

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**Determinação de Velocidades Radiais e  
Metalicidades de Estrelas em Aglomerados Abertos.**

**Marcos Antonio Fonseca Faria**

Dissertação de Mestrado, orientador Prof. Dr. Hektor Sthenos Alves  
Monteiro e coorientador Prof. Dr. Wilton da Silva Dias

UNIFEI

ITAJUBÁ – MG,

14 DE JANEIRO DE 2016

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer meu orientador Hektor Monteiro e meu coorientador Wilton Dias, pelo apoio durante todo o processo de mestrado.

Aos demais professores e colegas da UNIFEI, pelos ensinamentos e incentivo.

À secretaria de pós-graduação pelo suporte.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

À Crediana, pela ajuda nos trabalhos e por permanecer sempre ao meu lado.

# Resumo

Nas últimas décadas verificou-se um grande aumento nos estudos de aglomerados abertos na galáxia, principalmente por causa da boa determinação de uma grande variedade de parâmetros, tais como a idade, distância, avermelhamento e movimento próprio (Monteiro & Dias, 2011). Em estudos de dinâmica do disco Galáctico, como a determinação da velocidade do padrão espiral (Dias & Lépine, 2005) e a determinação do tempo de permanência das estrelas nos braços espirais, é fundamental conhecer suas órbitas obtidas a partir dos movimentos próprios e velocidades radiais e do potencial da Galáxia.

Com intuito de contribuir com o catálogo de aglomerados abertos (Dias et al., 2002) (DALM2002) elaboramos uma técnica para obtenção de velocidade radial e parâmetros físicos de estrelas (Teff, log(g) e Metalicidade) através de um ajuste de um espectro observado com um conjunto de espectros sintéticos, sem a necessidade de interação com o usuário durante os ajustes. Os dados utilizados para validação do método foram observados no OPD (Observatório do Pico dos Dias - LNA/MCTI) e as etapas para obtenção dos resultados apresentados foram descritas com detalhes desde a observação dos espectros, redução dos dados até os resultados finais.

A partir do método proposto foi possível obter resultados inéditos de 13 aglomerados abertos, sendo que para 6 deles obtivemos valores inéditos de velocidade radial e para 13 deles valores inéditos de Fe/H.

# Abstract

In the last decades we have seen a great increase in studies open clusters in the galaxy, mainly because of the good determination of a wide variety of parameters, such as age, distance, and proper motions (Monteiro & Dias, 2011).

In dynamic studies of the Galactic disk, such as determining the spiral pattern speed and determining the permanence of stars in the spiral arms (Dias & Lépine, 2005), it is essential to know their orbits obtained from the proper motions, radial velocities and the potential of the Galaxy.

Aiming to contribute with the open clusters catalog (Dias et al., 2002) (DALM2002) we developed a technique for obtaining radial velocity and physical parameters of stars (Teff,  $\log(g)$  and metallicity) through a fit of a observed spectrum with a synthetic spectrum from a grid without the need for user interaction. The method was validated through comparison to literature values. The data used for validation of the method as well as our main science data was observed in the OPD (Observatory Pico dos Dias - LNA / MCTI) using high resolution spectra obtained with a Coudé spectrograph. The steps to obtain the fit and results are described in detail. Finally using the proposed method and the observational data acquired it was possible to obtain results for 13 open clusters, in which 6 of them we obtained new values of radial velocity and 13 were new values of the metallicity Fe/H.

# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>V</b>
<b>Lista de Tabela</b>	<b>IX</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Estrutura da Galáxia . . . . .	4
1.1.1 O Meio interestelar . . . . .	4
1.1.2 Estrutura em grande escala . . . . .	5
1.1.3 Estrutura Espiral . . . . .	6
1.2 Aglomerados . . . . .	7
1.2.1 Aglomerados abertos . . . . .	7
1.3 Velocidade radial e parâmetros físicos de aglomerados abertos . . . . .	11
1.3.1 Parâmetros físicos . . . . .	11
1.3.2 Velocidade radial . . . . .	12
<b>2 Dados Observacionais</b>	<b>16</b>
2.1 Dados Observados . . . . .	16
2.2 Redução dos dados . . . . .	20
2.3 Pré Redução (Bias e Flats) . . . . .	20
2.4 Normalização e extração do espectro . . . . .	20
2.5 Calibração em comprimento de onda do espectro das lâmpadas . . . . .	22
2.6 Correção do valor de UT . . . . .	23
2.7 Calibração dos espectros em comprimento de onda . . . . .	24

2.8	Cálculo da velocidade radial utilizando a tarefa <i>fxcor</i> . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Obtenção de parâmetros Estelares a partir de Espectros Sintéticos</b>	<b>29</b>
3.1	Síntese espectral para modelos de atmosfera de CK04 . . . . .	30
3.2	Espectros sintéticos da biblioteca Coelho 2014 . . . . .	32
3.3	Obtenção da velocidade radial e parâmetros físicos . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Validação do Método</b>	<b>41</b>
4.1	Resultados com o grid Coelho 2014 . . . . .	41
4.1.1	Velocidade Radial . . . . .	41
4.1.2	Parâmetros Físicos . . . . .	45
4.2	Resultados com o grid CK04 . . . . .	48
4.2.1	Velocidade Radial . . . . .	48
4.2.2	Parâmetros Físicos . . . . .	51
4.3	Comparação dos resultados obtidos pelos espectros sintéticos CK04 e Coelho 2014 . . . . .	54
4.3.1	Velocidade Radial . . . . .	54
4.3.2	Parâmetros Físicos . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>58</b>
5.1	Resultados para os aglomerados abertos . . . . .	58
5.2	Resultados Inéditos. . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>64</b>
6.1	Perspectivas Futuras . . . . .	65
	<b>Bibliografia</b>	<b>67</b>
	<b>Anexo - Gráficos dos Espectros</b>	<b>71</b>

# Lista de Figuras

1.1	Representação da Via Láctea feita por William Herschel, baseada em dados de sua observação. . . . .	2
1.2	Desenho feito por Rosse da galáxia M51. . . . .	2
1.3	Representação da vista lateral da Via Láctea. . . . .	6
2.1	Configuração dos parâmetros da tarefa <i>ccproc</i> . . . . .	21
2.2	Gráfico de ajuste da tarefa <i>apall</i> . . . . .	22
2.3	Gráfico de ajuste da tarefa <i>identify</i> . . . . .	23
2.4	Configuração dos parâmetros da tarefa <i>refspectra</i> . . . . .	24
2.5	Espectro de uma estrela antes e depois de utilizar as tarefas <i>dispcor</i> e <i>continuum</i> . . . . .	25
2.6	Um pico típico de correlação cruzada, utilizando a tarefa <i>fxcor</i> do IRAF, donde foi possível encontrar a velocidade radial do objeto HD 89707 utilizando como estrela padrão (template) o objeto HD 103932. . . . .	28
2.7	Representação dos dados de velocidade radial encontrada com os dados presentes na literatura com suas respectivas barras de erro. . . . .	28
3.1	Representação em forma de fluxograma dos passos realizados para gerar os espectros sintéticos automaticamente. . . . .	31
3.2	Resíduo obtido para estrela HD146233. . . . .	34
3.3	Resíduo obtido para estrela HD146233. . . . .	35
3.4	Espectro sintético e espectro observado antes e depois da correção da velocidade radial HD146233. . . . .	36
3.5	Espectro sintético e espectro observado antes e depois de correção da velocidade radial HD146233. . . . .	36
3.6	Resíduo obtido para estrela HD146233. . . . .	37

3.7	Resíduo obtido para estrela HD146233. . . . .	38
3.8	Melhor espectro sintético Kurucz (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD146233. . . . .	39
3.9	Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD146233. . . . .	39
3.10	Representação em forma de fluxograma dos passos realizados para obtenção dos parâmetros físicos de uma estrela. . . . .	40
4.1	Comparação dos valores das velocidades radiais. . . . .	43
4.2	Comparação dos valores das velocidades radiais. . . . .	44
4.3	Comparação dos valores das temperaturas das estrelas. . . . .	46
4.4	Comparação dos valores de $\log(g)$ . . . . .	47
4.5	Comparação dos valores de Metalicidade. . . . .	47
4.6	Comparação dos valores das velocidades radiais. . . . .	49
4.7	Comparação dos valores das velocidades radiais. . . . .	50
4.8	Comparação dos valores das temperaturas das estrelas. . . . .	52
4.9	Comparação dos valores das temperaturas das estrelas. . . . .	52
4.10	Comparação dos valores de Metalicidade. . . . .	53
4.11	Velocidades radiais das estrelas, obtidas pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho). . . . .	54
4.12	Temperatura efetiva das estrelas, valores obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho). . . . .	55
4.13	Gravidade de superfície das estrelas, valores obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho). . . . .	56
4.14	Metalicidade das estrelas, valores obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho). . . . .	56
5.1	Velocidades radiais dos aglomerados obtidas pelo nosso método comparadas com valores presentes na literatura. . . . .	61
5.2	Metalicidade dos aglomerados obtidas pelo nosso método comparadas com valores presentes na literatura. . . . .	62
A1	Espectros da estrela CPD-614103. . . . .	72
A2	Espectros da estrela CD2313793. . . . .	73



A3	Espectros da estrela CPD-614106. . . . .	74
A4	Espectros da estrela GSC06842-01276. . . . .	75
A5	Espectros da estrela HD103932. . . . .	76
A6	Espectros da estrela HD112164. . . . .	77
A7	Espectros da estrela HD115617. . . . .	78
A8	Espectros da estrela HD117176. . . . .	79
A9	Espectros da estrela HD119288. . . . .	80
A10	Espectros da estrela HD120494. . . . .	81
A11	Espectros da estrela HD126053. . . . .	82
A12	Espectros da estrela HD136202. . . . .	83
A13	Espectros da estrela HD144585. . . . .	84
A14	Espectros da estrela HD146233. . . . .	85
A15	Espectros da estrela HD147824. . . . .	86
A16	Espectros da estrela HD161408. . . . .	87
A17	Espectros da estrela HD171391. . . . .	88
A18	Espectros da estrela HD196761. . . . .	89
A19	Espectros da estrela HD210302a. . . . .	90
A20	Espectros da estrela HD210302b. . . . .	91
A21	Espectros da estrela HD210302c. . . . .	92
A22	Espectros da estrela HD217357. . . . .	93
A23	Espectros da estrela HD222368. . . . .	94
A24	Espectros da estrela HD300814. . . . .	95
A25	Espectros da estrela HD309461a. . . . .	96
A26	Espectros da estrela HD309461b. . . . .	97
A27	Espectros da estrela HD42807. . . . .	98
A28	Espectros da estrela HD80170. . . . .	99
A29	Espectros da estrela HD84117a. . . . .	100
A30	Espectros da estrela HD84117b. . . . .	101
A31	Espectros da estrela HD87435. . . . .	102
A32	Espectros da estrela HD89707. . . . .	103
A33	Espectros da estrela HD92588. . . . .	104
A34	Espectros da estrela HD97253. . . . .	105

A35	Espectros da estrela HIP10725. . . . .	106
A36	Espectros da estrela HIP80574. . . . .	107
A37	Espectros da estrela HR1084. . . . .	108
A38	Espectros da estrela HR509. . . . .	109
A39	Espectros da estrela TYC470-696-1. . . . .	110
A40	Espectros da estrela TYC5408-2011-1. . . . .	111
A41	Espectros da estrela TYC6540-4066-1. . . . .	112
A42	Espectros da estrela TYC7380-959-1. . . . .	113
A43	Espectros da estrela TYC7674-2085-1. . . . .	114
A44	Espectros da estrela TYC7674-2589-1. . . . .	115
A45	Espectros da estrela TYC7857-119-1. . . . .	116
A46	Espectros da estrela TYC7857-895-1. . . . .	117
A47	Espectros da estrela TYC7872-2044-1. . . . .	118
A48	Espectros da estrela TYC7876-2443-1. . . . .	119
A49	Espectros da estrela TYC7876-309-1. . . . .	120
A50	Espectros da estrela TYC8333-1282-1. . . . .	121
A51	Espectros da estrela TYC8626-2133-1. . . . .	122
A52	Espectros da estrela TYC8685-69-1. . . . .	123
A53	Espectros da estrela TYC9009-1370-1. . . . .	124
A54	Espectros da estrela UCAC4-253-028553. . . . .	125

# Capítulo 1

## Introdução

As primeiras observações de galáxias ocorreram ainda na pré história (antes de 4000 a.C.). Ainda na Grécia Antiga 600 a.C. surgiram as primeiras teorias cosmológicas, o filósofo grego Demócrito de Abdera (450-370 a.C) sugeriu que a Via Láctea deveria constituir de uma infinidades de estrelas. O astrônomo árabe Alhazen (965-1037), por exemplo, tentou medir a paralaxe da Via Láctea e pelo fato de não ter conseguido medir ele propôs que a Via Láctea estava muito distante da Terra. Em 1610, com Galileu Galilei, houve a confirmação que a Via Láctea consistia de uma grande quantidade de estrelas, isso ocorreu por que Galileu utilizou pela primeira vez uma luneta para observar o céu. Anos depois, Emanuel Swedenborg (1688-1772) imaginou a Via Láctea como um em diversos outros mundos, essa hipótese não se baseava em observações mas sim em crenças e ideias da época.

Em 1755 Immanuel Kant propõe o “Universo Ilha”, nesse conceito o universo era repleto de galáxias e a Via Láctea seria apenas mais uma. Em 1785 Willian Herschel tentou determinar a forma da Via Láctea e a posição do Sol nela. Seu método era contar quantas estrelas era possível visualizar em cada direção do céu. Utilizando de um telescópio de 20 polegadas, ele propôs o seu modelo para a forma da Via láctea com o nosso sistema solar próximo ao centro (Figura 1.1). O diâmetro proposto por Herschel para a Via Láctea era de 800 pc, hoje os valores da literatura estão entre 20-30 Kpc.

Em 1794 os astrônomos podiam contar com o catálogo de Messier que possuía 110 objetos do céu profundo sendo que 40 deles eram galáxias. Outros Catálogos importantes podem ser citados como New General Catalogue (NGC) (H. Dryer 1890) possui 7840 objetos dos quais 3200 são galáxias e o Index Catalogue (IC) de 1910 que contém 5836 objetos

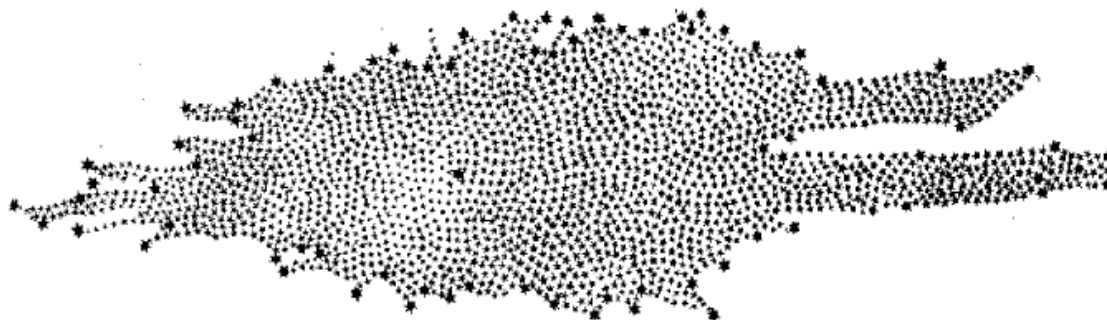


Figura 1.1: Representação da Via Láctea feita por William Herschel, baseada em dados de sua observação. Fonte: Herschel (1785).

dos quais 2400 são galáxias (Combes et al., 1999). Em 1845, William Parsons construiu um telescópio de 72 polegadas em um castelo na Irlanda, apelidado por “Leviathan of Parsonstown”. Com a ajuda do maior telescópio da época, Rosse identificou o formato espiral de algumas nebulosas. Algumas de suas observações eram descritas em desenhos, feitos por ele mesmo. Um exemplo destes desenhos está na Figura 1.2, onde podem ser vistos os braços espirais da galáxia M51. Durante cinco anos de observação, Rosse fez a descoberta de mais de 14 galáxias espirais.

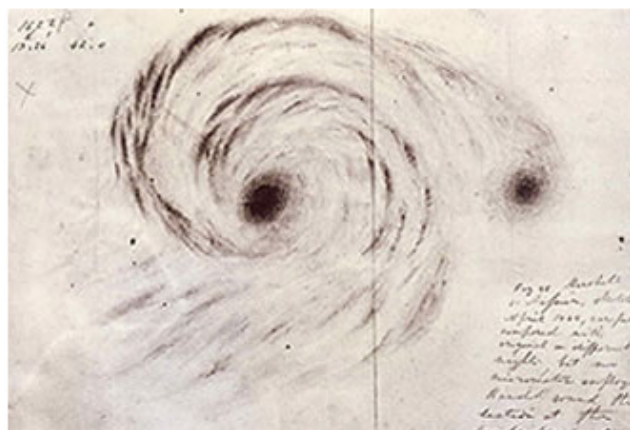


Figura 1.2: Desenho feito por Rosse da galáxia M51. Fonte : [amazing-space.stsci.edu](http://amazing-space.stsci.edu) (2014).

Embora houvesse a tentativa de perfeição nos desenhos de Rosse, ainda era uma forma mais simples de registro de imagens que carecia de precisão para trabalhos científicos. Em

meados de 1890 deu-se início a utilização de chapas fotográficas em astronomia, em particular pelo trabalho de Keeler e Curis, o que possibilitou aos astrônomos identificar uma imensa quantidade de estruturas espirais em diversas galáxias. Em 1899 é publicada a primeira fotografia de M31 feita por Isaac Roberts utilizando um telescópio de 20 polegadas.

Ainda no início do século XX existiam muitas perguntas a serem respondidas sobre estes objetos, por exemplo, não se sabia qual era a distância entre a Terra e uma galáxia. Em 1908 Henrietta Leavitt descobre uma relação entre período e luminosidade das cefeidas, observando estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães. Foi possível, com os cálculos de Leavitt, estimar a distância relativa entre duas cefeidas. No entanto ainda não se conhecia a distância absoluta entre duas cefeidas. Era necessário encontrar a distância absoluta de pelo menos uma cefeida para assim poder encontrar a distância das outras. Para isso a equipe de astrônomos que incluiu Harlow Shapley e o dinamarquês Ejnar Hertzsprung, usaram uma combinação de técnicas incluindo paralaxe estatística, para medir a distância da Terra a uma cefeida e assim poder obter a distância de qualquer cefeida.

Em meados de 1920 ocorreu uma discussão importante para astrofísica extragaláctica chamada de o Grande Debate. Os protagonistas do debate eram Harlow Shapley e Heber Curtis. Curtis era defensor da hipótese de Universos Ilhas, donde as nebulosas espirais descobertas na época eram sistemas externos a nossa galáxia e semelhantes a ela. Enquanto isso Shapley, mantinha uma hipótese que as nebulosas espirais estavam dentro da nossa galáxia. Shapley, não tinha precisão de dados para comprovar sua hipótese, sendo que em meados de 1920 eles não sabiam ao certo qual era a distância até M31, por exemplo, por não entender completamente o fenômeno de absorção interestelar devido à poeira, sendo que os erros nas medidas eram altíssimos. Então, em 1924 Edwin Hubble resolveu a questão. Usando um telescópio de 100 polegadas instalado no monte Wilson, ele determinou a distância da galáxia M31 utilizando a técnica de observação de cefeidas. Com seus cálculos ele estimou que M31 deveria estar fora de nossa galáxia acabando assim com a controvérsia.

Após o reconhecimento de que as galáxias eram de fato uma coleção de estrelas e que portanto se formavam e evoluíam, assim como suas estrelas constituintes, se consolidou a área de estudo sobre a estrutura das galáxias e em particular sobre a nossa própria Galáxia, a Via Láctea.

## 1.1 Estrutura da Galáxia

A constatação de que nossa Galáxia era como outras no universo e que estas também eram constituídas por estrelas, nuvens moleculares, gás e poeira impulsionou os estudos da estrutura da galáxia e sua evolução. Nas seções a seguir discutimos a estrutura de nossa Galáxia e as características de seus principais constituintes.

