Determinação de parâmetros estelares

Pedro Fanha[1]

Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
e-mail: pedro.fanha@fc.up.pt

April 23, 2021

ABSTRACT

Objetivos. Implementar um algoritmo para a determinação automática de parâmetros estelares (Teff, logg, [Fe/H], [α/Fe]) através do espetro da estrela. Determinar os parâmetros para duas estrelas 1 e 2 dadas, desconhecidas, determinando ainda $vsini$, a velocidade de rotação da estrela na direção do espetrógrafo.
Método. Utilizou-se o método das larguras equivalentes para comparar espetros reais de estrelas semelhantes ao Sol com uma grelha de espetros retirados do projeto AMBRE [de Laverny, P. et al. (2012)]. Utilizou-se a lista de riscas de Tsantaki, M. et al. (2013). Para otimizar a comparação de espetros, estimou-se a temperatura de excitação através das curvas de crescimento de Fe(I). Para determinar $vsini$ (velocidade de rotação na direção do observador), utilizou-se o método dos zeros da transformada de Fourier das riscas. Testou-se o algoritmo com vários espetros da base de dados *SPACEINN-SISMA* [Rainer et al. (2016)].
Resultados. Verificou-se que a temperatura de excitação calculada é boa estimativa da temperatura efetiva, e que a sua incerteza é um bom intervalo para restringir a grelha de espetros sintéticos. Determinaram-se os parâmetros estelares para 87 espetros da base de dados SISMA, donde se concluiu que o algoritmo consegue determinar suficientemente bem (i.e. dentro dos intervalos de incerteza) a temperatura efetiva, e razoavelmente bem (i.e. a maior parte dos valores estão dentro ou perto do intervalo de incerteza dos valores de referência) os restantes parâmetros. Determinaram-se os parâmetros estelares para as estrelas 1 e 2, obtendo-se para a estrela 1: T_{eff} de 6000 ± 250 K, log(g) de 3.5 ± 0.5 dex, $[Fe/H]$ de 0.0 ± 0.25 dex e $[\alpha/Fe]$ de 0.0 ± 0.1 dex; e para a estrela 2: T_{eff} de 5750 ± 1000 K, log(g) de 3.5 ± 0.5 dex, $[Fe/H]$ de 0.25 ± 0.75 dex e $[\alpha/Fe]$ de 0.0 ± 0.2 dex. Determinou-se $vsini = 2.3851 \pm 0.0099\ \mathrm{km\,s^{-1}}$ para a estrela 1, e não foi possível determinar $vsini$ para a estrela 2.
Conclusões. Conseguiu-se implementar um algoritmo para determinar os parâmetros estelares desejados. O algoritmo conseguiu determinar os parâmetros de uma grande quantidade de espetros reais com boa concordância na temperatura efetiva, mas não tão boa nos restantes parâmetros. No entanto, a grelha também não permite determinar esses parâmetros com muita exatidão. Os valores calculados para $vsini$ não são muito fiáveis pois não foram determinados algoritmicamente.

Palavras-chave. parâmetros estelares – Sol – método das larguras equivalentes – AMBRE – curvas de crescimento – SISMA –

1. Introdução

Alguns dos parâmetros principais que caracterizam uma estrela são T_{eff}, a temperatura efetiva, $log(g)$, a aceleração da gravidade à superfície, $[Fe/H]$, a metalicidade, $[\alpha/Fe]$, o índice químico, e $vsini$, a velocidade de rotação na direção do observador. Dado o espetro fotosférico de uma estrela, é possível determinar estes parâmetros através da comparação das larguras equivalentes, W_λ, das riscas do espetro real, i.e. a área da risca quando normalizada ao contínuo, com as larguras equivalentes de espetros sintéticos, cujos parâmetros são conhecidos.

No âmbito da cadeira de Astronomia Computacional da licenciatura em Física da Universidade do Porto, implementou-se um algoritmo para determinar estes parâmetros para estrelas semelhantes ao Sol, com o objetivo particular de determinar os parâmetros estelares para dois espetros *estrela1.fits* e *estrela2_vcor.fits* dados.

As riscas analisadas nos espetros foram escolhidas com base nos dados publicados em Tsantaki, M. et al. (2013), de modo a obter os parâmetros com melhor exatidão para estrelas deste tipo. A determinação das suas larguras equivalentes é direta, sendo apenas necessário determinar os limites laterais das riscas. As larguras equivalentes são comparadas com as correspondentes nos espetros da grelha do projeto AMBRE [de Laverny, P. et al. (2012)], determinando-se o melhor espetro sintético como aquele para o qual a diferença quadrada de W_λ é mínima:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_i^N \left(W_\lambda^{i,real} - W_\lambda^{i,grelha} \right)^2 \tag{1}$$

onde N é o número de riscas existentes simultaneamente no espetro real e no espetro da grelha com o qual se está a comparar.

