50,6	45,3	44,4	44,1	42,6	53,9
6166,44	Ca I	2,52	-1,087	78,3	74,0	69,5	69,9	67,3	81,2
6169,044	Ca I	2,52	-0,660	105,8	100,4	92,9	92,7	99,3	105,4
6169,564	Ca I	2,52	-0,441	128,0	118,0	112,5	112,3	110,9	130,6
6173,341	Fe I	2,22	-2,797	79,2	72,5	68,9	66,1	63,9	99,6
6176,816	Ni I	4,09	-0,203	78,2	65,4	65,2	62,4	63,0	67,9
6185,704	Fe I	5,65	-0,766	19,4	15,7	17,2	13,8	17,0	23,1
6186,717	Ni I	4,10	-0,860	34,9	30,0	31,1	28,1	30,3	33,4
6187,995	Fe I	3,94	-1,621	56,3	47,9	46,3	44,9	44,7	52,7
6191,186	Ni I	1,68	-2,219	85,0	76,8	74,1	73,8	71,8	75,6
6191,571	Fe I	2,43	-1,576	145,0	133,5	130,9	128,3	123,1	138,3
6200,321	Fe I	2,61	-2,393	83,1	75,7	73,6	70,9	68,3	85,0
6204,61	Ni I	4,09	-1,127	25,7	21,6	22,5	19,9	22,7	30,7





## Referências:

- Allen, C. W. 1973, *Astrophysical Quantities*, Athlone Press, University of London
- Batten, A. H., Fletcher, J. M., MacCarthy, D. G. 1989, *Eighth Catalogue of the Orbital Elements of Spectroscopic Binary Systems*, Publications of the Dominion Astrophysical Observatory, vol. XVII
- Butler, R. P., Vogt, S. S., Marcy, G. W., Fischer, D. A., Henry, G. W., Apps, K. 2000, *ApJ* submetido
- Cayrel de Strobel, G. 1996, *A&AR* **7**, 243
- Cochran, W. D., Hatzes, A. P., Butler, R. P., Marcy, G. W. 1997, *ApJ* **483**, 457
- Crawford, D. L. 1975, *ApJ* **80**, 955
- Dragon, J. N., Mutschlechner, J. P. 1980, *ApJ* **239**, 1045
- Duncan, D. K., Vaughan, A. H., Wilson, O. C., Preston, G. W., Frazer, J., Lanning, H., Misch, A., Mueller, J., Soyumer, D., Woogard, L., Baliunas, S. L., Noyes, R. W., Hartmann, L. W., Porter, A., Zwaan, C., Middelkoop, F., Rutten, R. G. M., Mihalas, D. 1991, *ApJS* **76**, 383
- Duquennoy, A., Mayor, M. 1991, *A&A* **248**, 485
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E., Tomkin, J. 1993, *A&A* **275**, 101
- ESA, 1997, *The Hipparcos Catalogue*, ESA SP-1200
- Friel, E., Cayrel de Strobel, G., Chmielewski, Y., Spite, M., Lèbre, A., Bentolila, C. 1993, *A&A* **274**, 85
- Fuhrmann, K., Pfeiffer, M. J., Bannkopf, J. 1997, *A&A* **326**, 1081
- Fuhrmann, K., Axer, M., Gehren, T. 1993, *A&A* **271**, 451
- Gehren, T. 1981, *A&A* **100**, 97

Gray, D. F. 1976, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*, John Wiley & Sons Inc., pág. 371

Grevesse, N., Noels, A. 1993, *Origin and Evolution of the Elements*, eds. N. Prantzos, E. Vangioni-Flam e M Cassé

Habets, G. M. J., Heintze, J. R. W. 1981, *A&AS* **46**, 193

Hardorp, J. 1978, *A&A* **63**, 383

Hardorp, J. 1981, *A&A* **96**, 123

Hardorp, J. 1982, *A&A* **105**, 120

Henry, T. J., Soderblom, R., Donahue, R. A., Baliunas, S. L. 1996, *AJ* **111**, 439

Hoel, P. G. 1971, *Introduction to Mathematical Statistics*

Hoffleit, D., Jaschek, C. 1982, *The Bright Star Catalogue*, Yale University Observatory, New Haven

Input Catalogue (INCA), *Catálogo do Hipparcos*

Kurucz, R. L., Furenlid, I., Brault, J., Testerman, L. 1984, *The Solar Flux Atlas from 296 nm to 1300 nm*, National Solar Observatory

Magalhães, S. D., da Silva, L. 1990, *Rev. Mex. Astron. Astrof.* **21**, 751

McNamara, D. H., Powell, J. M. 1985, *PASP* **97**, 1101

Meylan, T., Furenlid, I., Wiggs, M. S. 1993, *ApJS*. **85**, 163

Moore, C. E., Minnaert, M., Houtgast, J. 1996, *The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å*, Nat. Bur. Std., US Monograph 61

Neckel, H. 1986, *A&A* **159**, 175

Olsen, E. H. 1983, *A&AS* **54**, 55

Olsen, E. H. 1993, *A&AS* **102**, 89

Olsen, E. H. 1994, *A&AS* **104**, 429

Pasquini, L. 1992, *A&A* **266**, 347

Pasquini, L., Pallavicini, R. 1991, *A&A* **251**, 199

Porto de Mello, G. F. 1996, *Tese de Doutorado*, Observatório Nacional/CNPq, Rio de Janeiro, Brasil

Porto de Mello, G. F., da Silva, L. 1997, *ApJ Letters* **476**, L89

Porto de Mello, G. F. 2000, *não publicado*

Praderie, F. 1967, *Ann. Astrophys.* **30**, 31

Rocha Pinto, H., Maciel, W. 1997, *A&A* **111**, 222

Rocha Pinto, H. 2000, *tese de doutorado*, USP/Instituto Astronômico e Geofísico

Strömngren, B. 1965, *QJRAS*, **4**, 8