### 1.1.1 O Meio interestelar

O meio interestelar consiste em todo o tipo de material que se encontra entre as estrelas. É uma região de baixa densidade, essencialmente composta por gás, poeira e radiação, embora de forma muito rarefeita. No gás do meio interestelar tem-se principalmente hidrogênio, tanto na forma molecular quanto na forma atômica, raios cósmicos, campos de radiação, campos magnéticos, restos de supernovas e grãos de poeira. O gás interestelar constitui, aproximadamente, 10 % de toda a massa da Via Láctea (Oliveira & Saraiva, 2004). A poeira interestelar é composta basicamente por grãos de grafite, silicatos e gelo de água. A temperatura no meio interestelar é dependente da região em que se observa, podendo chegar de alguns kelvins em regiões frias e à temperaturas de milhares de Kelvins em regiões próxima de estrelas ou de outras fontes de radiação. Para maiores detalhes ver em Oliveira & Saraiva (2004).

Existem dois aspectos importantes do meio interestelar que afetam diretamente a observação de objetos tanto dentro como fora de nossa Galáxia e que estão relacionados com a distribuição de poeira e suas características que merecem destaque:

**Extinção interestelar**, consiste em um efeito da poeira no meio interestelar, onde ocorre a diminuição da intensidade de radiação emitida por objetos a grandes distâncias. Os grãos de poeira com tamanhos de  $10^{-7}m$  fazem obstrução da luz na região do visível.

**Avermelhamento Interestelar**, nesse processo a radiação interestelar é espalhada por grãos interestelares, porém no espalhamento a luz azul espalha com mais eficiência que a luz vermelha, assim ocorre um efeito aparente de avermelhamento da fonte de radiação.

A poeira é mais opaca nas regiões de ultravioleta e óptica, e é praticamente transparente nas regiões do infravermelho e regiões de rádio. Pode ocorrer forte emissão de poeira em comprimentos de onda de 50 a 100  $\mu m$  se sua temperatura atingir valores de aproximadamente 40 K.

## 1.1.2 Estrutura em grande escala

Pode-se dividir a Galáxia em três grandes partes principais: bojo, disco e halo.

### O Bojo da Via Láctea

O Bojo da nossa Galáxia consiste na parte mais interna da Galáxia. A ideia inicial que se tinha do bojo era que ele possuía um formato de uma esfera um pouco achatada, conhecido como “Esferóide”. Estudos recentes indicam que o bojo central da Via Láctea é formado por duas barras sobrepostas, formando bojo na forma de “X” (Saito et al., 2011).

Nuvens moleculares que estão no bojo são atraídas para uma posição central da nossa Galáxia, o que resulta num disco de acreção. No centro da nossa Galáxia possui um buraco negro denominado Sagittarius A. Localizado cerca de 7,97 kpc de distância na direção da constelação de Sagitário. A sua massa é de pelo menos 4.000.000 de vezes a do sol (NASA, 2014).

### O Disco da Via Láctea

O disco da Via Láctea possui um “diâmetro” da ordem de 24 kpc e espessura da ordem de 0,4 kpc (Lépine, 2008). Nosso sistema solar está localizado dentro do disco, de acordo com Nishiyama et al. (2006) nosso sistema solar situa a uma distância de  $R_o = 7,52 \pm 0,10$  kpc do centro da Via Láctea. O disco Galáctico é constituído de estrelas jovens e ricas em metais (estrelas de população I), nuvens interestelares de gás e poeira. A densidade de estrela é maior em uma região mais fina do disco, e em uma região mais espessa do disco a densidade diminui na forma exponencial como pode ser visto em Benjamin et al. (2005). O disco da Via Láctea possui também uma estrutura na forma espiral onde a densidade de estrelas é maior que nas outras regiões do disco. Será dado maiores detalhes sobre esse assunto na próxima seção.

### O Halo da Via Láctea

O Halo da nossa Galáxia consta na região externa ao disco galáctico. Possui uma estrutura aproximadamente esférica e uma baixa densidade de gás e poeira. Essa região não possui formação estelar, mas existem aglomerados globulares identificados. Estima-se que exista cerca de 500 aglomerados globulares no halo que possuem estrelas velhas (população II) com baixa metalicidade. Observações de aglomerados indicam que o halo está centrado no núcleo da Galáxia e se estende por no mínimo 100 kpc, além dos limites do disco galáctico (Oliveira & Saraiva, 2004). Na Figura 1.3 temos uma representação das três divisões da nossa Galáxia.

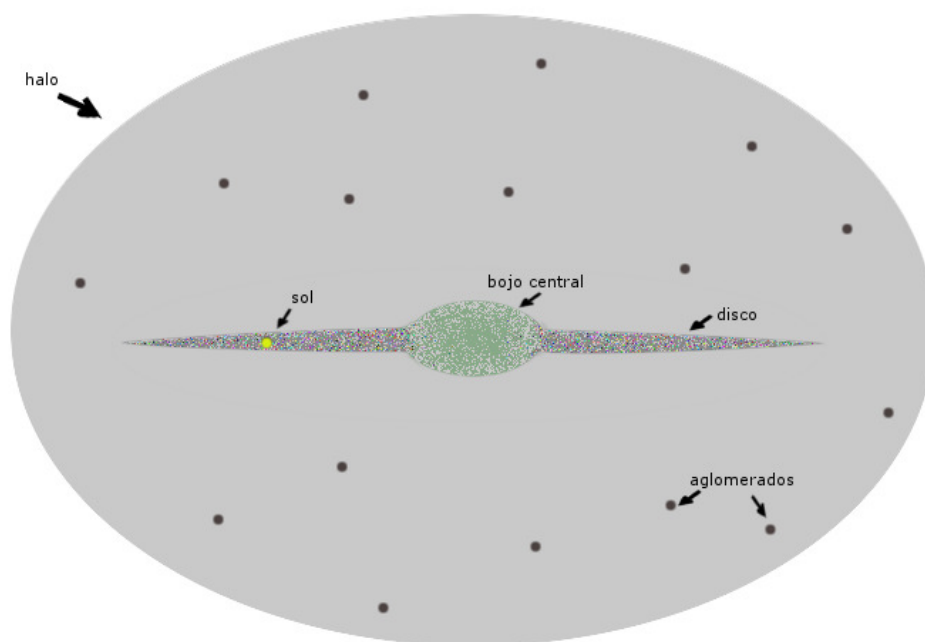


Figura 1.3: Representação da vista lateral da Via Láctea.

### 1.1.3 Estrutura Espiral

A formação espiral do disco galáctico é caracterizada por uma região de maior densidade visual de matéria no disco galáctico. Basicamente é composta de nuvens moleculares, estrelas das classes O e B, objetos pré-estelares e aglomerados jovens recém formados. Recentes estudos como de Urquhart et al. (2013) revelam que a nossa Galáxia possui quatro braços espirais. Existe uma dificuldade para a explicação do surgimento dos braços espirais. Uma teoria aceitável é dada pelo astrônomo sueco Bertil Lindblad e aperfeiçoada pelo matemático C. C. Lin, onde os braços espirais são “cristas” de uma onda de densidade. Cada período dessa onda é da ordem de dezenas de milhões de anos, o que coincide com o tempo de vida de estrelas tipo O e B encontrada nos braços espirais (Wuensche, 2003).

A teoria de ondas de densidade (Lin & Shu, 1964) diz que os braços espirais são resultados de um “congestionamento” de órbitas do objetos da Galáxia, onde ocorre regiões do disco galáctico em que a densidade de estrelas aumenta. Nessa lei os objetos foram considerados de forma estatística onde eles entram e saem dos braços espirais com passar dos anos.

Sabemos que o movimento de rotação dos objetos da Via Láctea seguem uma rotação diferencial (Oliveira & Saraiva, 2004), onde objetos mais próximos do centro da Galáxia possuem velocidade angular maior que objetos mais distantes do centro. A velocidade de



rotação dos braços espirais é diferente da velocidade de rotação do disco galáctico, porém existe uma região do plano galáctico em que a velocidade dos braços espirais é a mesma que a velocidade de rotação do disco, o raio dessa região é chamado de *raio de corrotação*. Valores de *raio de corrotação* obtidos por Dias & Lépine (2005) indicam que nosso sistema solar se encontra bem próximo dessa região, obtendo uma relação entre raio de corrotação por distância do sol ao centro galáctico ( $R_c/R_0$ ) com valores no intervalo de 1,05 e 1,08. No mesmo trabalho eles obtiveram um valor de rotação padrão espiral de  $25\text{km/s/kpc}$  utilizando aglomerado abertos do catálogo Dias et al. (2002).

Uma das principais ferramentas de estudo da estrutura da Galáxia e suas características, em especial dos braços espirais onde boa parte da formação estelar acontece, são os aglomerados estelares. Como estes objetos em princípio se formam de uma mesma nuvem de gás, aproximadamente ao mesmo tempo e com a mesma composição química, podemos usá-los como traçadores dos braços espirais e de suas características tanto químicas quanto dinâmicas.

## 1.2 Aglomerados

Consideramos um aglomerado um grupo de estrelas formado de uma mesma nuvem molecular, ao mesmo momento e com mesma composição química, estando essas estrelas gravitacionalmente ligadas. Os aglomerados abertos são encontrados em todo disco galáctico, composto basicamente de estrelas jovens e que possuem pouca influência gravitacional. O estudo aglomerados abertos, é muito importante para estudo da formação estelar e evolução da galáxia.

### 1.2.1 Aglomerados abertos

Aglomerados Abertos são de interesse especial, pois sua investigação pode levar a um conhecimento mais profundo da cinemática e formação de estrelas na Galáxia, bem como contribuir para a compreensão da estrutura galáctica (Dias et al., 2000). Aglomerados abertos consistem em um grupo de estrelas geradas de uma mesma nuvem molecular e as estrelas estão mais fracamente unidas pelo efeito gravitacional e número de estrelas em geral é relativamente pequeno variando de algumas dezenas até vários milhares. Uma das vantagens de estudar aglomerados abertos é que, como mencionado anteriormente, as es-

treelas que o constituem se originarem de uma mesma nuvem molecular, onde praticamente todas as estrelas possuem mesma idade e composição química.

### **Formação**

Os Aglomerados abertos são formados em grandes nuvens de gás e poeira contendo milhares ou milhões de massas solares. O material contido na nuvem começa a se contrair devido ao efeito de sua própria gravidade, as estrelas formadas permanecem próximas devido a efeito gravitacional dando origem a grupos ou aglomerados de estrelas. As estrelas formadas possuem o mesmo material da nuvem que as gerou sendo assim praticamente idênticas em composição química. Além disso, em um mesmo aglomerado as estrelas são geradas em uma mesma época, sendo assim semelhantes em idade. Isso nos permite determinar os números relativos de estrelas de cada tipo que normalmente se formam (Schneider & Arny, 2009).

Em nossa Galáxia estima-se que a taxa de formação de aglomerados aberto é de um a cada alguns milhões de anos. Utilizando aglomerados a uma distância de até 1 kpc do sol, foi obtido uma taxa de formação de aglomerados de  $0,45 \text{ kpc}^{-2} \text{ Myr}^{-1}$  (Battinelli and Capuzzo-Dolcetta , 1991).

Em Nilakshi et al. (2002) foram estudados 38 aglomerados abertos, dos quais foram obtidos resultados importantes quanto a morfologia desses objetos, dentre os principais resultados do trabalho podemos destacar:

- Todos os aglomerados, incluindo os muito jovens possuem uma região coronal.
- Em média, o tamanho da região coronal é cerca de cinco vezes o raio do núcleo.
- Ao contrario das regiões coronais, a estrutura dos núcleos não varia significativamente de um aglomerado para outro.
- Os raios médios dos núcleos dos aglomerados são  $1,3 \pm 0,67$  e  $7,0 \pm 2,4 \text{ pc}$ .

### **Classificação**

No livro *Star Clusters* de Harlow Shapley, o autor propõe uma classificação em duas dimensões, sendo a primeira dimensão relacionada com o número e concentração aparente das estrelas e a segunda dimensão dependendo da classe espectral. Essa classificação é realizada de forma que cada tipo de aglomerado recebe uma letra de “a” até “g”. Segue abaixo um pequeno resumo da classificação. Fonte Shapley (1930):

**a, Irregularidades de campo:** Existem uma grande variação na distribuição estelar, com estrelas distribuídas irregularmente por todo aglomerado.

- b, Associações estelares:** Estrelas peculiares com velocidades altas e paralelas.
- c, Aglomerados irregulares e levemente ligados:** Como o nome já diz, consistem em aglomerados muito pouco ligados gravitacionalmente e com estrutura irregular.
- d, Aglomerados levemente ligados.**
- e, Aglomerados ricos e concentração intermediária.**
- f, Aglomerados com alta concentração de estrelas.**
- g, Aglomerados ricos e alta concentração.**

Um outro sistema de classificação de aglomerados foi feito por Trumpler (1930) onde o aglomerado poderia receber 3 diferentes caracteres referentes a concentração de estrelas (numeração romana de ‘I’, ‘II’, ‘III’ e ‘IV’), luminosidade (‘1’, ‘2’ e ‘3’) e quantidade de estrelas (‘p’, ‘m’ ou ‘r’).

Especificando melhor a classificação temos:

**Grau de concentração.**

- I.** Aglomerado com forte concentração central.
- II.** Aglomerado com pouca concentração central.
- III.** Aglomerado com nenhuma concentração perceptível.
- IV.** Aglomerado não muito bem separado do campo de estrelas circundante.

**Faixa de brilho.**

- 1.** A maior parte das estrelas do aglomerado possuem praticamente o mesmo brilho aparente.
- 2.** O Aglomerado possui uma faixa moderada de brilho.
- 3.** Aglomerado é composto por estrelas brilhantes e fracas.

**Número de estrelas no aglomerado**

- p.** Pobre, possui menos de 50 estrelas.
- m.** Médio, possui entre 50 e 100 estrelas.
- r.** Ricos, possui mais de 100 estrelas.

**Distribuição na Galáxia**

Em Galáxias espirais os aglomerados abertos são encontrados no plano da Galáxia, mais especificamente nas regiões dos braços onde existe uma maior densidade de gás. Na nossa Galáxia os aglomerados mais antigos são encontrados a maiores distâncias do centro e os mais jovens mais próximos do centro ( Bergh & McClure, 1980), essa distribuição ocorre devido as forças de maré que são maiores nessas regiões. Em Galáxias irregulares,

os aglomerados abertos se distribuem por qualquer região, seguindo a hipótese de que quanto maior a densidade de gás de uma região maior será a quantidade de aglomerados formados.

### **Composição Estelar**

Em geral, os membros dos aglomerados abertos são identificados a partir de cinemática, ou seja, de um movimento comum (movimento principal) e fotometria seguindo o diagrama de cores e magnitudes (Conrad et al., 2014).

A luz emitida pelos aglomerados abertos é dominada pelas estrelas jovens e azuis com o tempo, as estrelas formadas se afastam do aglomerado e dispersam pelo meio interestelar antes mesmo de cessarem a queima de hidrogênio. Essas estrelas vivem muito pouco, cerca de dezenas de milhões de anos. Assim, a grande maioria das estrelas que compõem os aglomerados abertos são estrelas jovens e ricas em metais (estrelas de População I). As informações de abundância química dos aglomerados são em geral obtidas através de espectroscopia.

### **Evolução**

Aglomerados abertos são de extrema importância para o estudo de evolução estelar, sendo que as estrelas contidas nele possuem aproximadamente a mesma idade, e são semelhantes em composição química. Ao estudarmos o diagrama HR para estrelas de um mesmo aglomerado aberto, é verificado que a maioria das estrelas se encontram na sequência principal.

Existem algumas estrelas mais massivas que desviam da sequência principal e evoluem para uma gigante vermelha. Essas estrelas são muito importantes sendo que quanto mais velho é o aglomerado maior será o número de estrelas gigantes e supergigantes vermelhas e menos luminoso será o segmento superior da sequência principal. Como todas as estrelas nasceram numa mesma época, de uma mesma nuvem e estão aproximadamente a uma mesma distância, podemos dizer que o único fator que diferencia estrelas de um mesmo aglomerado é sua massa e estágio evolutivo que se traduz no brilho aparente observado. Por conta desse aspecto o diagrama HR em aglomerados abertos se tornou uma ferramenta fundamental para o estudo de evolução estelar, permitindo a determinação de parâmetros fundamentais como distância, idade, avermelhamento e metalicidade. Esses parâmetros são usados no estudo da estrutura, dinâmica dos braços espirais, idade de populações estelares entre outras características de nossa Galáxia

## 1.3 Velocidade radial e parâmetros físicos de aglomerados abertos

Parâmetros importantes para o estudo evolutivo e dinâmico de aglomerados, como velocidades radiais, metalicidades, entre outros, são muitas vezes obtidos através de espectroscopia de estrelas membros individuais. Nas próximas seções são descritos em mais detalhes os procedimentos usuais de obtenção destes parâmetros em estrelas.

### 1.3.1 Parâmetros físicos

Quando estamos trabalhando com os parâmetros físicos de uma estrela estamos na verdade obtendo os parâmetros da atmosfera dessa estrela. Os principais parâmetros estudados são  $T_{\text{eff}}$  (Temperatura efetiva da superfície da estrela) e  $\log(g)$  (gravidade de superfície) sendo estes parâmetros astrofísicos fundamentais para qualquer análise de abundância química de estrelas para determinação de sua metalicidade (relação entre metais da superfície com a quantidade de Hidrogênio).

**Teff e  $\log(g)$ :** Esses parâmetros atmosféricos estão diretamente relacionados com as propriedades físicas da estrela como massa, raio e luminosidade. Os modelos atmosféricos existentes na literatura são gerados a partir de modelos analíticos que relacionam as propriedades físicas (massa, raio e luminosidade) com a distribuição de fluxo observado na estrela e seus perfis de linhas espectrais. Em Smalley (2005) são apresentadas algumas técnicas e equações presentes na literatura para se obter  $T_{\text{eff}}$  e  $\log(g)$ .

**Metalicidade:** A metalicidade é um parâmetro de uma estrela que nos diz qual a proporção de elementos químicos existem na superfície dessa estrela quando comparados com a quantidade de Hidrogênio presente. O termo ‘metal’ é utilizado para descrever todos os elementos existentes no universo diferentes de Hidrogênio e Hélio, por exemplo, Carbono, Ferro, Nitrogênio. A metalicidade é importante para estudo de composição e idade de populações de estrelas e sua evolução em nossa Galáxia.

A metalicidade pode ser expressa como a razão da abundância de Ferro na estrela com a abundância de ferro no sol (ver Equação 1.1). Usualmente são utilizadas as linhas de ferro por serem mais fáceis de serem observadas nos espectros.

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{estrela}} - \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{Sol}} \quad (1.1)$$

Na Equação 1.1,  $N_{\text{Fe}}$  e  $N_{\text{H}}$  são a quantidade de átomos de ferro e de hidrogênio por unidade de volume.

### 1.3.2 Velocidade radial

A velocidade radial de uma estrela é dada pela velocidade de afastamento ou aproximação dessa estrela na linha visada (ou seja, linha entre o observador e o objeto). A velocidade radial de estrelas possui diversas aplicações na astronomia, por exemplo a velocidade radial em conjunto com movimento próprio de estrelas pode ser utilizada para identificação de estrelas membros de aglomerados por apresentarem um movimento comum (Dias 2002). Outras aplicações da velocidade radial está em técnicas para buscas de exoplanetas, estudo do comportamento cinemático da nossa Galáxia até obtenção de dados para comprovar a expansão do Universo.

Existem diversas técnicas para obtenção de velocidade radial, dentre elas podemos destacar os métodos de velocidade radial espectrométrica e velocidade radial astrométrica.

**Velocidade radial astrométrica:** Trata-se da obtenção da velocidade radial através da posição e movimento aparente das estrelas, por exemplo pela mudança no valor do paralaxe, pelo movimento próprio e pelo movimento angular de um grupo de estrelas. Maiores detalhes sobre a técnica de obtenção da velocidade radial astrométrica pode ser visto em Dravins et al. (1999b). Uma comparação entre as principais diferenças entre a velocidade radial astrométrica e a velocidade radial espectroscópica pode ser visto em Dravins et al. (1999a)

A obtenção da velocidade radial por esses métodos não necessitam da informação espectral das estrelas, porém precisam de um conjunto maior de outras informações como dados de movimentos próprios de um conjunto de estrelas que estejam no mesmo grupo.