A temperatura de excitação, cujo valor estimado deve estar próximo da temperatura efetiva (estrela em equilíbrio térmico), é calculada através das curvas de crescimento de Fe(I). Selecionando apenas riscas deste elemento e agrupando-as em multipletos com energias potenciais semelhantes, é possível determinar T_{exc} pela equação:

$$\log_{10}\left(\frac{W_\lambda}{\lambda}\right) = \log_{10}(Const) + \log_{10}(A) + \log_{10}(\lambda f g) - \frac{5040}{T_{exc}}\chi_i \tag{2}$$

onde W_λ é a largura equivalente da risca, λ é o comprimento de onda central da risca, $Const$, A (abundância), g (peso estatístico do nível de energia associado à risca) e f (força do oscilador) são constantes para o mesmo elemento químico, e χ_i é a energia potencial da risca (neste caso, utilizar-se-á a do multipleto, com $\chi_{multipleto} = mean(\chi_{risca})$.

Para dois multipletos i, j, em que $\chi_i \neq \chi_j$, tem-se que a distância horizontal entre os gráficos de $\log_{10}\left(\frac{W_\lambda}{\lambda}\right)$ em função de $\log_{10}(\lambda f g)$ é:

$$\Delta = \frac{5040}{T_{exc}}(\chi_{i_2} - \chi_{i_1}) \tag{3}$$

o que nos dá T_{exc}. A determinação da temperatura de excitação permite-nos reduzir consideravelmente o número de espetros sintéticos a comparar.

Para visualizar os resultados obtidos, é necessário ter em conta efeitos de alargamento das riscas. Considerou-se apenas os efeitos do instrumento de medição e da rotação da estrela na direção do observador. Isto é feito através da convolução de cada espetro sintético com os perfis instrumental e de rotação do espetro real, simulando assim este espetro. Para isso, é necessário conhecer o poder de resolução do espetro observado, e é necessário determinar $vsini$.

A determinação de $vsini$ é feita pelos zeros da transformada de Fourier das riscas. Depois da risca normalizada com contínuo em 0, determina-se a transformada de Fourier. O seu primeiro zero, σ_1, relaciona-se com $\Delta\lambda_M$ pela fórmula:

$$\Delta\lambda_M \sigma_1 = 0.660 \tag{4}$$

para estrelas semelhantes ao Sol, onde $\Delta\lambda_M = \frac{\lambda_0 vsini}{c}$, com λ_0 o comprimento de onda do centro da risca e c a velocidade da luz. Obtendo σ_1, determina-se $\Delta\lambda_M$ e $vsini$, podendo então gerar a função de rotação:

$$G_\epsilon(\lambda - \lambda_0) = \frac{2(1-\epsilon)\left(1 - \left(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Delta\lambda_M}\right)^2\right)^{1/2} + \frac{\pi\epsilon}{2}\left(1 - \left(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Delta\lambda_M}\right)^2\right)}{\pi\Delta\lambda_M(1-\epsilon/3)} \tag{5}$$

onde ϵ é a constante do escurecimento do limbo. Para gerar o perfil instrumental, requere-se apenas saber o poder de resolução do espetro. Tem-se que:

$$R = \frac{<\lambda>}{FWHM} \tag{6}$$

onde R é o poder de resolução espetral, $<\lambda>$ é o comprimento de onda médio do intervalo a considerar no espetro, e $FWHM$ representa a resolução cromática. O perfil instrumental é representado por uma Gaussiana de desvio padrão:

$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}}$$

Na secção 2, descrevem-se os passos de implementação do algoritmo.

Na secção 3, determinam-se os parâmetros de configuração ótimos e analisam-se os resultados do algoritmo para vários espetros de teste.

Na secção 4, apresentam-se os resultados obtidos da aplicação do algoritmo às duas estrelas cujos parâmetros se queriam determinar, para além de se determinar $vsini$.

2. Implementação

Tomam-se todas as riscas na lista de Tsantaki, M. et al. (2013). O comprimento de onda central de cada risca nos espetros SISMA é corrigido com a velocidade de afastamento, v_{rad}, pela fórmula:

$$\lambda_{c_{corr}} = \lambda_c\left(1 + \frac{v_{rad}}{c}\right) \tag{7}$$

Os limites de cada risca são determinados obtendo os 1ºs máximos (numa janela de 5 pontos, valor ótimo determinado, ver seção 3) à volta do comprimento de onda central. De forma a minimizar o efeito do ruído, é aplicado o filtro média móvel centrada. O nº de iterações ótimo é determinado na seção 3.