**Velocidade radial espectroscópica:** Trata-se da obtenção da velocidade radial de estrelas através do estudo dos espectros utilizando medidas do efeito doppler observado.

Em 1842, Christian Doppler (1803-1853) obteve uma equação matemática que relaciona a velocidade de deslocamento de um corpo, em relação a um referencial, com a variação (deslocamento) das linhas do espectro desse corpo em relação à essas linha no referencial que o observa (no laboratório). A relação matemática encontrada vem dada pela Equação 1.2, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em que se esta estudando,  $\Delta\lambda$  é a variação em comprimento de onda de uma linha do espectro eletromagnético enviada

pela fonte (em movimento), em relação a um observador, e a mesma linha vista em laboratório. Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  a velocidade da fonte de luz relativa a um observador no laboratório.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \quad (1.2)$$

Para casos onde as velocidades são muito menores que a velocidade da luz, podemos aproximar a Equação 1.2 para Equação 1.3.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (1.3)$$

Trabalhos com velocidade radial determinada pela técnica espectroscópica têm sido utilizada desde o final do século XIX. Movimentos radiais de estrelas tem sido estudados por espectroscopia desde os anos de 1868 (Hearnshaw, 2004). Em 1986, William Huggins deduziu a velocidade radial de Sírius observando uma pequena diferença no comprimento de onda da linha  $H\beta$  (Oliveira & Saraiva, 2004).

Tradicionalmente o que se faz para obtenção da velocidade radial por espectroscopia é estudar as linhas de absorção da atmosfera de uma estrela com o mesmo valor em posição dessas linhas visto em laboratório. Com o valor de deslocamento entre essas linhas se obtém a velocidade radial segundo a equação 1.3. Pelo fato de existirem várias linhas de espectros a serem analisadas, é comum trabalharem com a técnica de correlação cruzada com espectros padrão para se obter o melhor valor de velocidade radial. O valor de velocidade pode depender do conjunto de linhas pré selecionadas e características do espectro obtido. A técnica é descrita em detalhes por Tonry & Davis (1979).

Existem dois grandes projetos que visam obter a velocidade radial de estrelas para estudarem a estrutura da Galáxia em detalhes: CORAVEL e RAVE:

**CORAVEL (CORrelarion - RAdial - VELOCities):** Consiste em um espectrofômetro para determinação da velocidade radial por Correlação Cruzada entre o espectro observado da estrela e um espectro sintetizado. Além dos valores de velocidade radial é possível obter a metalicidade das estrelas também por correlação cruzada. Esse trabalho é bem descrito em Baranne et al. (1979)

**RAVE (RAdial Velocity Experiment):** Consiste em um espectrógrafo de média resolução. Assim como o CORAVEL, ele possui um “pipe-line” definido para obter os

valores de velocidade radial por correlação cruzada entre o espectro observado e um conjunto de espectros sintéticos da biblioteca teórica Zwitter et al. (2004) utilizando cerca de 62659 espectros sintéticos gerados. Trabalha com dados de uma região pequena, onde está localizado o Triplete de Cálcio (8410 a 8795 Å). Esse projeto obtém os valores de velocidade radial e parâmetros físicos das estrelas comparando os espectros sintéticos com os espectros observados em 4 etapas principais:

- 1° obtém a velocidade radial comparando a estrela observada com 40 espectros sintéticos por correlação cruzada.
- 2° encontra o melhor espectro sintético comparando ao espectro observado.
- 3° recalcula o valor da velocidade radial com novo melhor espectro.
- 4° procura novamente qual melhor espectro sintético para obtenção dos parâmetros físicos. Maiores detalhes sobre a técnica são descritos em Steinmetz et al. (2006).

Existem outras técnicas para se obter a velocidade radial de estrelas, como por exemplo comparando dados obtidos de espectros de uma estrela com dados de espectros de estrelas padrões. Nessa técnica é normalmente utilizada a tarefa FXCOR do IRAF para fazer uma correlação cruzada de Fourier entre as estrelas observadas e algumas estrelas padrões observadas na mesma noite. Esse tipo de trabalho é amplamente utilizado pela comunidade científica como por exemplo em Friel & Janes (1993) onde foi possível obter as velocidades radiais de 24 aglomerados abertos utilizando a comparação pela tarefa FXCOR de 155 estrelas.

A partir das técnicas de obtenção das velocidades radiais e de parâmetros físicos de estrelas, podemos determinar parâmetros importantes dos aglomerados abertos, como mencionado anteriormente. No caso específico da velocidade radial, é necessário que se selecione com cuidado as estrelas que são de fato membros do aglomerado sendo estudadas para posteriormente se obter uma velocidade radial global do objeto. Em geral as estrelas são selecionadas como membros de aglomerados abertos a partir dos seus movimentos próprios e/ou fotometria. O movimento próprio é encontrado pelo movimento aparente das estrelas a partir de suas posições em diversas datas de observação. Por fotometria é obtida estrelas membros de aglomerados através de ajustes de isócronas no diagrama cor magnitude. Trabalhos recentes como Conrad et al. (2014) utilizando o programa RAVE obtiveram valores de velocidade Radial de 110 aglomerados abertos (sendo 37 destes inéditos) e valores de metalicidade para 81 aglomerados abertos (sendo 69 inéditos). Re-



sultados como esses são de grande importância para investigações sistemáticas de sistemas de estrelas e da Via Láctea. Principalmente para obtenção de resultados mais detalhados sobre nossa Galáxia, sobre sua estrutura, dinâmica, formação, evolução e localização dos braços espirais.

No presente trabalho apresentamos o estudo de velocidades radiais de aglomerados abertos contribuindo para o aumento de objetos com dados determinados de maneira robusta no catálogo (Dias et al., 2002) (DALM2002). Para tanto, foram obtidos dados espectroscópicos de alta resolução no observatório do Pico dos Dias para diversos objetos. Os dados foram reduzidos e analisados por um algoritmo desenvolvido para a obtenção das velocidades radiais e parâmetros físicos das estrelas baseado no ajuste de espectros sintéticos aos observados. A técnica nos permitiu obter a velocidade radial, Temperatura efetiva,  $\log(g)$  e Metalicidade das estrelas estudadas de maneira autoconsistente ajustando todo o espectro e não somente algumas regiões específicas.

A descrição das observações e sua redução, do desenvolvimento do algoritmo e sua validação com dados da literatura, assim como os novos resultados obtidos para aglomerados abertos são detalhados nas seções seguintes.

# Capítulo 2

## Dados Observacionais

Assim como utilizado usualmente, as reduções dos dados, obtidos em uma jornada de observação, são realizadas pelo programa IRAF. Nesse capítulo será feita uma descrição dos passos necessários para a redução e análise dos dados feitos no IRAF. O exemplo de redução descrito abaixo foi realizado para dados do Telescópio Perkin-Elmer que possui 1,6 metros de diâmetro situado no OPD. Foi utilizado também uma rede de difração de 600 l/mm, um espectrógrafo do tipo coudé. Os dados analisados nesse trabalho são das campanhas de observação de 2001, 2003, 2007, 2008 e 2014 observados pelo nosso grupo de pesquisa. Os resultados de velocidade radial serão apresentados na seção 2.8.

### 2.1 Dados Observados

Os dados observados nas campanhas de observação dos anos de 2001 a 2008, foram obtidos pelo pesquisador Wilton Dias e as observações do ano de 2014 foram realizadas pelo autor. Para todos os dados foi utilizado o Telescópio Perkin-Elmer juntamente com espectrógrafo Coudé. Esse espectrógrafo possui uma resolução de 17000. Os espectros estavam centrado em 4000 Å e 6000 Å e uma cobertura espectral de cerca de 1000 Å. Os dados se mantiveram com valores de sinal ruído entre um fator de 10 a 100. Os dados obtidos são mostrados nas tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 para as estrelas observadas dos anos de 2003 a 2014. Para todas as tabelas a seguir existem quatro colunas sendo elas compostas respectivamente com os dados: data de observação de cada objeto, nome do objeto observado, lambda central do espectro do objeto e o tempo de exposição de uma imagem de espectro. Algumas das observações foram combinados dois ou mais espectros, podendo ser de 2 até 4 espectros. A

Data de Observação	Nome do Objeto	$\lambda_c$ (Å)	Temp. Exposição(s)
27/03/2003	HD136202	4104	1x1200,0
27/03/2003	HD37160	4104	1x120,0
27/03/2003	HD42397	4104	1x900,0
27/03/2003	HD50778	4104	1x900,0
27/03/2003	HD83516	4104	1x1200,0
28/03/2003	HIP60814	4104	1x1800,0
28/03/2003	HD107328	4104	1x60,0
28/03/2003	HD50778	4104	1x180,0
28/03/2003	HD83516	4104	1x1200,0
28/03/2003	HD89449	4104	1x120,0
28/03/2003	HD92588	4104	1x900,0
28/03/2003	HD108903	4104	1x1800,0
14/03/2014	HD108903	4466	3x150,0
14/03/2014	HD136202	4466	3x460,0
14/03/2014	HD146051	4466	4x165,0
14/03/2014	HD154417	4466	2x600,0
16/03/2014	HD103932	4466	3x1800,0
16/03/2014	HD117176	4466	2x1800,0
16/03/2014	HD119288	4466	2x1800,0
16/03/2014	HD146051	4466	3x600,0
16/03/2014	HD154417	4466	3x600,0

Tabela 2.1: Informações das estrelas observadas em 2003 e 2014 para lambdas centrados próximo de 4000 Å.

maior parte dos espectros apresentados nesse trabalho possuem uma combinação de dois ou três espectros observados, o tempo de exposição presente nas tabelas são referentes ao tempo médio de exposição da combinação desses espectros observados.

Data	Nome do Objeto	$\lambda_c$ (Å)	Temp. Exposição(s)
23/04/2008	HD115617	6064	3x60,0
23/04/2008	HD136202	6064	2x120,0
23/04/2008	HD80170	6064	2x120,0
23/04/2008	TYC8626-2133-1	6064	2x900,0
23/04/2008	CPD-614103	6064	2x900,0
23/04/2008	CPD-614106	6064	2x900,0
23/04/2008	HD84117	6064	2x60,0
23/04/2008	HIP80574	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC470-696-1	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC7857-119-1	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC9009-1370-1	6064	2x900,0
23/04/2008	HD309461	6064	2x900,0
23/04/2008	HD120494	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC7857-895-1	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC7674-2589-1	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC7674-2085-1	6064	2x900,0
23/04/2008	TYC7380-959-1	6064	2x900,0
24/04/2008	HD112164	6064	3x160,0
24/04/2008	HD126053	6064	2x600,0
24/04/2008	HD171391	6064	3x180,0
24/04/2008	HD92588	6064	2x120,0
24/04/2008	TYC7876-309-1	6064	2x900,0
24/04/2008	HD97253	6064	2x900,0
24/04/2008	HD87435	6064	2x900,0
24/04/2008	TYC8685-69-1	6064	2x900,0
24/04/2008	TYC8333-1282-1	6064	2x900,0
24/04/2008	TYC7876-2443-1	6064	4x900,0
24/04/2008	TYC7872-2044-1	6064	2x900,0
24/04/2008	TYC6540-4066-1	6064	2x900,0
24/04/2008	TYC5408-2011-1	6064	2x900,0
24/04/2008	HD309461	6064	2x900,0
24/04/2008	HD300814	6064	2x900,0
24/04/2008	HD147824	6064	2x900,0

Tabela 2.2: Informações das estrelas observadas em 2008 para lambdas centrados próximo de 6000 Å.

<b>Data</b>	<b>Nome do Objeto</b>	$\lambda_c$ (Å)	<b>Temp. Exposição(s)</b>
08/08/2014	HD144585	6021	3x600,0
08/08/2014	HD146233	6021	3x600,0
08/08/2014	HD161408	6021	3x1800,0
08/08/2014	GSC06842-01276	6021	1x1800,0
08/08/2014	HD210302	6021	3x400,0
08/08/2014	HD217357	6021	2x1800,0
10/08/2014	HD196761	6024	4x600,0
10/08/2014	HD210302	6024	2x600,0
10/08/2014	CD2313793	6024	1x2400,0
10/08/2014	HIP10725	6024	2x2100,0
10/08/2014	HD222368	6024	3x60,0
10/08/2014	HD210302	6024	3x600,0
10/08/2014	HR509	6024	2x50,0
10/08/2014	HR1084	6024	3x50,0
15/03/2014	HD42807	5961	3x500,0
15/03/2014	UCAC4-253-028553	5961	1x1800,0
15/03/2014	HD84117	5961	3x600,0
15/03/2014	HD89707	5961	3x1800,0
15/03/2014	HD103932	5961	3x1800,0
15/03/2014	HD117176	5961	3x600,0
15/03/2014	HD119288	5961	3x1200,0

Tabela 2.3: Informações das estrelas observadas em 2014 para lambdas centrados próximo de 6000 Å.

## 2.2 Redução dos dados

Os dados brutos obtidos no Telescópio Perkin-Elmer possuem bias, flats, espectros das estrelas e lâmpadas. Todas as noites de observação foram feitos espectros de estrelas padrões, as quais foram utilizadas para cálculo de velocidade radial e metalicidade das demais estrelas da noite. Para análise desses dados foi seguido um conjunto de tarefas que serão descritas a baixo.

## 2.3 Pré Redução (Bias e Flats)

Ao inicializar o IRAF é necessário especificar qual instrumento foi utilizado na observação dos dados, para isso utiliza-se a tarefa *setinstrument*. Em seguida é necessário combinar os bias utilizando a tarefa *zerocombine*. A tarefa *ccdproc* é utilizada para retirar bias e trim (corte das regiões desnecessárias). A tarefa *flatcombine* é utilizada para combinar os flats da noite observada. Essa tarefa utiliza-se das configurações da tarefa *ccdproc*. Para eliminar os bias e fazer os cortes nas imagens das estrelas e das lâmpadas aplicou-se a tarefa *ccdproc*. Na Figura 2.1 é mostrada a configuração da tarefa *ccdproc* para ser utilizada pela tarefa *flatcombine* ao mesmo tempo que será aplicada as imagens das lâmpadas e das estrelas para eliminar os bias e fazer o corte necessário.

## 2.4 Normalização e extração do espectro

Após combinar todos os flats é necessário normalizar o flat resultante da combinação. Essa normalização é realizada com a tarefa *response*. Em seguida o flat normalizado deve ser aplicado nas imagens das estrelas e lâmpadas. Para isso é utilizado novamente a tarefa *ccdproc* onde os parâmetros *trim* e *zerocor* devem receber *no* e o parâmetro *flatcor* deve receber *yes*. A próxima etapa consiste em extrair o espectro das estrelas utilizando a tarefa *apall*. Antes do início da extração do espectro é necessário verificar se a orientação do espectro se encontra ao longo da linha ou ao longo da coluna nos dados e configurar a ferramenta *dispaxi* situada dentro da tarefa *apextract*. Ainda na tarefa *apall* é necessário fazer alguns ajustes nos parâmetros. Como exemplo temos: *extra*= “no”, *b naver*= “-10”,

```

PACKAGE = ccdred
TASK = ccdproc

images =          obj*,lam* List of CCD images to correct
(output =        ) List of output CCD images
(ccdtype=       ) CCD image type to correct
(max_cac=       0) Maximum image caching memory (in Mbytes)
(noproc =       no) List processing steps only?

(fixpix =       no) Fix bad CCD lines and columns?
(oversca=      no) Apply overscan strip correction?
(trim =        yes) Trim the image?
(zerocon=      yes) Apply zero level correction?
(darkcon=      no) Apply dark count correction?
(flatcon=      no) Apply flat field correction?
(illumcon=     no) Apply illumination correction?
(fringec=     no) Apply fringe correction?
(readcon=      no) Convert zero level image to readout correction?
(scancor=      no) Convert flat field image to scan correction?

(readaxi=      line) Read out axis (column|line)
(fixfile=      ) File describing the bad lines and columns
(biassec=      ) Overscan strip image section
(trimsec=     [40:430,2:4609]) Trim data section
(zero =       Zero) Zero level calibration image
(dark =       ) Dark count calibration image
(flat =       Resp) Flat field images
(illum =      ) Illumination correction images
(fringe =     ) Fringe correction images
(minrepl=     1.) Minimum flat field value
(scantyp=     shortscan) Scan type (shortscan|longscan)
(nscan =      1) Number of short scan lines

(interac=     yes) Fit overscan interactively?
(function=    chebyshev) Fitting function
(order =      1) Number of polynomial terms or spline pieces
(sample =     *) Sample points to fit
(naverag=    1) Number of sample points to combine
(niterat=    1) Number of rejection iterations
(low_rej=    3.) Low sigma rejection factor
(high_re=    3.) High sigma rejection factor
(grow =      0.) Rejection growing radius
(mode =      ql)

```

Figura 2.1: Representação da configuração dos parâmetros da tarefa *ccproc* para subtrair os bias e fazer o corte nas imagens.

*b order=“ 2”*, *nfinde= “1”*, *background = “fit”*. No momento da extração do espectro é necessário ajustar as regiões de fundo de céu, utilizando a tecla “s”. Por fim é preciso ajustar uma curva que melhor se adeque aos pontos do gráfico coluna versus linha (ver Figura 2.2).

As etapas de seleção do fundo do céu e de ajuste de curva devem ser realizada para todos os objetos de uma noite de observação. Para extrair o espectro das lâmpadas utiliza-se a tarefa *apsum*. Para essa tarefa é necessário utilizar um espectro referência, e inserir seu nome no parâmetro *reference*, os parâmetros *interac*, *find*, *edit*, *trace*, e *fittrace*

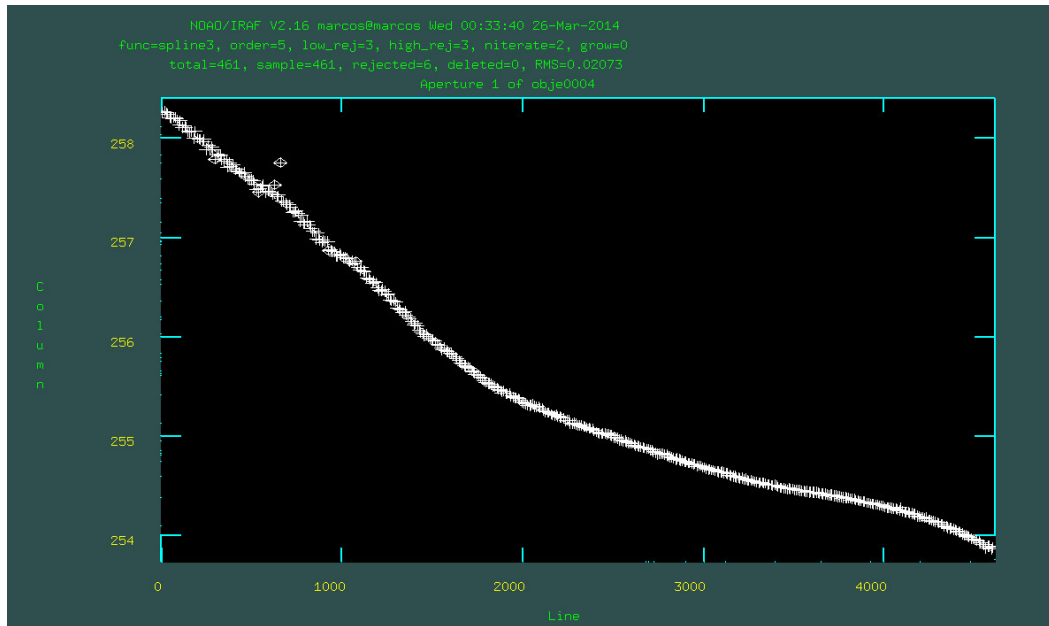


Figura 2.2: Gráfico de coluna em função de linha utilizado na tarefa *apall*.

devem receber “no”. Após configurar essa tarefa, deve-se aplicá-la a todos os espectros das lâmpadas.

## 2.5 Calibração em comprimento de onda do espectro das lâmpadas

As tarefas *identify* e *reidentify* são utilizadas para calibrar em comprimento de onda as lâmpadas. Para isso é necessário possuir um mapa de linhas com os valores de comprimento de onda das principais linhas para o tipo de gás presentes nas lâmpadas de calibração. Primeiramente é necessário configurar na tarefa *identify* qual tipo de lâmpada de calibração foi utilizada. Para os dados do OPD, foi utilizado uma lâmpada de tório necessitando de configurar o parâmetro *coordli* utilizando a lista *linelists\$thorium.dat*. Na utilização da tarefa *identify* em uma das lâmpadas é necessário colocar manualmente os valores das linhas do espectro dessa lâmpada utilizando um mapa de linhas. Para inserir os valores dos comprimentos de onda das linhas basta colocar o cursor em cima de respectiva linha, digitar “m” e escrever o valor de seu comprimento de onda em Angstrom. Em seguida clica-se “f” para verificar uma função resposta relacionando comprimento de onda com pixel, é necessário ajustar uma curva a essa função resposta, para os dados do OPD foi utilizado *:func cheby, : order 8* e *: nite 2*. Ao clicar f é verificado como ficou a curva



ajustada. Em seguida clica-se “l”, por fim clica-se duas vezes “q”, irá aparecer um gráfico com um sinal “X” em cada posição de linha selecionada (ver Figura 2.3). Juntamente com as linhas é ajustada uma curva que melhor possa relacionar o comprimento de onda com pixel do ccd.

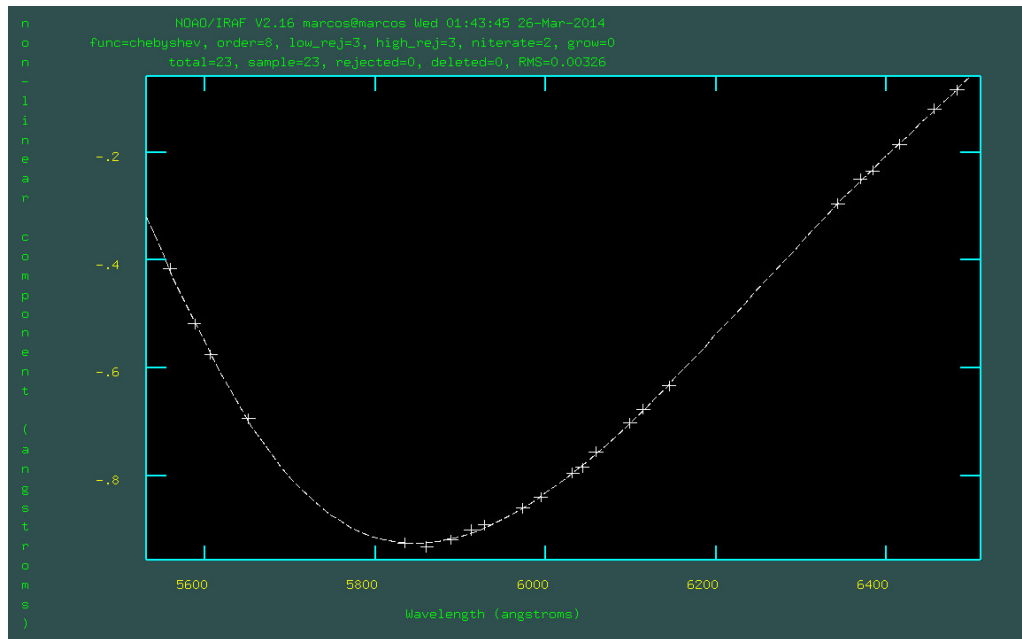


Figura 2.3: Gráfico de posição de cada linha selecionada na tarefa *identify*.

Após uma lâmpada já calibrada utiliza-se a tarefa *reidentify* para calibrar uma segunda lâmpada. Novamente existe a necessidade de configurar o parâmetro *coordli* dessa tarefa, utilizando a mesma lista de linhas da tarefa *identify*. Nota-se que após retirar os espectros tanto das lâmpadas quanto das estrelas é gerado um novo arquivo com mesmo nome do arquivo original porém alterado de *.fits* para *.ms.fits*.

## 2.6 Correção do valor de UT

O valor de UT(Tempo Universal) presente no cabeçalho em uma imagem observada para os dados do OPD consistem no momento inicial da observação. A tarefa *setairmass* utiliza-se das informações contidas no cabeçalho da imagem. Para adicionar um novo campo nesse cabeçalho, chamado *utmiddle*, esse campo irá conter os dados de UT médio da imagem em questão. A tarefa *refspectra* possui a função de atribuir as lâmpadas já calibradas em comprimento de onda nos espectros das estrelas. Alguns parâmetros importantes a serem ajustados são: *reference* = ‘nomeclatura das lâmpadas’ *sort* = “UTMIDDLE”, *group* = “

”, *time* = “yes” e *answer* = “no”, ver Figura 2.4.

```

                                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = onedspec
  TASK = refspectra

input      =      obje*.ms.fits  List of input spectra
(referen=  lamp0001.ms.fits,lamp0002.ms.fits) List of reference spect
(apertur=      ) Input aperture selection list
(refaps =      ) Reference aperture selection list
(ignorea=      yes) Ignore input and reference apertures
(select =      interp) Selection method for reference spect
(sort =      UTMIDDLE) Sort key
(group =      ) Group key
(time =      yes) Is sort key a time?
(timewra=     17.) Time wrap point for time sorting
(overrid=     no) Override previous assignments?
(confirm=     yes) Confirm reference spectrum assignmen
(assign =     yes) Assign the reference spectra to the
(logfile=     STDOUT,logfile) List of logfiles
(verbose=     no) Verbose log output?
answer =     no) Accept assignment?
(mode =      ql)

```

Figura 2.4: Configuração dos parâmetros da tarefa *refspectra*.

## 2.7 Calibração dos espectros em comprimento de onda

A tarefa *dispcor* realiza a calibração do espectros das estrelas em comprimento de onda. Alguns parâmetros dessa tarefa necessitam ser alterados, *global* = “yes”, *confirm* = “yes”, *listonly* = “yes” e *verbose* = “yes”. O campo *observat* do cabeçalho da imagem deve estar preenchido corretamente. Para os dados do OPD esse campo deve estar composto como: *observat* = “LNA”. O preenchimento do campo pode ser realizado utilizando-se a tarefa *hedit*. Após configurados os parâmetros, é necessário chamar a tarefa *dispcor* e em seguida aplicar o seguinte comando: *dispcor listonly-*, esse comando possui a função de salvar os espectros calibrados em comprimento de onda em um novo arquivo.

O espectro ainda precisa ser normalizado. Com a tarefa *continuum* é realizada essa normalização. É importante ressaltar que a função ajustada no espectro deve ter ordem não muito alta, de preferência menor que 10, para que o ajuste não desconfigure as linhas mais largas do espectro utilizado. Na Figura 2.5 pode-se verificar uma representação do espectro antes e depois de ser normalizado.

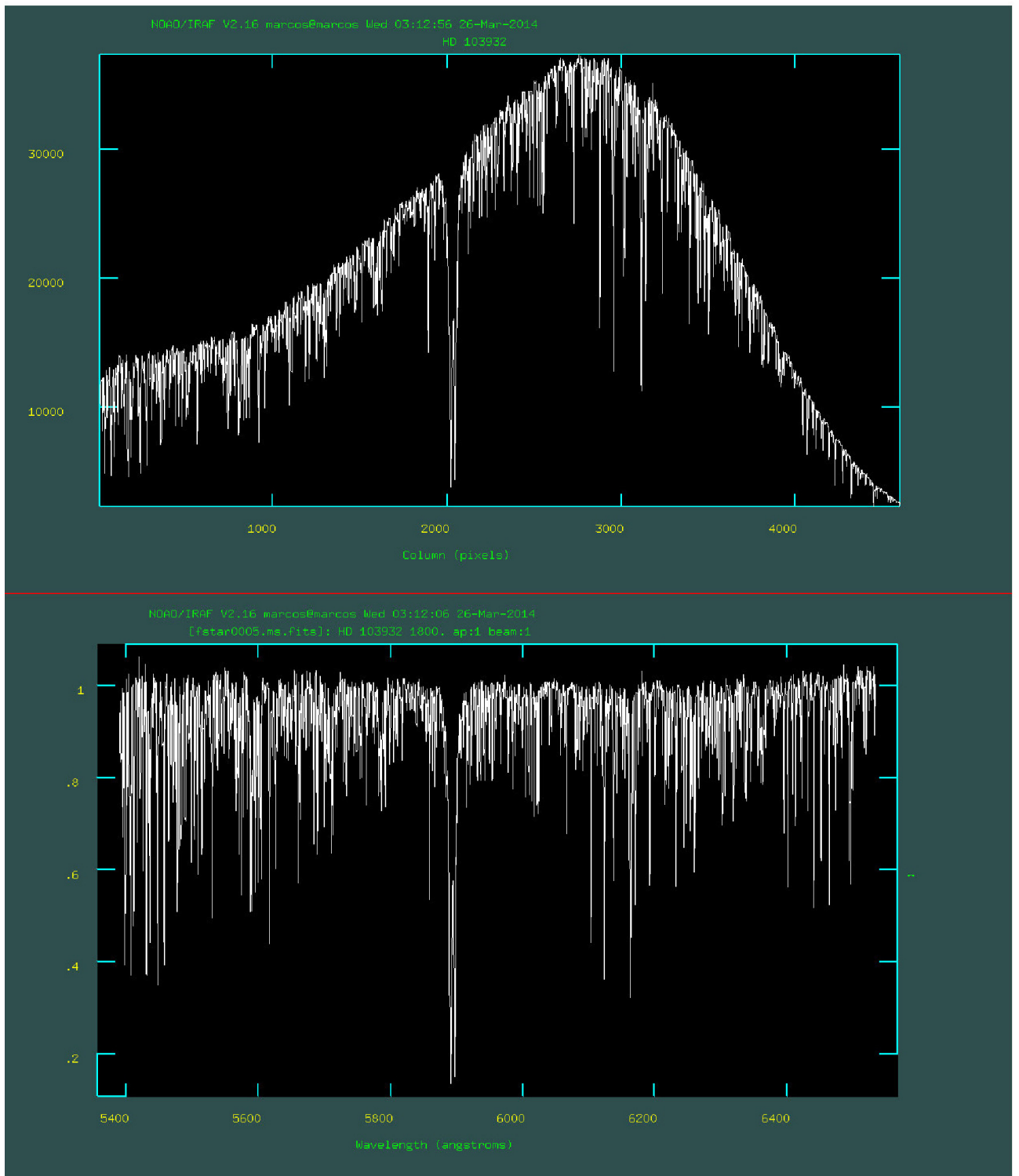


Figura 2.5: Espectro da estrela HD 103932 antes e depois da utilização das tarefas *dispcor* e *continuum*, respectivamente. Essas tarefas foram utilizadas para fazer a calibração em comprimento de onda e para retirar o contínuo do espectro.

## 2.8 Cálculo da velocidade radial utilizando a tarefa

### *fxcor*

Finalmente, o espectro das estrelas está adequado para o cálculo da velocidade radial. Para cada noite de observação foi observada uma ou mais estrelas padrões de velocidade radial. Essas estrelas serão utilizadas como template na tarefa *fxcor*. No entanto, antes de utilizar essa tarefa é necessário inserir no cabeçalho da estrela padrão o parâmetro *VHELIO* com o valor de velocidade radial, em *km/s* dessa estrela em questão. A velocidade radial que é apresentada nesse trabalho consiste na velocidade de afastamento ou aproximação de um astro no referencial do sol, sendo que valores positivos representam movimento de afastamento do astro e valores negativos representam movimento de aproximação do astro.

Para determinação da velocidade radial, foi utilizada a tarefa FXCOR do IRAF, que realiza uma correlação cruzada de Fourier entre os espectros observados e espectros de referência. Cada estrela observada foi comparada com estrelas padrões de velocidade radial que foi utilizada como template na tarefa *fxcor*. Na Figura 2.6 temos um exemplo de utilização da tarefa *fxcor*.

Utilizando do método descrito acima, foram estudados espectros de 255 estrelas somando dados do OPD observados pelo pesquisador Wilton Dias e dados do ESO observados pelo astrônomo Jacques Lepine. De todos os dados estudados foram calculadas as velocidades radiais de 43 estrelas para as campanhas de observação de 2003 e 2008, sendo que 25 delas possuem velocidade radial na literatura. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 2.4. Logo abaixo, no gráfico 2.7 temos a velocidade radial encontrada versus velocidade radial presente na literatura.

<b>Data</b>	<b>Nome</b>	<b>VR</b>	<b>Erro</b>	<b>VR ( Literatura)</b>	<b>(Erro Literatura)</b>
03/02/27	Hd 136202	46,7	16,8	54,3	0,1
03/02/27	Hd 37160	98,2	11,4	98,96	0,09
03/02/27	Hd 42397	36,8	13,3	38,9	0,5
03/02/27	Hd 50778	95,6	5,7	96,2	0,1
03/02/27	Hd 83516	35,2	11,1	43,5	0,1
03/02/28	Hd 107328	40,3	10,2	36,4	0,01
03/02/28	Hd 50778	112,0	8,2	96,2	0,1
03/02/28	Hd 81797	7,6	10,3	-4,38	0,05
03/02/28	Hd 83516	53,8	5,1	43,5	0,1
03/02/28	Hd 89449	18,8	18,8	5,9	0,1
03/02/28	Hd 92588	39,5	9,8	42,5	0,1
03/02/28	Hd 108903	24,2	15,7	21	0,1
08/04/23	HD 115617	-2,3	2,1	-8,13	0,09
08/04/23	HD 136202	53,8	1,6	54,44	0,1
08/04/23	HD 80170	10,1	0,7	0,5	0,1
08/04/23	HD 81797	3,7	2,3	-4,38	0,05
08/04/23	TYC 8626-2133-1	6,6	8,1	-2,999	6,566
08/04/23	CPD-61 4103	-12,0	1,2	-15,53	0,15
08/04/23	CPD-61 4106	-10,2	1,1	-14,71	0,29
08/04/23	HD 84117	37,2	2,6	35,3	0,44
08/04/24	HD 112164	36,7	1,7	36,5	0,2
08/04/24	HD 126053	-22,4	1,4	-19,9	0,04
08/04/24	HD 171391	1,7	1,5	7,59	0,05
08/04/24	HD 92588	42,5	1,1	41,9	0,1
08/04/24	TYC 7876-309-1	-20,6	7,8	-35,2	2,3

Tabela 2.4: Comparação dos valores de velocidade radial encontrado com os valores presentes na literatura. Valores dados em km/s.

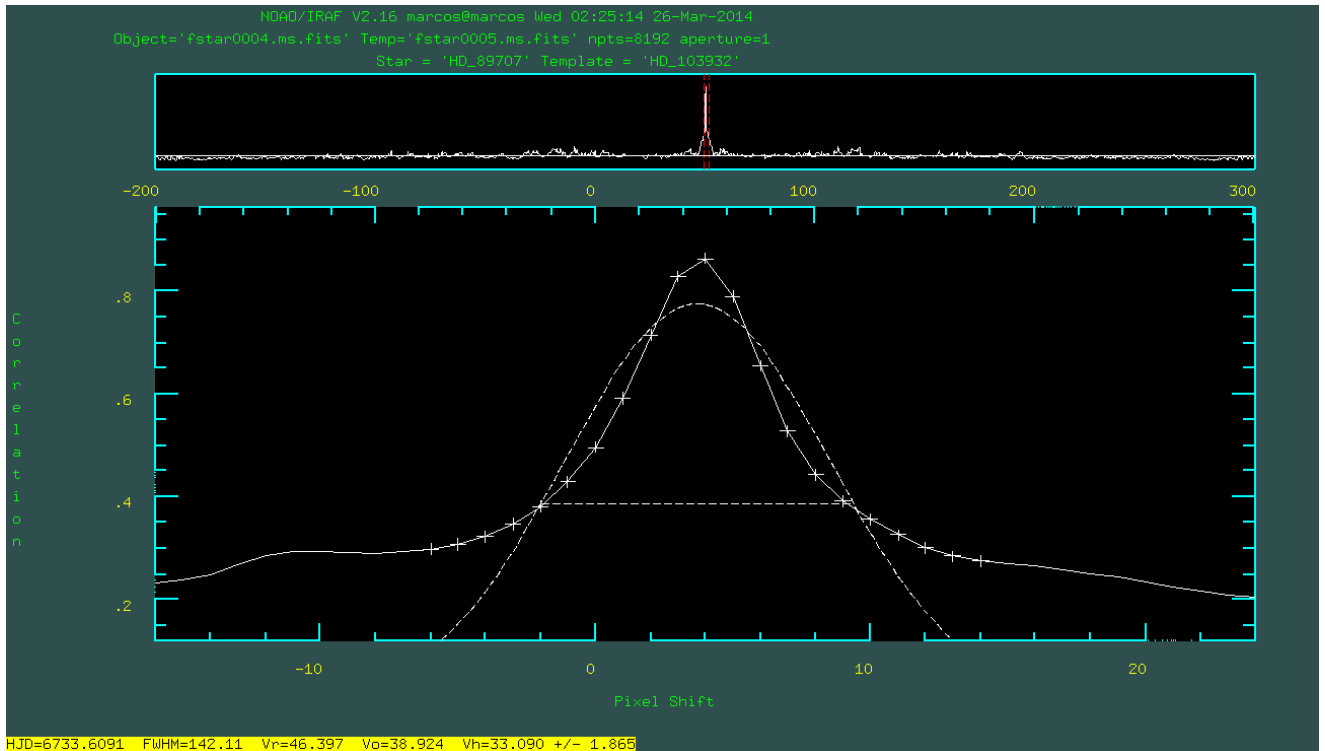


Figura 2.6: Um pico típico de correlação cruzada, utilizando a tarefa fxcor do IRAF, donde foi possível encontrar a velocidade radial do objeto HD 89707 utilizando como estrela padrão (template) o objeto HD 103932.

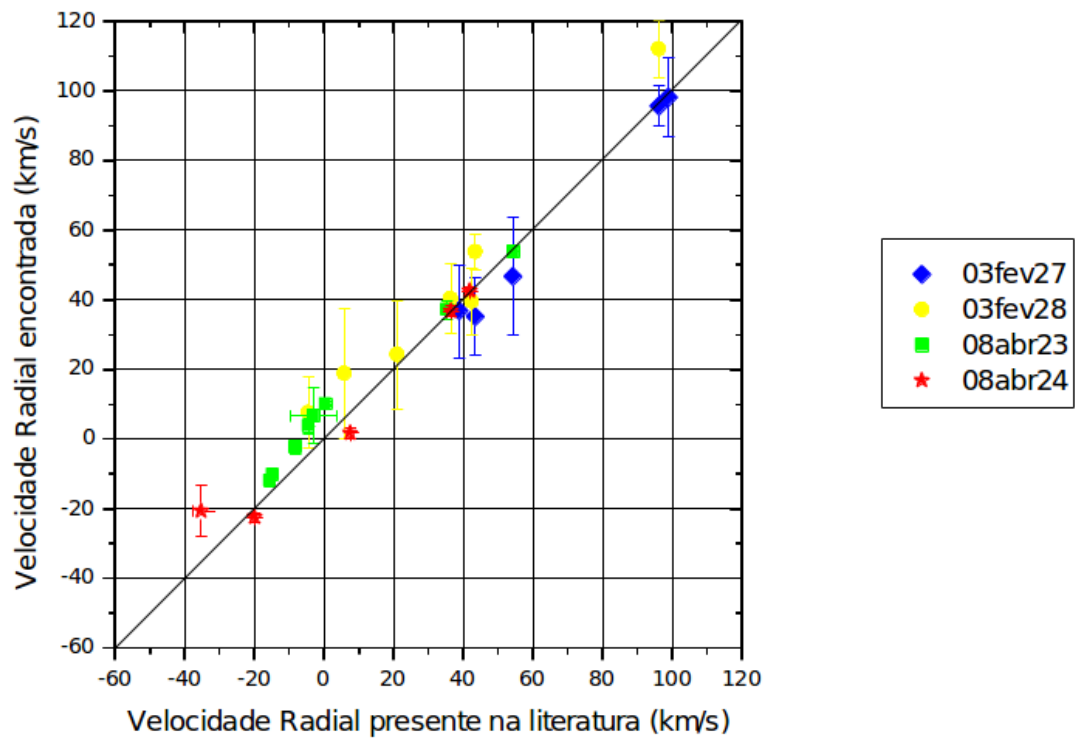


Figura 2.7: Representação dos dados de velocidade radial encontrada com os dados presentes na literatura com suas respectivas barras de erro.