Para verificar a qualidade das riscas, faz-se um ajuste Gaussiano a cada risca, que as deve aproximar suficientemente bem. Daí, podem-se extrair λ_c exato, assim como os parâmetros que descrevem a risca. Utiliza-se $x_0 = \lambda_{c_{corr}}$, $\sigma = 0.1$, $A = -1.0$, $B = mean(flux)$ como estimativa inicial dos parâmetros, se a Gaussiana for dada por:

$$G(x_0, \sigma, A, B)(x) = A\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) + B \tag{8}$$

Os parâmetros da Gaussiana são utilizados para calcular W_λ através da seguinte fórmula:

$$W_\lambda = -\frac{\sqrt{2\pi}A\sigma}{B} \tag{9}$$

Utilizando a fórmula teórica, é mais simples determinar corretamente a área da risca (não é necessária normalização), além de permitir propagar as incertezas associadas aos parâmetros acima para W_λ, indicando quão boa a risca é e quão boa a nossa estimativa de largura equivalente é. Esta incerteza é ainda propagada até aos parâmetros finais T_{eff}, $log(g)$, $[Fe/H]$, $[\alpha/Fe]$, obtendo-se a incerteza nestes parâmetros devido ao algoritmo. Para obter os melhores resultados, são descartadas riscas com incerteza demasiado alta (detalhes na seção 3). É feita propagação linear de incertezas, pelo que as incertezas obtidas correspondem ao erro máximo possível, não ao mais provável.

Para determinar a temperatura de excitação, consideram-se as riscas que estão bem definidas no espetro em análise, selecionam-se apenas as riscas de Fe(I) e organizam-se nos multipletos apresentados na tabela 1. São calculadas as curvas de crescimento com base nestes multipletos, utilizando-se a equação 2, com $\log_{10}(\lambda f g)$ a variável independente e $\log_{10}\left(\frac{W_\lambda}{\lambda}\right)$ a variável dependente, e é feito um ajuste linear (estimativa inicial: $m = 1.0$, $b = 0.0$). A incerteza na variável independente nem sempre é nula devido a existir uma incerteza associada a v_{rad} (para os espetros SISMA), no entanto, esta é várias ordens

	Intervalo EP
1	2.18 - 2.28
2	2.42 - 2.61
3	3.57 - 3.69
4	4.19 - 4.22
5	4.55 - 4.65

Table 1. Lista de multipletos utilizado

de grandeza inferior à incerteza na variável dependente, pelo que a incerteza na variável independente pode ser desprezada. De modo a remover pontos duvidosos, aplica-se σ-clipping iterativamente à curva de crescimento até todos os resíduos serem inferiores a 2σ, onde σ é tomado como a raíz quadrada do erro quadrático médio do ajuste.

Testou-se dois métodos de determinação de Δ. O método 1 implica determinar o intervalo de y (variável dependente) em que ambos os multipletos estão definidos, calcular o ponto médio desse intervalo, $y = y_0$, e tomar Δ como a distância entre os dois multipletos nesse ponto y_0, o que só funciona se os multipletos estiverem definidos num mesmo intervalo. O método 2 envolve tomar y_0 como a média dos valores y dos pontos de ambos os multipletos juntos. Este método não sofre do mesmo problema do anterior e tem a vantagem de ter em conta onde os multipletos estão melhor caracterizados (mais pontos). É feita propagação linear de incertezas desde os parâmetros do ajuste até T_{exc}. Na seção 3, verifica-se que esta incerteza dá uma boa estimativa do intervalo de T_{eff} a considerar na comparação com a grelha.

De modo a calibrar a escolha de multipletos, para cada espetro em análise, compara-se a estimativa de T_{exc} dada utilizando o multipleto escolhido e as larguras equivalentes do Sol dadas em Tsantaki, M. et al. (2013) com a T_{eff} de referência do Sol (5777 K). Como cada espetro tem diferentes riscas definidas com diferentes larguras equivalentes, uma calibração feita para um espetro não será necessariamente boa para outro espetro. É escolhida a combinação de multipletos para o qual se obtém menor erro em relação ao Sol.

O mesmo método de determinação de larguras equivalentes é aplicado a cada espetro sintético. Tomam-se os espetros em que $T_{eff} \in [T_{exc} - \Delta T_{exc}, T_{exc} + \Delta T_{exc}]$. O melhor espetro sintético é determinado pela diferença mínima quadrada, calculada através da equação 1. Aos parâmetros finais é atribuída uma incerteza baseada em dois fatores diferentes: 1) a incerteza associada ao *step* da grelha, 2) a incerteza associada à diferença mínima quadrada. Em relação a 2), apesar de haver um espetro para o qual χ^2 é mínimo, as incertezas nas larguras equivalentes propagadas conferem a χ^2 também uma incerteza. A incerteza 2) adicionada a cada parâmetro é a variação máxima encontrada do valor do parâmetro entre o espetro com menor χ^2 e todos os outros espetros para os quais o intervalo de incerteza do seu χ^2 interseta o intervalo de incerteza de χ^2 mínimo.

A determinação de $vsini$ é feita manualmente, visualmente, pelo método descrito na seção 1. Os espetros dados para análise aparentam ter $vsini$ muito baixo, pelo que a sua determinação automática é impossível e, mesmo manualmente, é pouco fiável. Na seção 4, descreve-se em detalhe o procedimento utilizado.

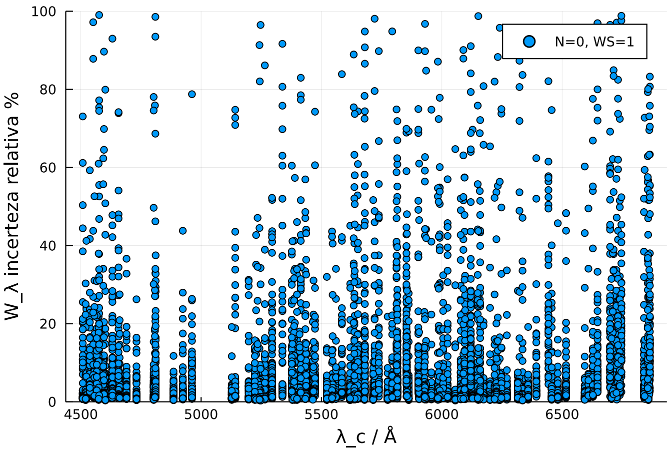

Fig. 1. Distribuição de incertezas relativas percentuais. Foram agregadas as incertezas de todas as riscas encontradas em todos os 87 espetros SISMA. Apresentam-se apenas incertezas inferiores ou iguais a 100%, apesar de haver riscas com incertezas superiores.

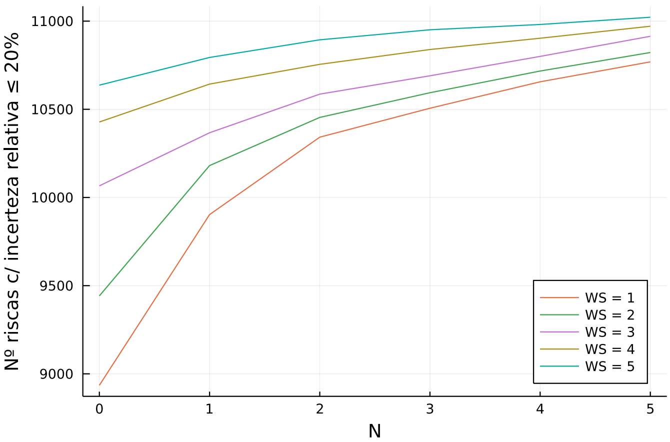

Fig. 2. Nº de riscas encontradas (soma dos 87 espetros) e com incerteza $\leq$ 20%. O número total de riscas é 87 espetros $\times$ 137 riscas = 11919.

3. Testes

Analisou-se a distribuição de incertezas relativas percentuais das larguras equivalentes calculadas para 87 espetros SISMA para determinar o efeito de diferentes N (número de iterações do filtro média móvel centrada) e WS (*window size*, i.e. número de pontos a verificar à volta de cada potencial máximo para confirmar que é um pico). O gráfico 1 representa os resultados obtidos para $N = 0$, $WS = 1$ (sem filtro, 1º pico numa janela de 1 ponto). Verificou-se que a maioria das incertezas eram inferiores a 20%. De modo a minimizar o efeito de medições potencialmente erradas, descartaram-se riscas com incerteza superior. De seguida, verificou-se o efeito de alterar N e WS na incerteza. O gráfico 2 apresenta os resultados obtidos.

Toma-se $N = 5$, $WS = 5$ e apenas as riscas com incerteza $\leq$ 20% daqui para a frente. Aplica-se o filtro tanto ao espetro real como aos espetros sintéticos.

Testaram-se ambos os métodos 1 e 2 para a determinação da temperatura de excitação. Quis-se verificar se as estimativas obtidas estavam suficientemente perto das tem-

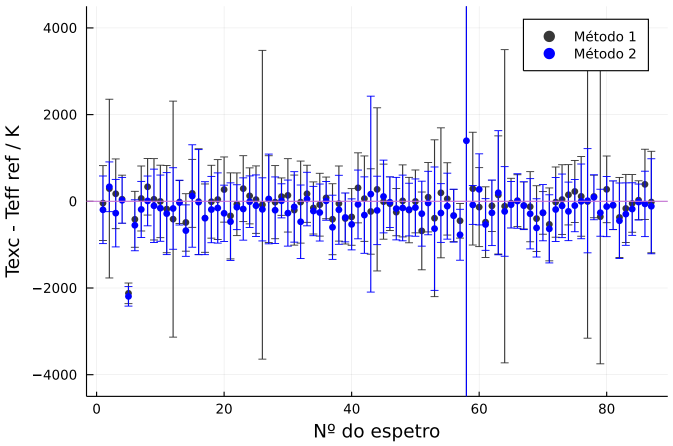

Fig. 3. Temperaturas de excitação obtidas para cada um dos 87 espetros.