## Capítulo 3

# Obtenção de parâmetros Estelares a partir de Espectros Sintéticos

A principal motivação desse trabalho é obter os parâmetros físicos de estrelas assim como as velocidades radiais simultaneamente, de forma automatizada, através de um código computacional. A maneira mais eficiente de se obter esse resultado é através do ajuste de espectros sintéticos aos dados observados. Bibliotecas de espectros estelares são utilizadas em diversas aplicações em astronomia, como por exemplo em estudos de síntese espectral de populações estelares, classificação de estrelas individuais, entre muitas outras. Existe uma gama de opções de espectros sintéticos disponíveis na literatura, cada qual com sua peculiaridade e características definidas por objetivos científicos específicos. Uma boa revisão sobre grids de espectros sintéticos e suas aplicações pode ser encontrada em Martins & Coelho (2007) e nas referencias ali mencionadas.

No presente trabalho utilizamos dois métodos para obtenção de espectros sintéticos para realizar os ajustes aos dados observados: 1) síntese espectral com base nos modelos de atmosfera estelar de Castelli & Kurucz (2004) (a partir de agora mencionado como CK04) e 2) o grid pré-sintetizado detalhado em Coelho (2014)

Abaixo descrevemos como foram obtidos os espectros sintéticos a partir de um modelo de síntese espectral usando os modelos de atmosfera de CK04. Este é um dos principais grids de modelos de atmosfera disponíveis na literatura e é amplamente utilizado pela comunidade científica para várias aplicações, inclusive obtenção de parâmetros físicos de estrelas.

### 3.1 Síntese espectral para modelos de atmosfera de CK04

A síntese espectral consiste basicamente em gerar um espectro eletromagnético a partir de um modelo de atmosfera estelar e uma lista de opacidades atômicas e moleculares. Para a realização da síntese a partir desses dados optamos por trabalhar com o programa SPECTRUM utilizando os modelos de atmosfera ATLAS9 de CK04.

Para a síntese dos espectros sintéticos foi utilizado o software SPECTRUM versão 2.76 (Gray & Corbally, 1994). O programa SPECTRUM já possui em sua pasta para download um arquivo chamado luke.lst. Esse arquivo contém 501686 linhas espectrais para o intervalo em comprimento de onda de 3000 Å a 6800 Å, não necessitando o usuário buscar essas linhas na literatura. O programa necessita de um modelo de atmosfera estelar como entrada para sintetizar os espectros sobre o pressuposto do equilíbrio termodinâmico local.

Como existe um grande número de modelos de atmosfera estelares, foi escrito um código em IDL que utiliza o programa SPECTRUM para gerar espectros sintéticos de todos os possíveis modelos de atmosfera da biblioteca ATLAS9. Os modelos de atmosfera utilizados estão disponíveis no site (<http://kurucz.harvard.edu/>). Os modelos de atmosfera são organizados em arquivos que definem a metalicidade, variando de -5.0 a 1.0. Cada arquivo de metalicidade contém modelos de atmosfera para estrelas com Teff variando de 3500K a 50000K e Log(g) de 0,0 dex a 5,0 dex.

O Programa SPECTRUM foi escrito em linguagem C. Para o usuário gerar um espectro sintético é necessário manualmente usar um comando no terminal e editar um arquivo .txt que forneça para o programa alguns parâmetros básicos, como: lista de modelos de atmosfera que será utilizada, nome do arquivo de saída, valores de comprimento de onda, turbulência e intervalo de comprimento de onda.

Como o intuito era gerar um grid completo a partir dos modelos de atmosfera, com um intervalo em comprimento de onda de 1000 Å, foi escrito um programa que gerou automaticamente esses espectros.

O programa para automatização do trabalho foi escrito em IDL. Esse programa escreve os parâmetros corretos em um arquivo .txt, em seguida utiliza a função 'spawn' do IDL para compilar em C o programa SPECTRUM. Utilizando essa automatização foi possível



gerar os 24760 espectros em poucos dias para o intervalo de comprimento de onda dentro dos limites do SPECTRUM (3000 Å a 6800 Å) compatíveis com as observações que seriam usadas nos ajustes. Na Figura 3.1 temos um fluxograma para representar de maneira simples como funciona o código que gera automaticamente os espectros sintéticos a partir dos modelos de atmosfera do site do Kurucz.

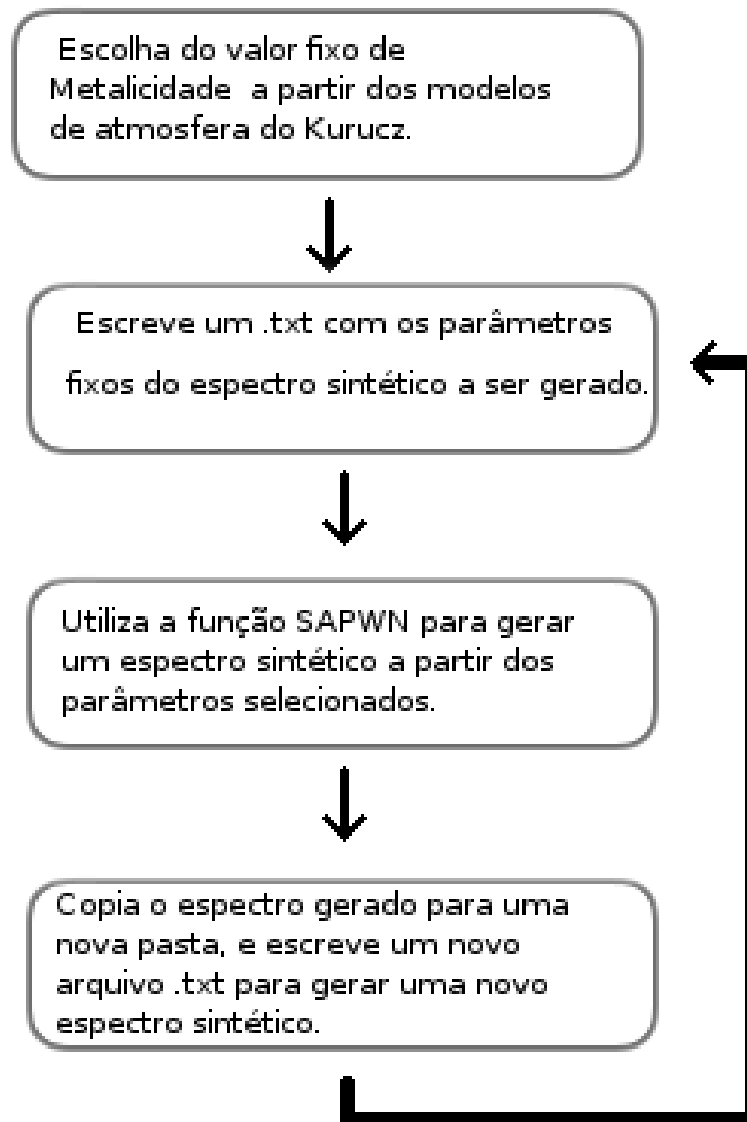


Figura 3.1: Representação em forma de fluxograma dos passos realizados para gerar os espectros sintéticos automaticamente.

Após gerado o Grid, foi feito um outro código, para ajustar a resolução do espectro sintético à resolução dos espectros observados. Para esse trabalho foi utilizado um comando no programa SPECTRUM chamado *smooth2*. Esse comando utiliza um kernel Gaussiano no espectro sintético para suavizar o espectro na resolução desejada (mais

detalhes em Gray & Corbally (1994)). Para isso é necessário colocar os parâmetros de entrada nome do espectro de entrada, nome do espectro de saída, espaçamento do comprimento de onda (em angstroms) do espectro de entrada, resolução do espectro de saída e espaçamento em angstroms do espectro de saída. Novamente foi gerado um programa em IDL para automatizar esse trabalho, de forma a adequar a resolução de todos os espectros sem a necessidade de digitar esses comandos no terminal individualmente.

Este grid gerado foi posteriormente usado no ajuste dos espectros observados.

### 3.2 Espectros sintéticos da biblioteca Coelho 2014

Os espectros de Coelho (2014) constituem uma nova biblioteca teórica que abrange uma Temperatura efetiva de 3000 a 25000K, valores de  $\log(g)$  de -0,5 a 5,5 com intervalos de 0,5 e Metalicidade Fe/H variando de -1,3 a +0,2. O conjunto total de espectros utilizados foram de 3727 com comprimento de onda de 250,00nm a 900,00nm e intervalos de 0,02nm

Essa biblioteca é composta por funções de distribuição de opacidade recém-computadas, modelos de atmosferas ATLAS9 dispondo de 8 metalicidades distintas sendo que cada mistura de padrão solar há 2 possibilidades de proporção de elementos  $\alpha$ . Maiores detalhes sobre como foi gerada a biblioteca e comparações dessa biblioteca com bibliotecas já existentes na literatura são apresentados em (Coelho , 2014).

A biblioteca está disponível para download no site <http://specmodels.iag.usp.br/>, onde encontram-se a versão da biblioteca utilizada nesse trabalho além de outras versões de bibliotecas sintéticas da mesma autora.

### 3.3 Obtenção da velocidade radial e parâmetros físicos

Nessa etapa foi realizado um ajuste dos espectros observados com os sintéticos através de comparação com todos espectros dos dois grids gerados, para obter o espectro sintético que mais se assemelha com o espectro observado. Para tal, foi escrito um código em IDL para comparação dos espectros observados normalizados com os espectros sintéticos.

A estrutura do código é basicamente a mesma para os espectros obtidos pelos modelos de atmosfera Kurucz e pela biblioteca Coelho (2014), sendo a única diferença o fato de os espectros sintéticos de Coelho necessitarem de normalização do contínuo, o que adiciona algumas linhas de código.

Abaixo descrevemos em detalhes as principais etapas realizadas no código.

**Principais etapas:**

- **Carregamento de uma estrela dos espectro sintético:** Nessa etapa é carregada apenas uma estrela do espectro sintético, que possua linhas na mesma faixa espectral das estrelas observadas. Essa estrela será utilizada para estimativa do primeiro valor de velocidade radial das estrelas observadas.

- **Carregamento de todas as estrelas observadas:** Todos os espectros das estrelas observadas em uma noite de observação serão carregados para facilitar as comparações feitas no programa.

- **Obtenção da estimativa inicial de velocidades radiais das estrelas observadas:** A velocidade radial é obtida comparando o espectro sintético com espectro de cada estrela observada. Primeiramente, é realizado um deslocamento no comprimento de onda do espectro observado. O deslocamento depende do valor do comprimento de onda. A Equação 1.3 nos mostra a relação entre comprimento de onda e variação de comprimento de onda para um valor fixo de velocidade radial relativa. Assim, o deslocamento de comprimento de onda não é o mesmo para cada pixel mas sim segue uma relação segundo a Equação 3.1, onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda \cdot v_{relativa}}{c} \quad (3.1)$$

Utilizando o critério de mínimos quadrados (Equação 3.2), foi obtido um resíduo entre o fluxo do espectro observado e o fluxo do espectro sintético para cada pixel. A soma do resíduo de todos os pixels da estrela resulta em um resíduo final para essa estrela.

$$\chi_i = (x_{i,sintético} - x_{i,observado})^2 \quad (3.2)$$

Para cada deslocamento, ou seja, cada valor diferente de velocidade relativa, teremos um resíduo final diferente, de modo que podemos obter a distribuição de resíduos em função do deslocamento. O melhor ajuste é obtido através do valor mínimo desta distribuição e nos diz qual a velocidade relativa entre o espectro observado e o espectro sintético.

Para facilitar a compreensão, as Figuras 3.2 e 3.3 mostram um exemplo de resíduo encontrado para obtenção da velocidade radial da estrela HD146233 ao comparar o espectro observado as bibliotecas pelo espectro CK04 e Coelho 2014 respectivamente. Por fim, nessa mesma etapa, é ajustada uma Gaussiana na distribuição do resíduo de onde obtemos a partir da largura da Gaussiana ajustada o erro associado à velocidade radial encontrada.

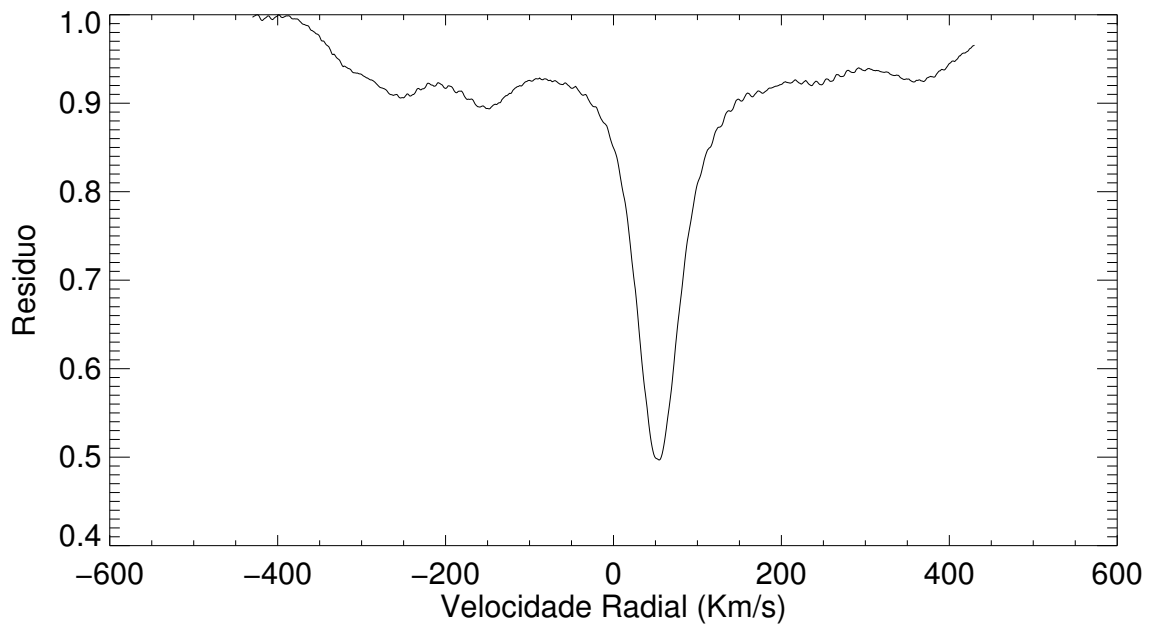


Figura 3.2: Resíduo obtido para cálculo da velocidade radial, utilizando espectro sintético Kurucz.

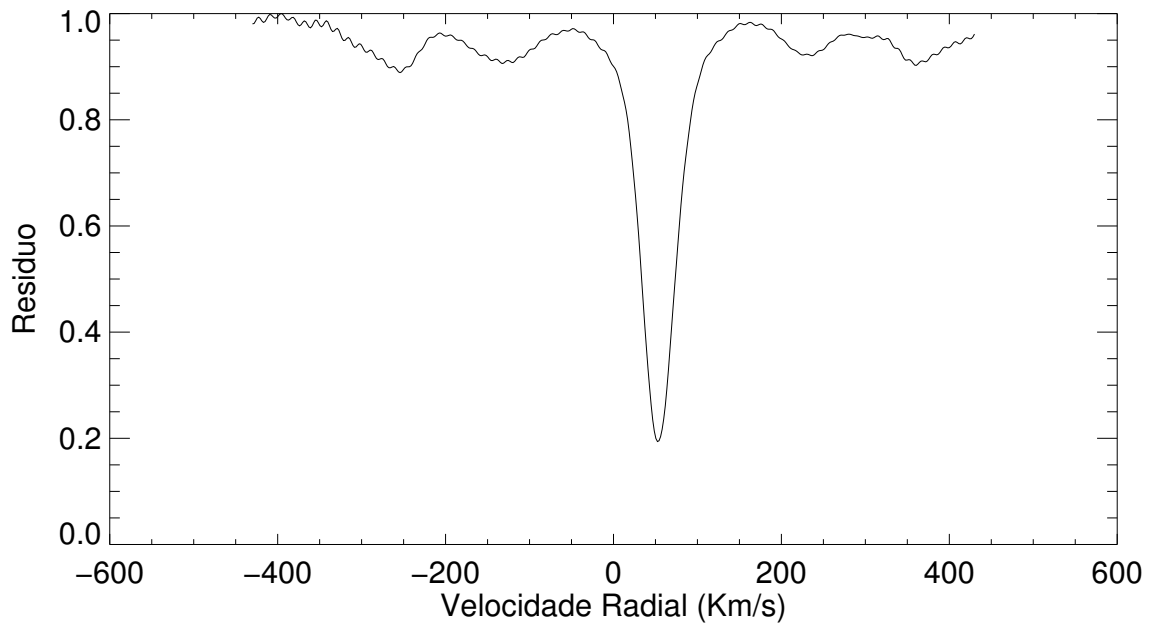


Figura 3.3: Resíduo obtido para cálculo da velocidade radial utilizando o espectro sintético Coelho.

- **Salvando resultados da velocidade radial:** Com intuito de facilitar a visualização dos dados ajustados, foram salvos todos os gráficos de espectro sintético e espectro observado antes e depois de determinado o deslocamento. Nas Figuras 3.4 e 3.5 temos o espectro da estrela HD146233 antes e depois da obtenção da velocidade radial ao utilizar o espectro sintético Kurukz e Coelho respectivamente.

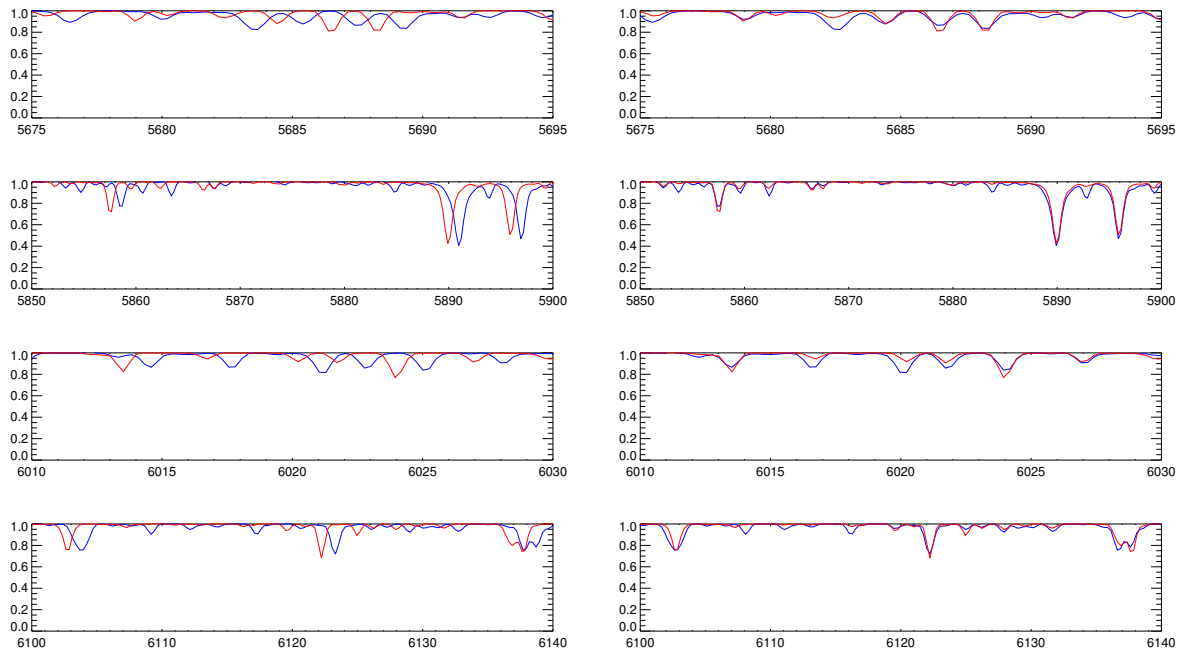


Figura 3.4: Espectro sintético Kurucz (vermelho) e espectro observado (azul) antes (espectros do lado esquerdo) e depois (espectros do lado direito) de correção da velocidade radial para estrela HD146233.

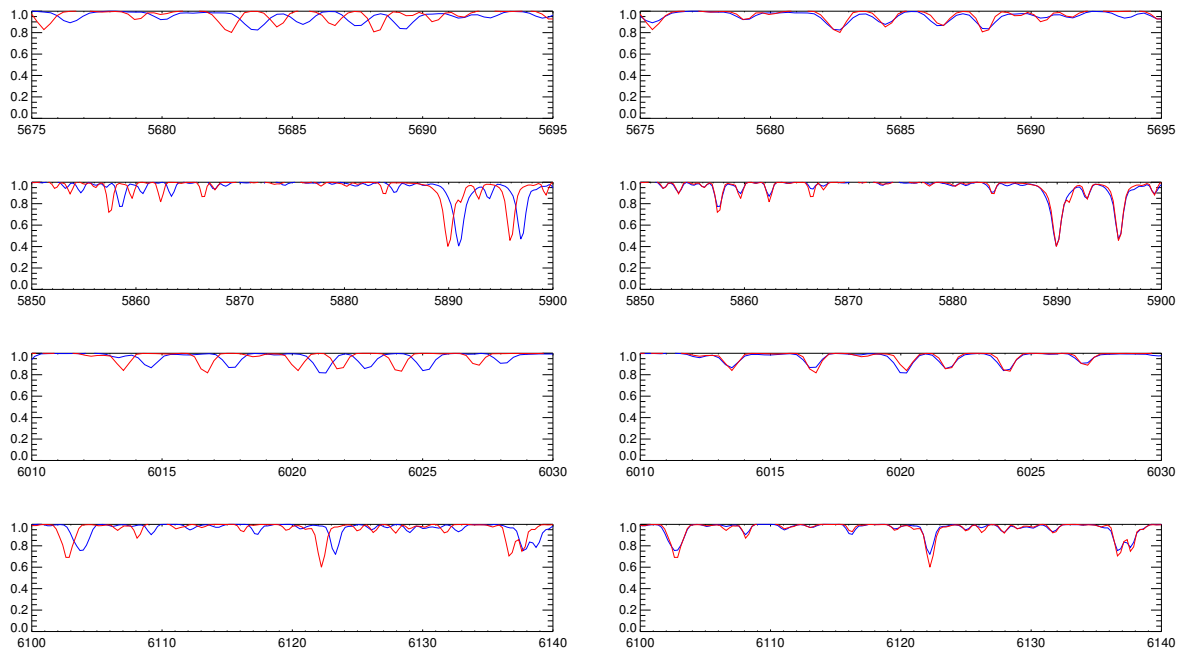


Figura 3.5: Espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) antes (espectros do lado esquerdo) e depois (espectros do lado direito) de correção da velocidade radial para estrela HD146233.

• **Determinação de  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$  e Metalicidade:** Nessa etapa todos os espectros sintéticos são carregados e comparados com espectro de cada estrela observada (já corrigida sua velocidade radial). Para cada um dos espectros CK04 (24760 espectros sintéticos) e Coelho 2014 (3727 espectro sintéticos) é obtido um resíduo pela comparação direta entre os espectros utilizando critério de mínimos quadrados (mesmo calculo de resíduo utilizado para encontrar a Velocidade Radial). Assim o espectro que apresentar o menor resíduo será o espectro que melhor se ajusta com nosso espectro observado. Nas Figuras 3.6 e 3.7 temos um exemplo do resíduo encontrado ao comparar todas as estrelas da biblioteca com o espectro da estrela HD146233 para os espectros sintéticos CK04 e Coelho 2014 respectivamente.

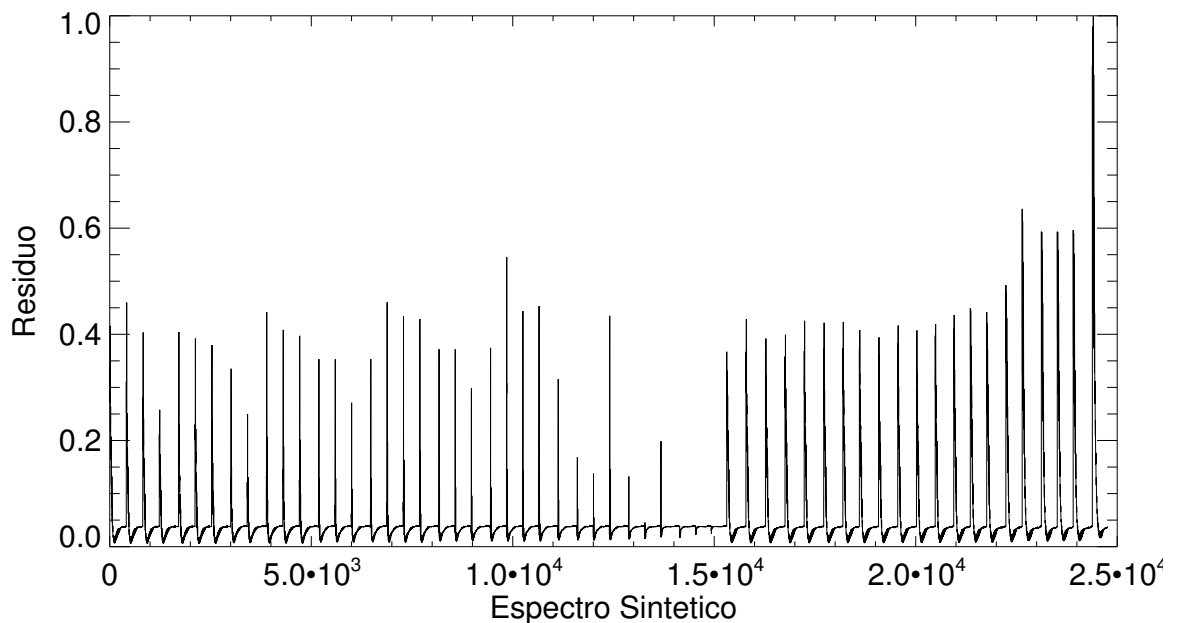


Figura 3.6: Resíduo obtido ao comparar todas as estrelas da biblioteca Kurucz com o espectro da estrela HD146233.

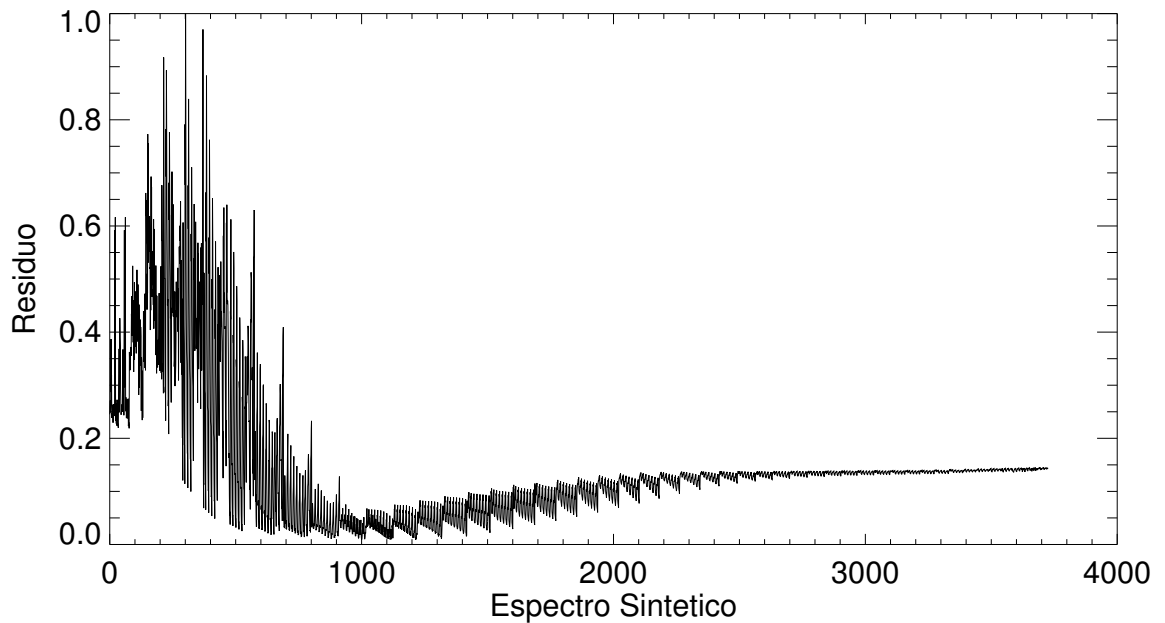


Figura 3.7: Resíduo obtido ao comparar todas as estrelas da biblioteca Coelho com o espectro da estrela HD146233.

- **Salvando resultados:** Para facilitar a visualização dos dados ajustados, foram salvos todos os gráficos de espectro sintético e espectro observado antes e depois de corrigido o efeito do deslocamento e encontrado o melhor espectro de toda a biblioteca. Nas Figuras 3.8 e 3.9 temos um exemplo do espectro da estrela HD146233 e do espectro sintético que melhor se ajustou utilizando o conjunto de espectros Kurukz e Coelho respectivamente.

O programa permite encontrar o melhor espectro sintético utilizando o espectro observado completo, ou utilizando algumas regiões pré selecionadas pelo usuário. As regiões podem ser úteis para espectros que possuem algum problema em uma determina faixa do comprimento de onda ou simplesmente para estudar apenas regiões onde as linhas de absorção são mais visíveis.



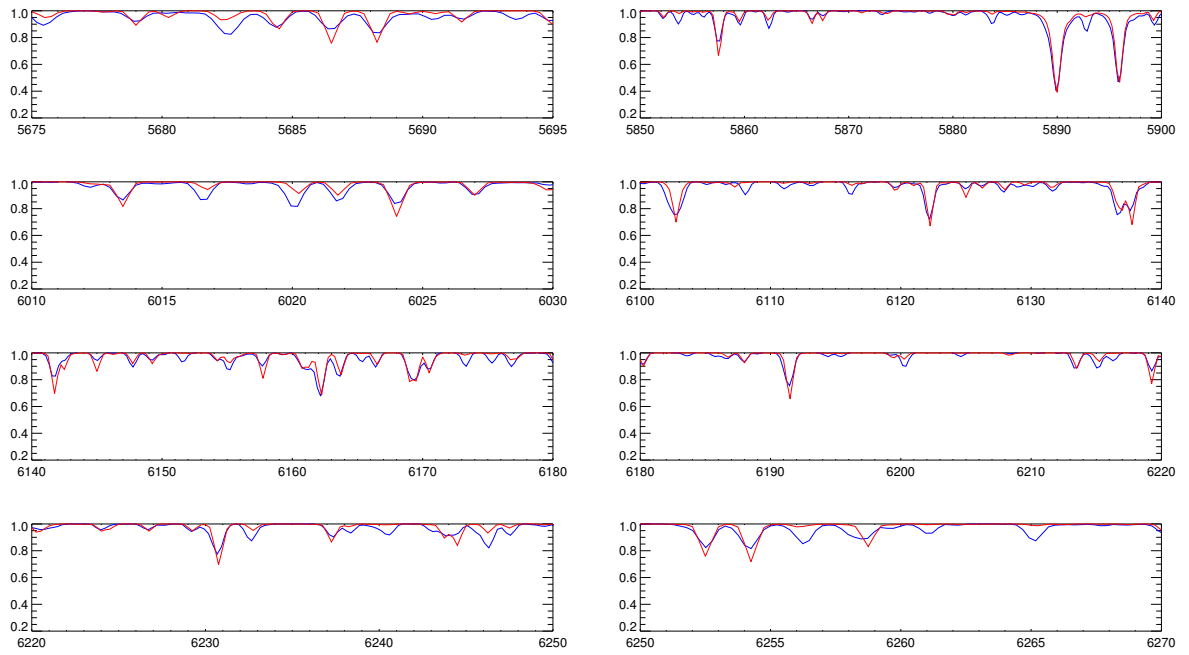


Figura 3.8: Melhor espectro sintético Kurucz (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD146233.

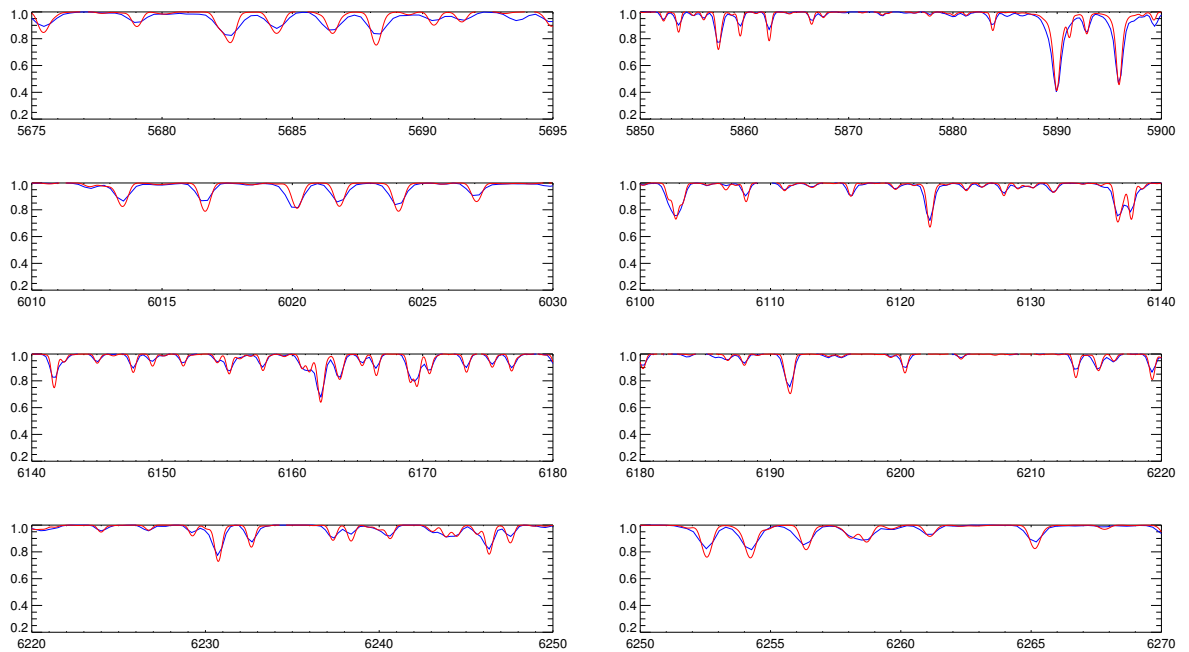


Figura 3.9: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD146233..

Por fim, após encontrado o melhor espectro sintético, é recalculada a velocidade radial da estrela observada utilizando o mesmo método descrito no início do código, porém comparando a estrela com o melhor espectro sintético observado para ela. Os valores

finais de velocidade radial são apresentados com a correção heliocêntrica.

Para facilitar a compreensão, mostramos na Figura 3.10 uma representação em forma de fluxograma para mostrar como foi trabalhado a obtenção dos dados de velocidade radial e parâmetros atmosféricos utilizando os grids de espectros sintéticos.

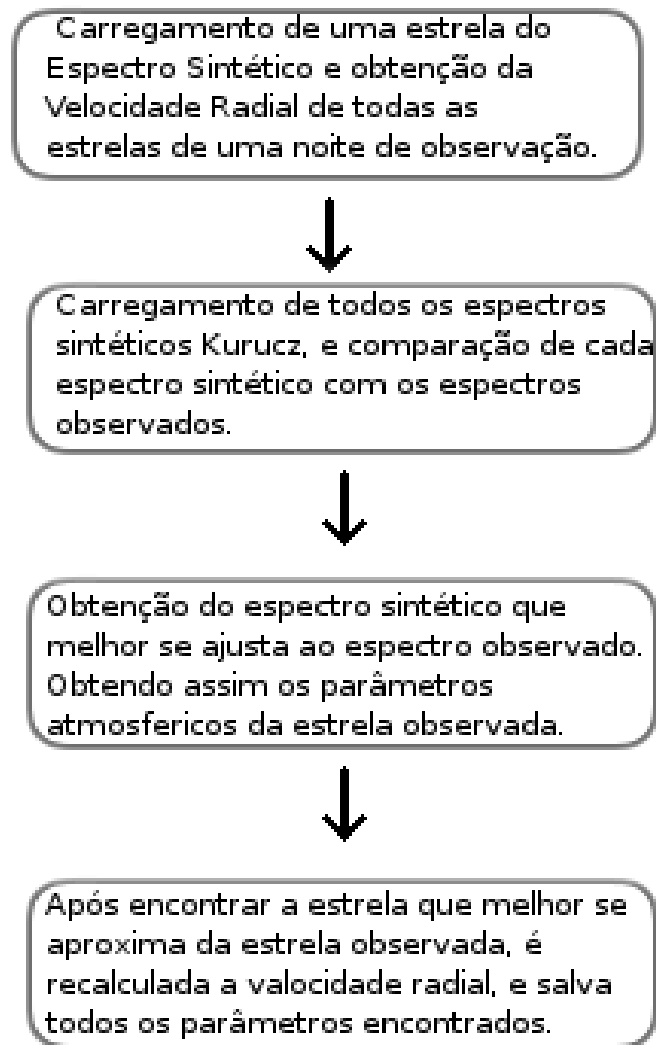


Figura 3.10: Representação em forma de fluxograma dos passos realizados para obtenção dos parâmetros físicos de uma estrela, utilizando os espectros sintéticos.

# Capítulo 4

## Validação do Método

Após realizadas todas as etapas do Capítulo 3, obtivemos um conjunto de resultados para a velocidade radial e parâmetros físicos estelares como  $\log(g)$ , Metalicidade e Temperatura efetiva ( $T_{\text{eff}}$ ). Nesse Capítulo, mostramos uma comparação entre os dados obtidos pelos ajustes utilizando cada grid de espectros sintéticos aos dados observados para os quais obtivemos determinações independentes na literatura. Além disso, no caso específico da velocidade radial, como a comunidade adota extensivamente o procedimento de correlação cruzada de espectros no IRAF com auxílio da tarefa FXCOR, faremos uma comparação do resultado obtido pelo nosso método com aquele obtido pelo FXCOR para a mesma estrela observada. As estrelas apresentadas nesse capítulo são estrelas observadas exatamente para validar o método, sendo em grande maioria padrões de velocidade radial ou padrão de metalicidade.

### 4.1 Resultados com o grid Coelho 2014

#### 4.1.1 Velocidade Radial

A partir dos valores de velocidade radial obtida pelo nosso código, foram geradas as Tabelas 4.1 e 4.2 utilizando a biblioteca sintético Coelho 2014 para ajustar as estrelas observadas em 2008 e 2014, respectivamente. Na mesma tabela, é possível verificar qual o valor da incerteza associada a velocidade radial encontrada, os valores da velocidade radial obtidos da literatura e os valores da velocidade radial encontradas utilizando o FXCOR no IRAF.

Estrela	VR	$\sigma$	VR (Lit)	erro (LIT)	VR (IRAF)	erro (IRAF)
HD115617	-6,9	11,1	-5,80	0,09	-2,3	2,1
HD136202	52,3	10,5	54,3	0,1	46,7	16,8
HD80170	9,1	10,3	0,5	0,1	10,1	0,7
TYC8626-2133-1	5,8	12,6	-2,999	6,566	6,6	8,1
CPD-614103	-13,8	10,2	-15,53	0,15	-12,0	1,2
CPD-614106	-12,1	10,2	-14,71	0,29	-10,2	1,1
HD84117	42,2	11,0	35,97	0,09	37,2	2,6
HD112164	43,8	10,8	36,5	0,2	36,7	1,7
HD126053	-15,3	10,5	-19,6	0,1	-22,4	1,4
HD171391	9,7	10,2	7,59	0,05	1,7	1,5
HD92588	50,5	12,0	42,836	0,053	42,5	1,1
TYC7876-309-1	-11,7	14,1	-35,2	2,3	-20,6	7,5
HD97253	6,3	11,3	1	4	—	—
Tyc8333-1282-1	-13,4	13,7	-34,7	1,1	—	—
Tyc6540-4066-1	15,9	10,2	22,15	26,05	—	—

Tabela 4.1: Valores das velocidades radiais, em km/s, obtidos com dados observados em 2008, com lambda centrado em 600nm e ajuste utilizando espectros sintéticos de Coelho 2014 comparadas com valores encontradas pelo FXCOR no IRAF e com os valores presentes na literatura. Os valores da literatura assim como suas incertezas são apresentados como reportados em suas respectivas referências.