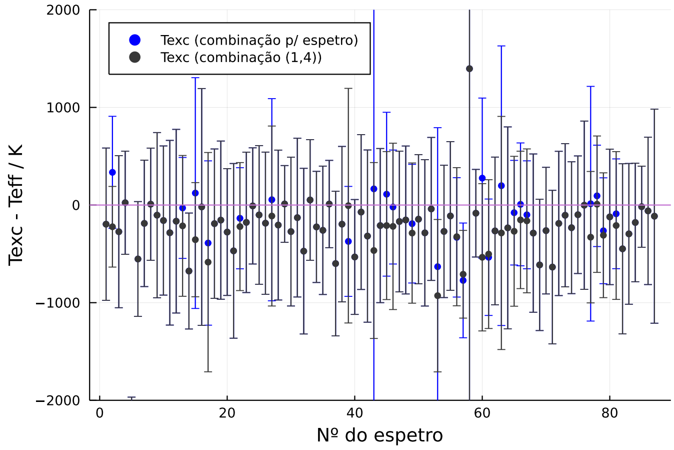

Fig. 5. Erros nas temperaturas de excitação obtidas para cada espetro, utilizando a melhor combinação para cada espetro, e utilizando apenas a combinação (1,4).

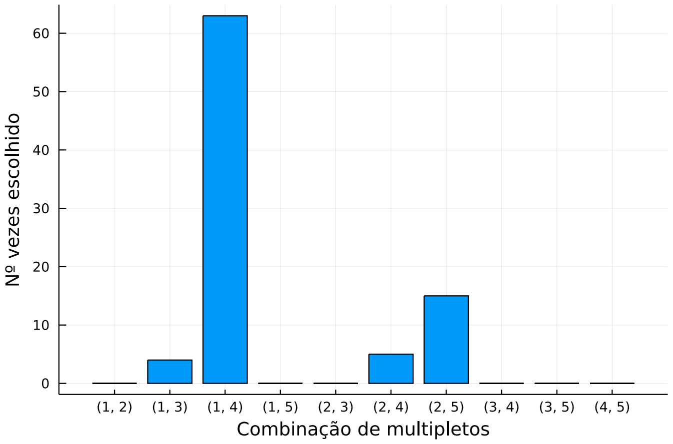

Fig. 4. Nº de espetros para o qual cada combinação de multipletos foi escolhida. Cada tuplo no eixo horizontal representa uma combinação de multipletos. Cada número do tuplo corresponde a um multipleto da tabela 1.

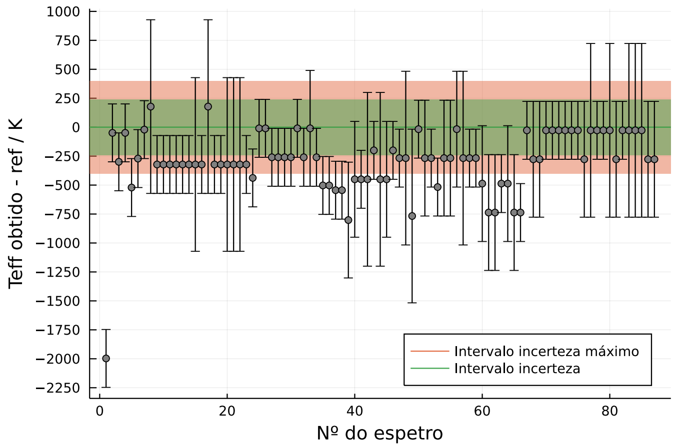

Fig. 6. Erros na temperatura efetiva obtida pelo algoritmo em relação ao valor de referência para os espetros SISMA.

peraturas efetivas de referência, verificar qual dos métodos resultava em melhores estimativas e incertezas, se seria razoável utilizar as incertezas de Texc para limitar o número de espetros da grelha a comparar, e se seria necessário selecionar uma combinação de multipletos diferente para cada espetro.

Determinou-se a temperatura de excitação para cada um dos 87 espetros SISMA, tanto com o método 1 como com o método 2, selecionando a combinação de multipletos com a qual se obtinha o menor erro em relação ao Sol. Apresentam-se os resultados no gráfico 3.

Confirmou-se que as temperaturas de excitação obtidas são estimativas suficientemente boas da temperatura efetiva, notando-se ainda que a incerteza associada a T_{exc} explica o erro entre as duas temperaturas em praticamente todos os casos, pelo que pode ser utilizada para restringir o número de espetros a comparar.

Verificou-se ainda que ambos os métodos 1 e 2 resultam em temperaturas de excitação semelhantes, no entanto o método 2 tende a resultar em incertezas inferiores. Escolheu-se utilizar apenas o método 2.

No gráfico 4, apresentam-se as combinações de multipletos escolhidas para os 87 espetros. Comparou-se os resultados utilizando a melhor combinação de multipletos e os resultados obtidos utilizando apenas a combinação (1,4). O gráfico 5 apresenta os resultados. Verifica-se que a combinação (1,4) dá resultados igualmente bons. Escolheu-se utilizar sempre esta combinação de multipletos.