Estrela	VR	$\sigma$	VR (Lit)	erro (LIT)	VR (IRAF)	erro (IRAF)
HD144585	1,5	10,2	-14,04	0,09	—	—
HD146233	26,2	10,4	11,4	1,6	—	—
HD210302	-10,7	10,4	-16,23	0,09	-16,5	1,6
HD217357	21,3	12,0	16,31	0,18	—	—
HD196761	-33,7	10,6	-41,82	0,06	—	—
HD210302	-9,0	10,6	-16,23	0,09	-10,2	1,9
HIP10725	-12,4	10,7	-0,7	1,7	—	—
HD222368	9,8	10,9	5,55	0,03	—	—
HD210302	-12,1	10,7	-16,23	0,09	-15,0	2,1
HR509	-12,2	10,8	-16,9	1,6	—	—
HR1084	22,7	11,9	16,52	0,05	—	—
HD42807	15,1	11,2	5,96	0,80	—	—
HD84117	41,9	10,5	35,97	0,09	37,2	2,6
HD89707	92,7	10,4	82,6	0,3	—	—
HD103932	55,9	12,7	48,5	0,1	—	—
HD117176	11,3	10,6	5,2	0,2	—	—
HD119288	-3,9	10,3	-11,5	0,3	—	—

Tabela 4.2: Valores de velocidade radial, em km/s, obtidos com dados observados em 2014 com lambda centrado em 600nm e ajuste utilizando espectros sintéticos de Coelho 2014 comparadas com valores encontradas pelo FXCOR no IRAF e com os valores presentes na literatura. Os valores da literatura assim como suas incertezas são apresentados como reportados em suas respectivas referências.

A partir dos dados das Tabelas 4.1 e 4.2. Foi possível fazer uma comparação gráfica dos dados obtidos pelo código com os dados presentes na literatura (ver gráfico 4.1). Foi realizada também uma comparação dos dados obtidos pelo FXCOR no IRAF com os

dados obtidos através do código desse trabalho (ver gráfico 4.2).

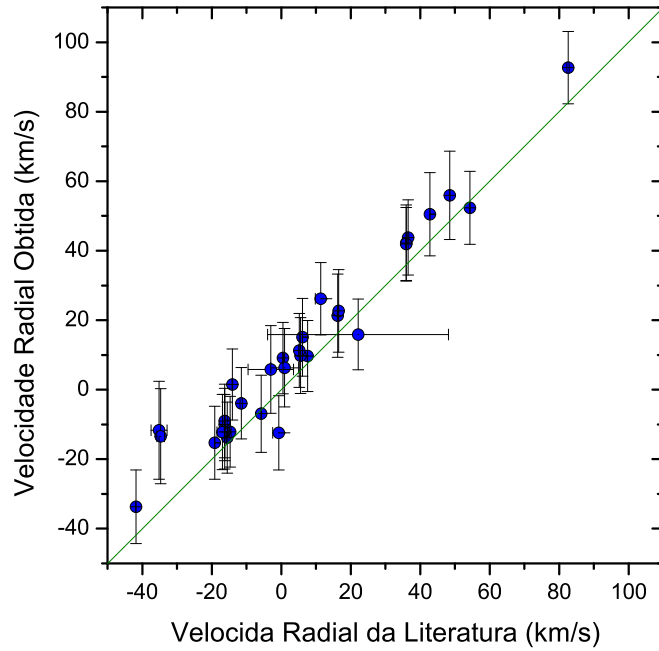


Figura 4.1: Gráfico comparando velocidades radiais para estrelas observadas em 2008 e 2014 obtidas com ajuste utilizando o espectro sintético Coelho 2014 em relação aos valores presentes na literatura.

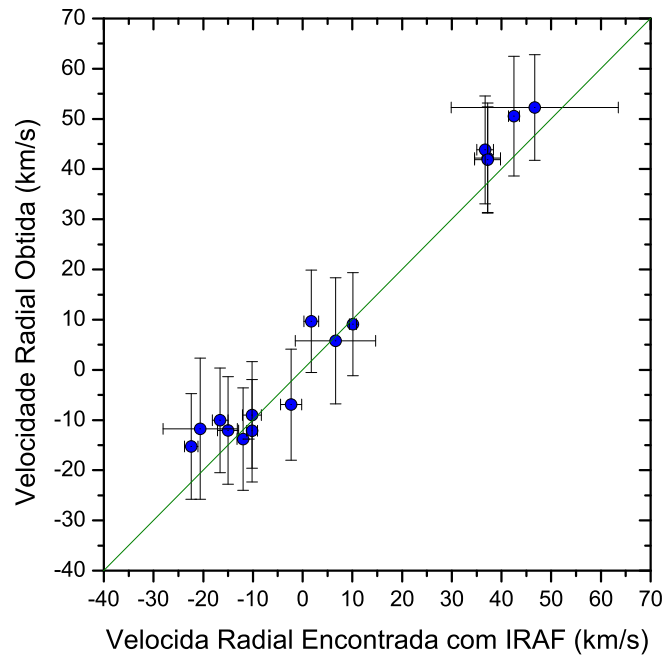


Figura 4.2: Gráfico comparando velocidades radiais para estrelas observadas em 2008 obtidas com ajuste utilizando o espectro sintético Coelho 2014 em função dos valores obtidos com a tarefa FXCOR.

### 4.1.2 Parâmetros Físicos

Com nosso código foi possível também obter, simultaneamente, os valores dos parâmetros físicos das estrelas estudadas ao ajustar cada estrela com espectros sintéticos. Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são mostrados esses resultados para as estrelas observadas em 2008 e 2014 respectivamente. Os valores de  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$  e Metalicidade foram retirados da base de dados SIMBAD<sup>1</sup>. Como para muitas estrelas foram encontradas mais de uma determinação de cada parâmetro, adotamos a média destes valores para efetuar nossa comparação. O erro adotado foi a distancia máxima entre valores dividido por dois, para se ter uma estimativa mais conservadora da variação das determinações.

Estrela	$T_{\text{eff}}$	$T_{\text{eff}}$ (Lit)	$\log(g)$	$\log(g)$ (Lit)	FE/H	FE/H (Lit)	N_FE/H (Lit)
HD115617	5750	5560	4,5	4,5	0,0	0,0	22
HD136202	6500	6107	4,5	3,9	0,2	-0,0	12
HD80170	4750	4537	3,0	2,0	0,0	-0,0	1
HD84117	6250	6081	4,5	4,2	0,0	-0,2	2
HD112164	6000	5896	4,5	3,8	0,2	0,2	5
HD126053	5500	5662	4,0	4,4	-0,5	-0,4	13
HD171391	5250	5075	3,5	3,0	0,0	-0,1	7
HD92588	5500	5152	4,5	3,7	0,0	-0,0	4

Tabela 4.3: Valores dos parâmetros físicos obtidos com código utilizando espectros sintéticos Coelho juntamente com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2008 com lambda centrado em 600nm. Onde N\_FE/H (Lit) é o número de medidas de FE/H encontrados na literatura

Para uma melhor visualização da comparação dos dados obtidos com os dados da literatura, foram feitos gráficos de comparação dos valores obtidos para  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$  e Metalicidade pelo programa com os dados da literatura para os espectros sintéticos de Coelho 2014 (Gráficos 4.3, 4.4 e 4.5).

<sup>1</sup>disponível em: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fbasic>

Estrela	Teff	Teff (Lit)	log(g)	log(g) (Lit)	FE/H	FE/H (Lit)	N_FE/H (Lit)
HD144585	5750	5853	4,0	4,2	0,2	0,3	15
HD146233	6000	5691	4,5	4,1	0,2	0,2	20
HD210302	6500	6471	4,5	4,3	0,0	0,1	3
HD217357	4250	3894	5,0	4,5	-0,5	-0,5	1
HD196761	5250	5414	4,0	4,4	-0,5	-0,3	5
HD210302	6750	6471	4,5	4,3	0,2	0,1	3
HD222368	6250	6104	4,0	4,0	-0,5	-0,2	29
HD210302	6500	6471	4,5	4,3	0,0	0,1	3
HR509	5500	5342	4,0	4,5	-0,8	-0,6	33
HR1084	5250	5085	5,0	4,5	0,0	-0,1	29
HD42807	5750	5668	4,5	4,5	0,0	-0,0	4
HD84117	6250	6081	4,5	4,2	0,0	-0,2	2
HD89707	6000	5963	4,5	4,3	-0,5	-0,4	8
HD103932	4750	4462	5,0	4,6	0,2	0,1	3
HD117176	5750	5513	4,0	3,9	0,0	-0,0	17
HD119288	7000	6513	4,5	4,1	0,0	-0,3	7

Tabela 4.4: Valores dos parâmetros físicos obtidos com código utilizando espectros sintéticos Coelho juntamente com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2014 com lambda centrado em 600nm. Onde N\_FE/H (Lit) é o número de medidas de FE/H encontrados na literatura.

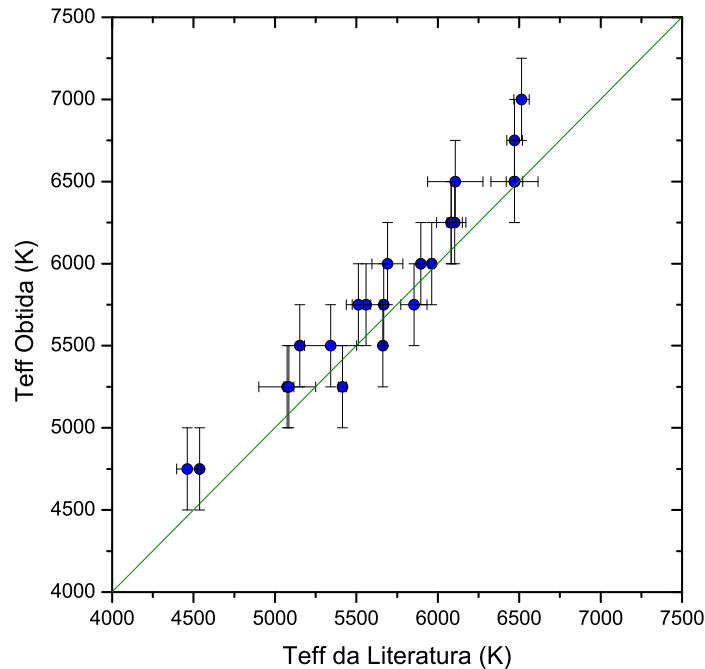


Figura 4.3: Gráfico das temperaturas encontradas utilizando espectros sintéticos Coelho em função dos valores presentes na literatura.



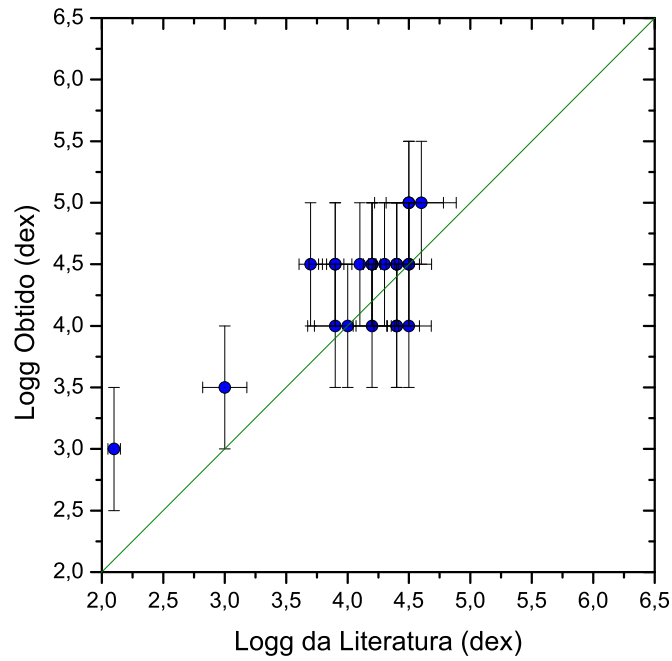


Figura 4.4: Gráfico dos valores de  $\log(g)$  encontrados utilizando espectros sintéticos Coelho em função dos valores presentes na literatura.

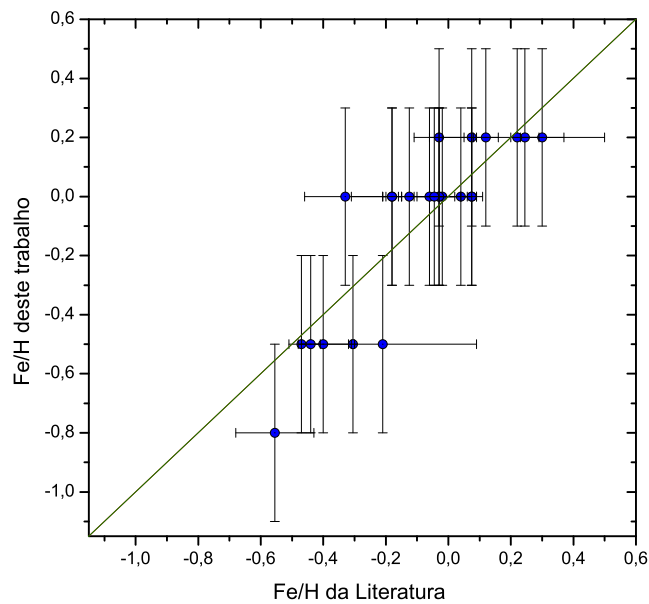


Figura 4.5: Gráfico dos valores de  $\text{Fe}/\text{H}$  encontrados utilizando espectros sintéticos Coelho em função dos valores presentes na literatura.

## 4.2 Resultados com o grid CK04

### 4.2.1 Velocidade Radial

A partir dos valores de velocidade radial obtida pelo novo código foram geradas as Tabelas 4.5 e 4.6 utilizando os espectros do grid CK04 ajustados as estrelas observadas em 2008 e 2014, respectivamente. A tabela mostra também o valor da incerteza associada a velocidade radial encontrada, os valores das velocidades radiais obtidos na literatura e os valores das velocidades radiais encontradas utilizando o FXCOR no IRAF.

Estrela	VR	$\sigma$	VR (Lit)	erro (LIT)	VR (IRAF)	erro (IRAF)
HD115617	-7,8	13,3	-5,8	0,09	-2,3	2,1
HD136202	51,6	12,7	54,3	0,1	46,7	16,8
HD80170	8,6	12,8	0,5	0,1	10,1	0,7
TYC8626-2133-1	5,8	15,5	-2,999	6,566	6,6	8,1
CPD-614103	-14,3	12,7	-15,53	0,15	-12,0	1,2
CPD-614106	-12,9	12,9	-14,71	0,29	-10,2	1,1
HD84117	41,3	13,0	35,97	0,09	37,2	2,6
HD112164	43,1	12,9	36,5	0,2	36,7	1,7
HD126053	-16,1	12,5	-19,6	0,1	-22,4	1,4
HD171391	8,7	12,6	7,59	0,05	1,7	1,5
HD92588	49,7	14,3	42,836	0,053	42,5	1,1
TYC7876-309-1	-12,9	16,7	-35,2	2,3	-20,6	7,5
HD97253	6,8	14,3	1	4	—	—
Tyc8333-1282-1	-12,9	15,7	-34,7	1,1	—	—
Tyc6540-4066-1	14,9	13,1	22,15	26,05	—	—

Tabela 4.5: Valores das velocidades radiais, em km/s, encontrados com o código utilizando espectros sintéticos CK04 comparada com valores encontrados pelo FXCOR no IRAF e com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2008 com lambda centrado em 600nm.

A partir dos dados das Tabelas 4.5 e 4.6 foi possível fazer uma comparação gráfica dos dados obtidos pelo código com dados obtidos na literatura (ver gráfico 4.6). Foi realizada também uma comparação dos dados obtidos pelo programa FXCOR no IRAF com os dados obtidos através do código desse trabalho (ver gráfico 4.7).

Estrela	VR	$\sigma$	VR (Lit)	erro (LIT)	VR (IRAF)	erro (IRAF)
HD144585	1,2	13,6	-14,04	0,09	—	—
HD146233	25,9	13,8	11,4	1,6	—	—
HD210302	-10,3	13,7	-16,23	0,09	-16,5	1,6
HD217357	21,2	14,8	16,31	0,18	—	—
HD196761	-33,8	13,9	-41,82	0,06	—	—
HD210302	-9,5	13,6	-16,23	0,09	-10,2	1,9
HIP10725	-12,4	13,8	-0,7	1,7	—	—
HD222368	9,3	13,9	5,55	0,03	—	—
HD210302	-12,6	13,9	-16,23	0,09	-15,0	2,1
HR509	-12,5	13,9	-16,9	1,6	—	—
HR1084	22,4	14,8	16,52	0,05	—	—
HD42807	15,6	14,2	5,96	0,80	—	—
HD84117	42,0	13,7	35,97	0,09	37,2	2,6
HD89707	92,2	13,8	82,6	0,3	—	—
HD103932	56,1	15,7	48,5	0,1	—	—
HD117176	11,7	13,8	5,2	0,2	—	—
HD119288	-4,8	12,9	-11,5	0,3	—	—

Tabela 4.6: Valores de velocidade radial encontrado com com código utilizando espectros sintéticos CK04 comparada com valores encontradas pelo FXCOR no IRAF e com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2014 com lambda centrado em 600nm.

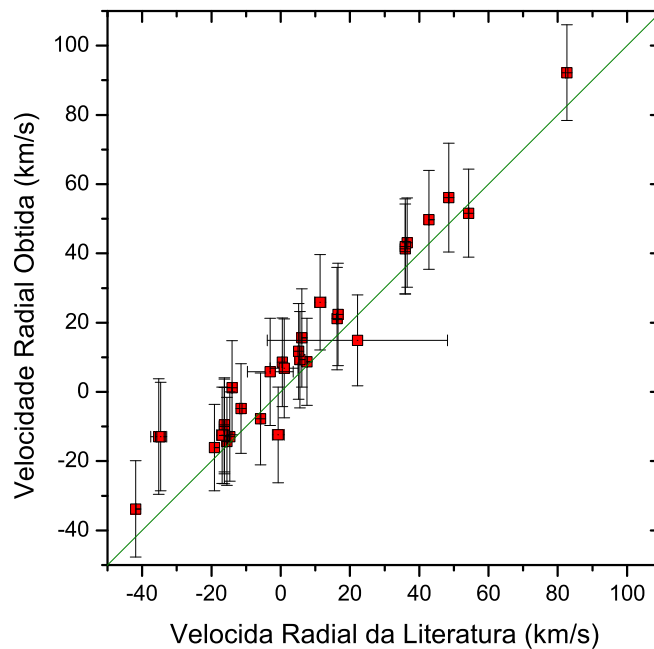


Figura 4.6: Gráfico de velocidades radiais para estrelas observadas em 2008 e 2014 utilizando o espectro sintético CK04 em função dos valores dessas velocidades presentes na literatura.

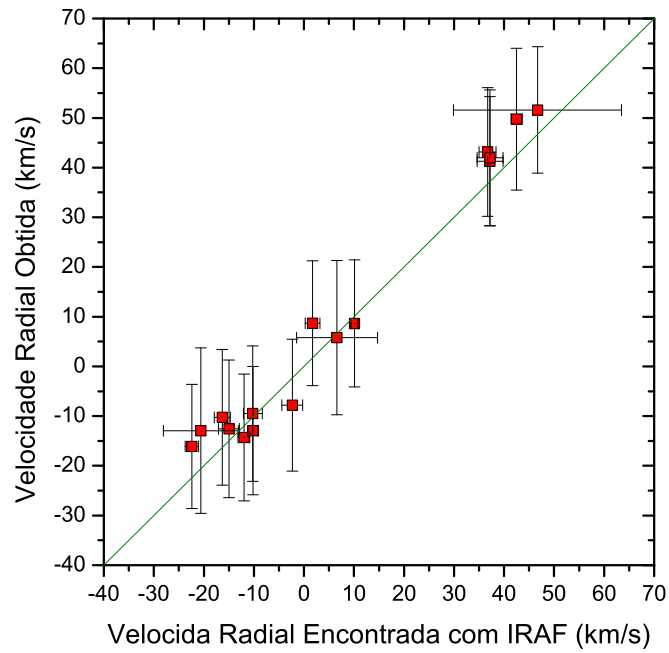


Figura 4.7: Gráfico de velocidades radiais para estrelas observadas em 2008 e 2014 utilizando o espectro sintético CK04 em função dos valores dessas velocidades obtidas pelo IRAF.

## 4.2.2 Parâmetros Físicos

Foram obtidos também os parâmetros físicos das estrelas estudadas ao comparar cada estrela com o conjunto de espectros sintéticos CK04. Nas tabelas 4.7 e 4.8 são mostrados esses resultados para as estrelas observadas respectivamente em 2008 e 2014. Os valores de  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$  e Metalicidade foram retirados do SIMBAD com mesmo critério descrito anteriormente.