Nas figuras 6, 7 e 8, apresentam-se os resultados do algoritmo aplicado aos 87 espetros SISMA na determinação dos parâmetros estelares. Nos gráficos representam-se os erros nos parâmetros obtidos em relação aos valores de referência. Não se apresenta $[\alpha/Fe]$ pois não são dados valores de referência.

Os gráficos representam ainda, em faixa verde e em faixa laranja, os intervalos de incerteza dos valores de referência da base de dados SISMA. O intervalo de incerteza depende do tipo de estrela a analisar (estrelas de temperatura superior a 6000 K têm, em média, incerteza superior em todos os parâmetros). Destes gráficos, conclui-se que a temperatura efetiva obtida está razoavelmente perto da de referência, sendo que os intervalos de incerteza associados intersetam o intervalo de incerteza dos valores de referência, no entanto, há algumas exceções. Já no caso de $\log(g)$ e de $[Fe/H]$, há uma maior quantidade de resultados cujo valor não é explicado pelas incertezas associadas. Conclui-se que o algoritmo

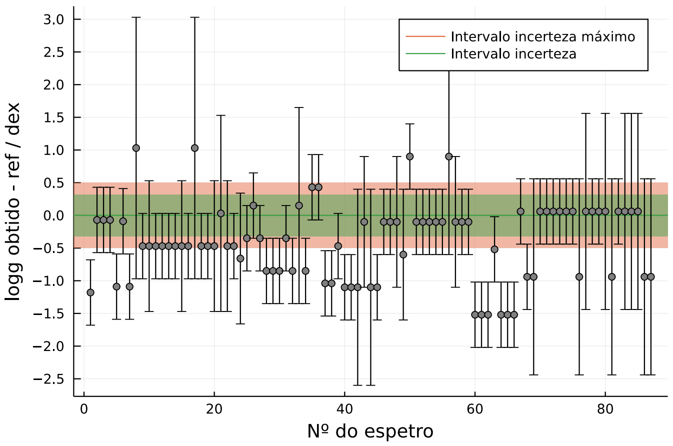

Fig. 7. Erros em $\log(g)$ obtido pelo algoritmo em relação ao valor de referência para os espetros SISMA.

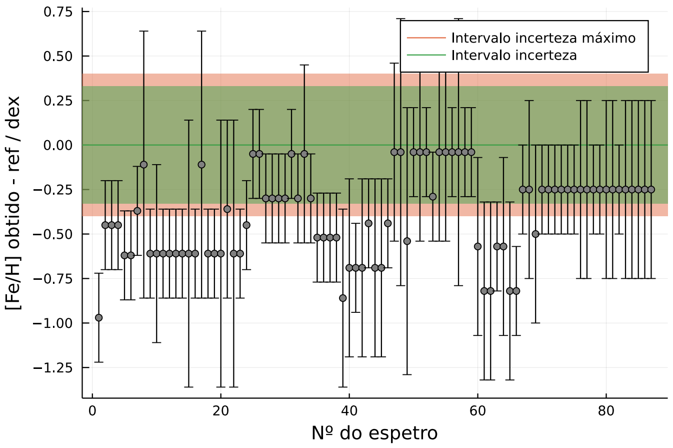

Fig. 8. Erros em $[Fe/H]$ obtido pelo algoritmo em relação ao valor de referência para os espetros SISMA.

é suficientemente bom para determinar a temperatura efetiva da estrela, mas não tão bom para determinar $\log(g)$ e $[Fe/H]$.

Existe um caso particular no qual o algoritmo determinou consistentemente valores para os parâmetros muito diferentes dos de referência (primeiro ponto na figura 6). Supõe-se que os valores de referência da base de dados SISMA estejam errados pois outros artigos (Boeche & Grebel (2016)) estão de acordo com os valores determinados aqui.

4. Análise das estrelas estrela1.fits, estrela2_vcor.fits

Utilizando os parâmetros de configuração determinados em 3, obtiveram-se os parâmetros para a estrela 1 e para a estrela 2 que se apresentam nas tabelas 2 e 3.

No caso das estrelas dadas, não foi possível utilizar a combinação de multipletos (1,4), como foi o caso para os espetros SISMA, por não haver um número suficiente de riscas bem definidas em pelo menos um dos dois multipletos.

A determinação de $vsini$ foi feita manualmente, analisando graficamente a transformada de Fourier (TF) de várias riscas de cada espetro. Cada risca analisada foi normalizada ao contínuo e este colocado em 0 antes de calcular a TF. De modo a tentar determinar os zeros, selecionaram-se apenas riscas em que era possível encontrar o nível de ruído, como na figura 9. A incerteza em $vsini$ foi tomada como o *step* entre dois pontos na TF, que depende do número de pontos que definem a risca. São sempre adicionados 1000 pontos ao contínuo da risca de modo a obter uma TF melhor definida. É tomado como 1º zero da TF o primeiro pico que chegue perto ou intersete o nível do ruído constante (que não é, de todo, um critério rigoroso). Os zeros obtidos através de várias riscas para a estrela 1 encontram-se na tabela 4. Através da equação 4, obteve-se $vsini = 2.3851 \pm 0.0099\ \mathrm{km\,s^{-1}}$ (incerteza calculada por propagação linear).

Não foi possível determinar $vsini$ para a estrela 2 (impossível determinar o nível do ruído).

De modo a sobrepôr cada um dos espetros reais aos espetros sintéticos que melhor os ajustam, foi necessário calcular os perfis instrumental e de rotação. Tomou-se para o cálculo $R = 60000$ como poder de resolução, $\epsilon = 0.6$ como constante do escurecimento do limbo. Os espetros sintéticos foram reamostrados para os comprimentos de onda do espetro real. Os espetros reais foram normalizados ao con-

Parâmetro	Valor
Combinação de multipletos	(2,4)
T_{exc} / K	6413 ± 1386
T_{eff} / K	6000 ± 250
$\log(g)$ / dex	3.5 ± 0.5
$[Fe/H]/dex$	0.0 ± 0.25
$[\alpha/Fe]$ / dex	0.0 ± 0.1

Table 2. Parâmetros obtidos para a estrela 1.

Parâmetro	Valor
Combinação de multipletos	(2,5)
T_{exc} / K	5739 ± 801
T_{eff} / K	5750 ± 1000
$\log(g)$ / dex	3.5 ± 0.5
$[Fe/H]$ / dex	0.25 ± 0.75
$[\alpha/Fe]$ / dex	0.0 ± 0.2

Table 3. Parâmetros obtidos para a estrela 2.

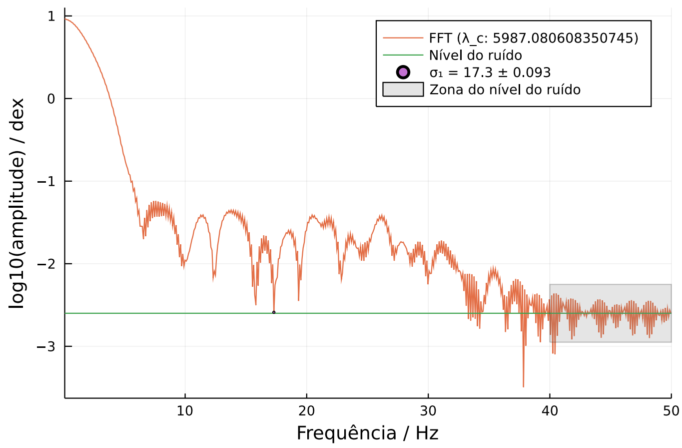

Fig. 9. Gráfico da TF (frequência $> 0\,\mathrm{Hz}$) da risca com $\lambda_c = 5987.1$.

λ_c / Å	σ_1 / Hz
5618.65	14.047 ± 0.093
6858.17	30.058 ± 0.095
6710.34	15.952 ± 0.093
5927.81	10.655 ± 0.093
5815.23	14.191 ± 0.096
5987.08	17.3 ± 0.093
6024.07	22.182 ± 0.092
6096.68	6.718 ± 0.095

Table 4. Resultados obtidos para a determinação de *vsini* para a estrela 1.

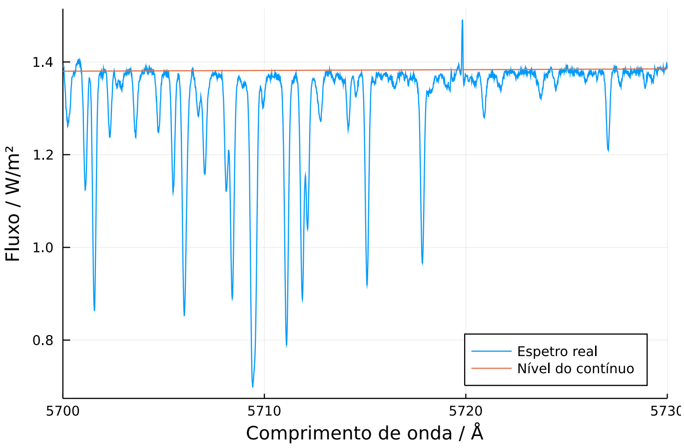

Fig. 10. Nível do contínuo determinado para a estrela 1 no intervalo a sobrepôr ao espetro sintético.

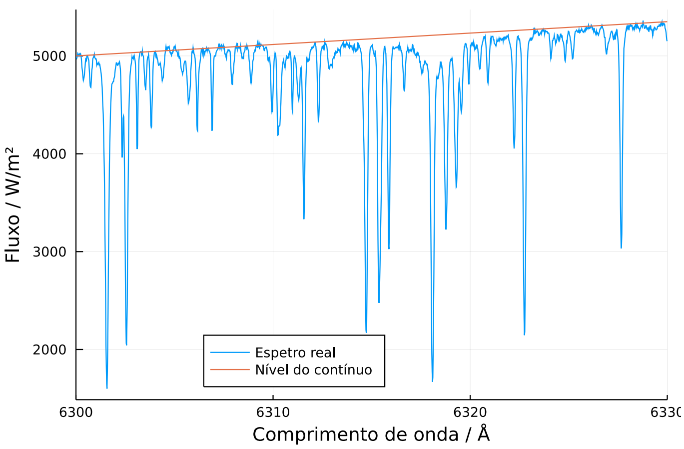

Fig. 11. Nível do contínuo determinado para a estrela 2 no intervalo a sobrepôr ao espetro sintético.

tínuo, sendo este determinado por um ajuste linear, como nas figuras 10 e 11.

Nas figuras 12 e 13, apresenta-se a sobreposição dos espetros reais de cada uma das estrelas com os espetros sintéticos que melhor as ajustam.

5. Conclusões

Conseguiu-se implementar um algoritmo para determinar T_{eff}, $\log(g)$, $[Fe/H]$, $[\alpha/Fe]$ para um espetro de uma estrela. Após configuração do algoritmo, verificou-se que os

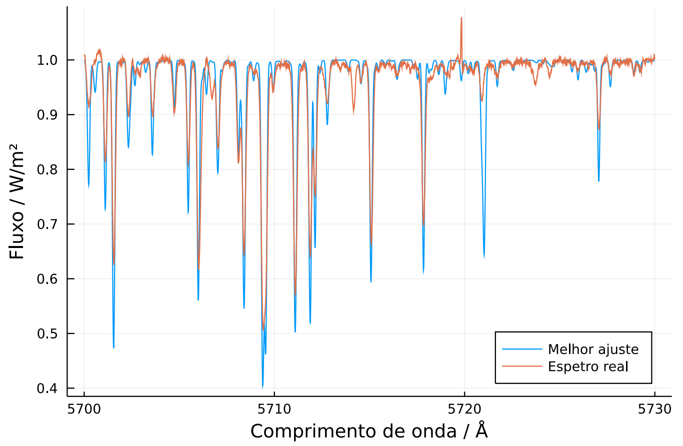

Fig. 12. Sobreposição do espetro real com o espetro sintético que melhor ajusta a estrela 1.

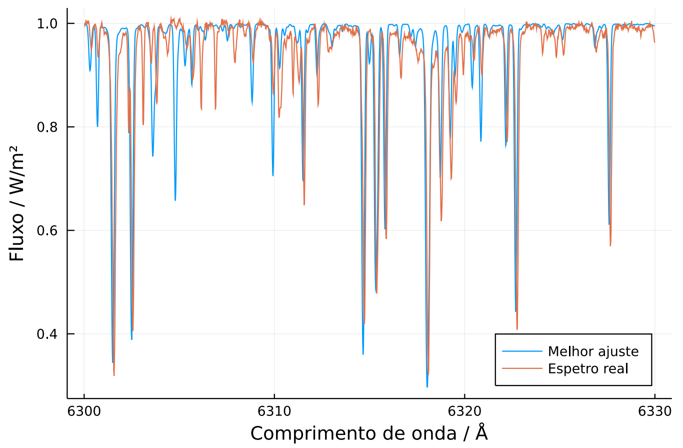

Fig. 13. Sobreposição do espetro real com o espetro sintético que melhor ajusta a estrela 2.

resultados obtidos com o algoritmo são minimamente bons, obtendo-se boa concordância da temperatura efetiva determinada com o valor de referência correspondente, mas não tão boa entre os outros parâmetros e os respetivos valores de referência. É possível que o *step* de cada parâmetro na grelha seja demasiado alto para poder ter resultados mais fiáveis, ou que o cálculo das larguras equivalentes não seja exato o suficiente, ou que se devam comparar mais riscas.

A determinação de *vsini* para ambos os espetros não foi fácil e muito menos objetiva. A determinação automática estava fora de questão pois os zeros estão perdidos no ruído das altas frequências na TF. Tentou-se determinar o nível do ruído constante para obter uma estimativa do 1º zero pelos picos que intersetassem ou chegassem perto do nível do ruído, mas é difícil dizer quão exato esse resultado é. Para a estrela 2, supõe-se que *vsini* é ainda mais baixo, pois não foi sequer possível encontrar o nível do ruído na TF de nenhuma risca.

Pela sobreposição dos espetros sintético e real de cada uma das estrelas 1 e 2, vê-se que os espetros são suficientemente parecidos, mas existem algumas riscas que não existem ou num ou noutro espetro.

References

Boeche, C. & Grebel, E. K. 2016, A&A, 587, A2
de Laverny, P., Recio-Blanco, A., Worley, C. C., & Plez, B. 2012, A&A, 544, A126
Docentes da cadeira - Slides das aulas teóricas de Astronomia Computacional. 2020
Rainer, M., Poretti, E., Mistò, A., et al. 2016, The Astronomical Journal, 152, 207
Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Zh., et al. 2013, A&A, 555, A150