Estrela	Teff	Teff (Lit)	log(g)	log(g) (Lit)	FE/H	FE/H (Lit)	N_FE/H (Lit)
HD115617	5500	5560	5,0	4,5	-0,3	0,0	22
HD136202	6000	6107	5,0	3,9	-0,2	-0,0	12
HD80170	4750	4537	3,5	2,0	-0,1	-0,0	1
HD84117	6000	6081	5,0	4,2	-0,3	-0,2	2
HD112164	6000	5896	5,0	3,8	0,0	0,2	5
HD126053	5750	5662	5,0	4,4	-0,5	-0,4	13
HD171391	5500	5075	4,5	3,0	0,0	-0,1	7
HD92588	5500	5152	5,0	3,7	-0,2	-0,0	4

Tabela 4.7: Valores dos parâmetros físicos obtidos com código utilizando espectros sintéticos Kurucz juntamente com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2008 com  $\lambda$  centrado em 600nm. Onde  $N_{\text{FE/H}}(\text{Lit})$  é o número de medidas de FE/H encontrados na literatura.

Estrela	Teff	Teff (Lit)	log(g)	log(g) (Lit)	FE/H	FE/H (Lit)	N_FE/H (Lit)
HD144585	5750	5853	5,0	4,2	0,0	0,3	15
HD146233	5750	5691	5,0	4,1	-0,2	0,2	20
HD210302	6000	6471	5,0	4,3	-0,5	0,1	3
HD217357	4000	3894	5,0	4,5	-1,0	-0,5	1
HD196761	5500	5414	5,0	4,4	-0,5	-0,3	5
HD210302	6500	6471	5,0	4,3	-0,1	0,1	3
HD222368	5500	6104	4,5	4,0	-1,0	-0,2	29
HD210302	6000	6471	5,0	4,3	-0,5	0,1	3
HR509	4750	5342	4,0	4,5	-1,5	-0,6	33
HR1084	5000	5085	5,0	4,5	-0,5	-0,1	29
HD42807	5500	5668	5,0	4,5	-0,5	-0,0	4
HD84117	5750	6081	5,0	4,2	-0,5	-0,2	2
HD89707	5500	5963	5,0	4,3	-1,0	-0,4	8
HD103932	4500	4462	5,0	4,6	-0,3	0,1	3
HD117176	5500	5513	5,0	3,9	-0,5	-0,0	17
HD119288	6500	6513	5,0	4,2	-0,5	-0,3	7

Tabela 4.8: Valores dos parâmetros físicos obtidos com código utilizando espectros sintéticos Kurucz juntamente com os valores presentes na literatura. Para dados observados em 2014 com  $\lambda$  centrado em 600nm. Onde  $N_{\text{FE/H}}(\text{Lit})$  é o número de medidas de FE/H encontrados na literatura.

Foram feitos gráficos de comparação dos valores obtidos para  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$  e Metalicidade pelo programa com os dados da literatura para os espectros sintéticos CK04 (olhar Gráficos 4.8, 4.9 e 4.10).

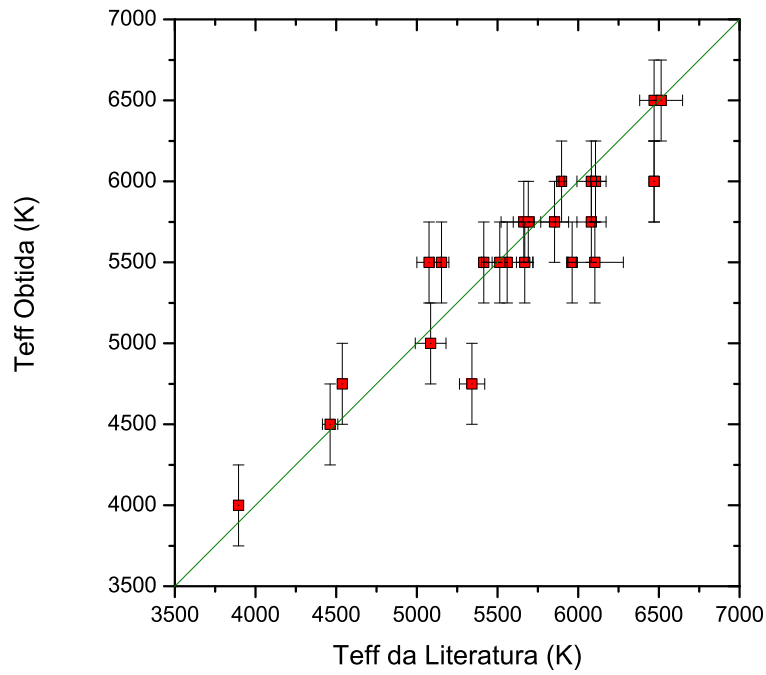


Figura 4.8: Gráfico das Temperaturas encontradas utilizando espectros sintéticos CK04 em função dos valores presentes na literatura.

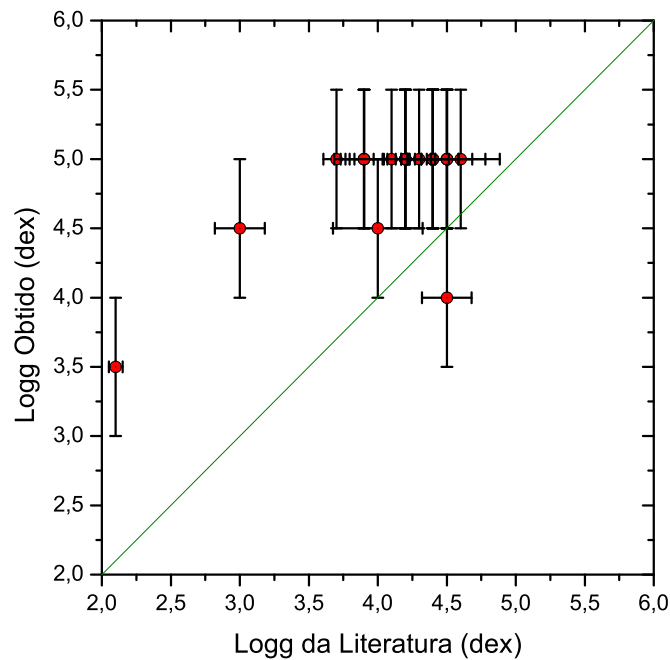


Figura 4.9: Gráfico dos valores de  $\log(g)$  encontrados utilizando espectros sintéticos CK04 em função dos valores presentes na literatura.

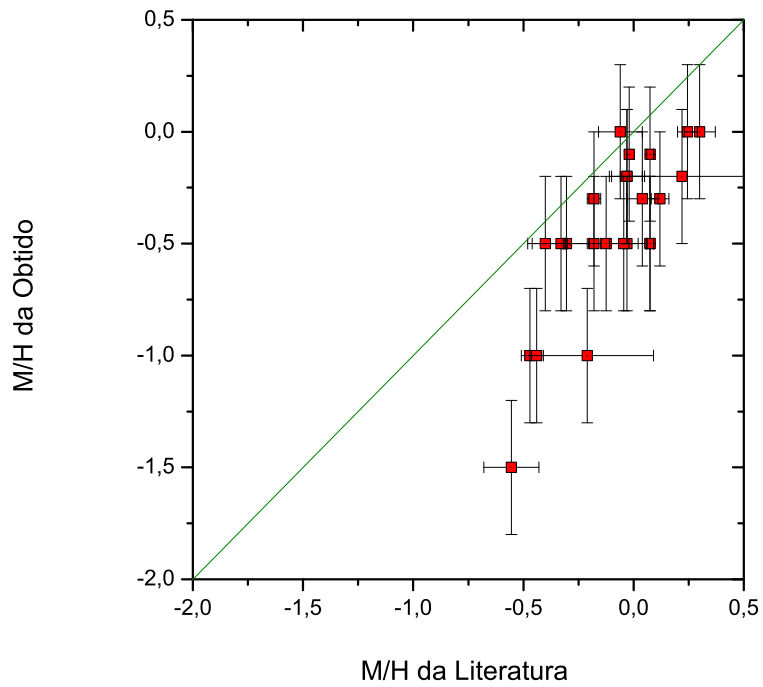


Figura 4.10: Gráfico dos valores de M/H encontrados utilizando espectros sintéticos CK04 em função dos valores presentes na literatura.

## 4.3 Comparação dos resultados obtidos pelos espectros sintéticos CK04 e Coelho 2014

### 4.3.1 Velocidade Radial

A partir dos valores de velocidade radial obtida pelo novo código foram geradas as Tabelas 4.1, 4.2 4.5 e 4.6 utilizando os espectros CK04 e Coelho 2014. O Gráfico 4.11 mostra simultaneamente os valores de velocidade radial quando utilizamos cada um desses espectros sintéticos para os ajustes.

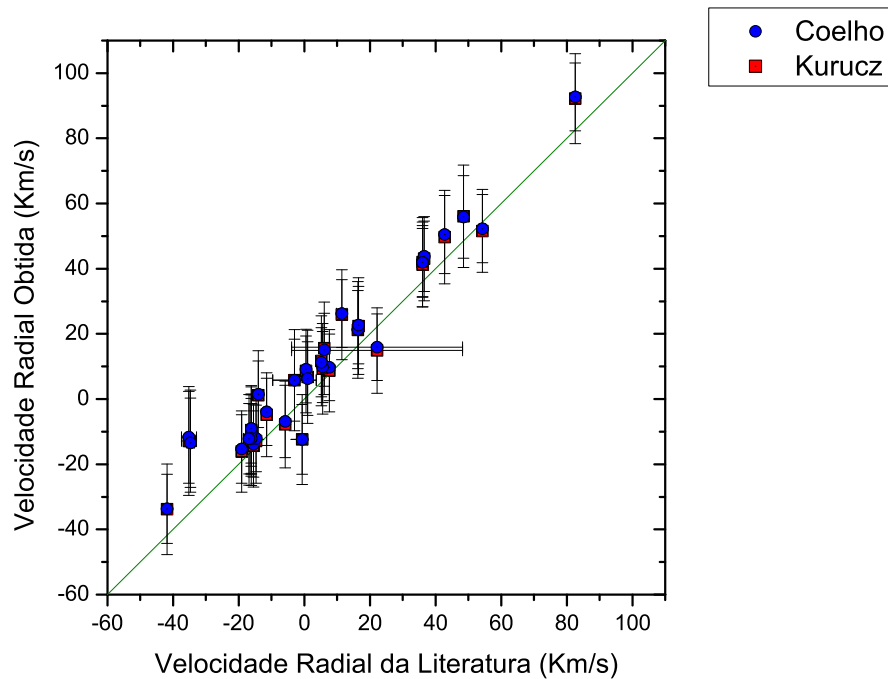


Figura 4.11: Velocidades radiais das estrelas, obtidas pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho (azul) e CK04 (vermelho).

Percebe-se que os resultados obtidos dos ajustes através dos espectros sintéticos CK04 e Coelho 2014 se mostraram coerentes para a velocidade radial das estrelas observadas. O erro aproximado de 10km/s estimado em nosso método está na mesma ordem da resolução espectral da configuração instrumental utilizada.



### 4.3.2 Parâmetros Físicos

Os resultados dos parâmetros físicos obtidos pelos ajustes usando os dois grids de espectros sintéticos podem ser vistos nas Tabelas 4.3, 4.4, 4.7 e 4.8. Os Gráficos 4.12, 4.13 e 4.14 mostram a comparação dos parâmetros físicos obtidos pelo ajuste as estrelas observadas usando os espectros sintéticos CK04 e Coelho 2014.

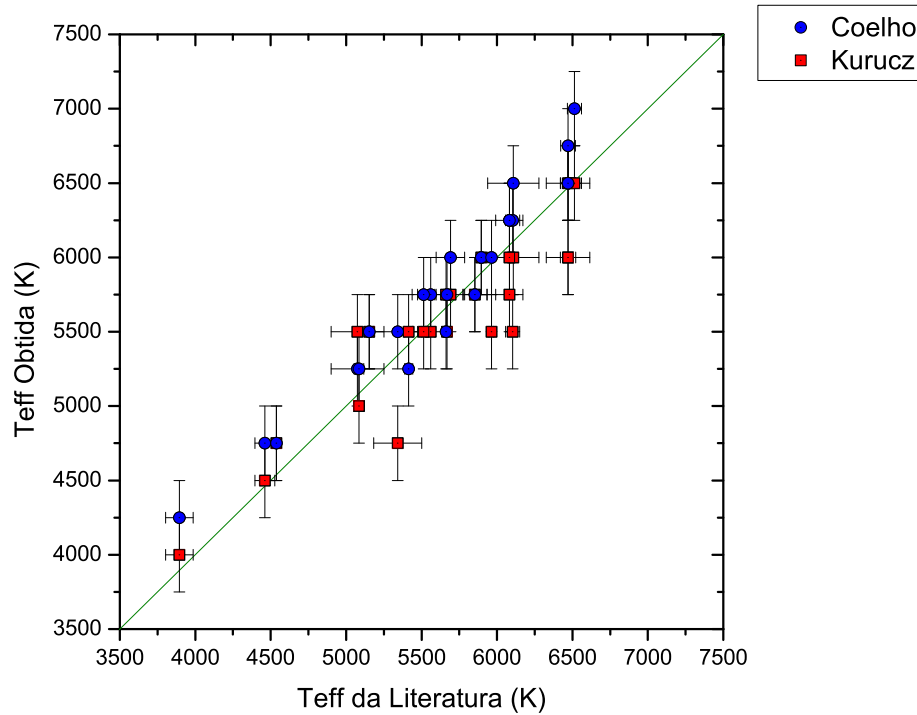


Figura 4.12: Temperatura efetiva das estrelas, obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho).

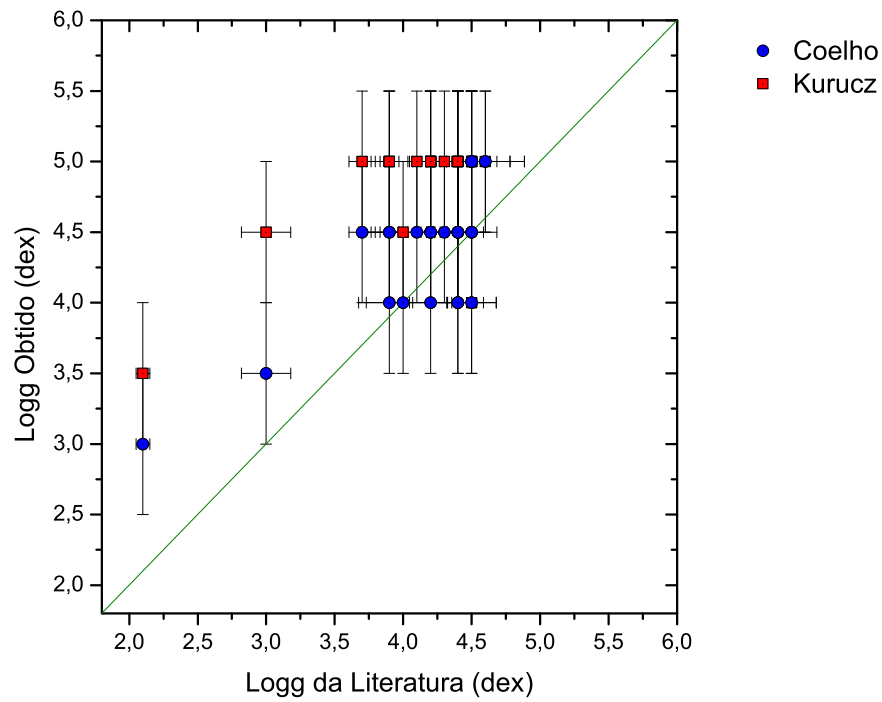


Figura 4.13: Gravidade de superfície das estrelas, obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho).

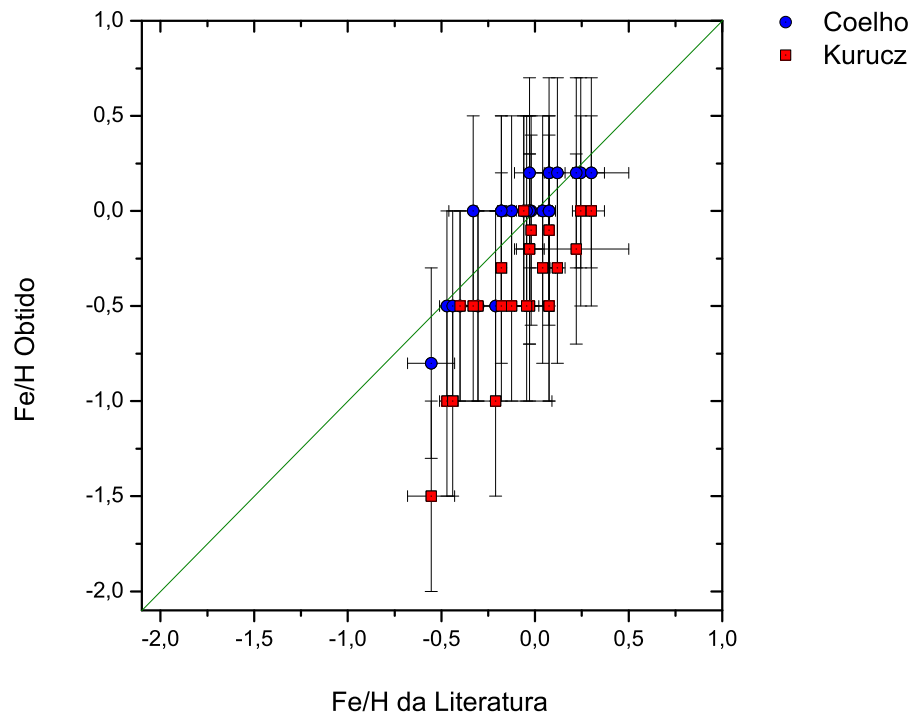


Figura 4.14: Metalicidade das estrelas, obtidos pelo código ao utilizar os espectros sintéticos Coelho 2014 (azul) e CK04 (vermelho).

Algumas Considerações sobre os ajustes obtidos para valores dos parâmetros físicos:

- Tanto nas Tabelas 4.3, 4.4, 4.7 e 4.8 quanto no Gráfico 4.12, 4.13 e 4.14 verificou-se que os resultados obtidos pelo nosso método estão próximos dos resultados presentes na literatura, sendo que os espectros ajustados com o grid de Coelho 2014 se mostraram com uma melhor aproximação da reta identidade em todos os Gráficos.

- Para os dados de Temperatura efetiva foi verificado que o resultado obtido do espectro ajustado com o grid de Coelho 2014 se aproximam mais da reta, porém aparentam um leve erro sistemático com relação aos valores da literatura. Uma hipótese para esse erro pode ser discrepâncias no processo de convolução dos dados do espectro sintético, necessários para que este se aproxime melhor do espectro observado. A convolução faz com que o pico das linhas no espectro sintético variem um pouco. Como o pico das linhas está relacionado com a temperatura da estrela isso provavelmente levou a um aumento nas respostas obtidas pelo nosso ajuste. Porém considerando um erro de 250K os dados aparentam estar com valores consideravelmente bons.

- Percebe-se que uma estrela está bem afastada da reta, seu valor possui uma variação discrepante dos valores obtidos nesse trabalho. Porém, o autor que obteve o valor de  $\log(g)$  para essa estrela, utilizou uma técnica para obtenção dos parâmetros físicos por fotometria o que possui uma precisão muito menor. Outra característica importante, é que os melhores valores para  $\log(g)$  obtidos pelo CK04 foram quase os mesmos (5,0 dex) enquanto os da Coelho (2014) acompanham melhor a reta identidade.

- Os valores de Metalicidade obtidos pelo ajuste com o grid de Coelho 2014 foram próximos dos valores da literatura, sendo visivelmente melhores que os resultados obtidos pelo ajuste com o grid CK04. Por este motivo, todos os resultados apresentados nos capítulos seguintes adotarão o grid Coelho 2014 como base para os ajustes.

Os resultados mostrados neste capítulo nos levam a concluir que o método é eficiente para encontrar a velocidade radial e parâmetros físicos de estrelas utilizando ajuste de espectros sintéticos a dados espectroscópicos.

No capítulo seguinte aplicamos a técnica acima aos dados observacionais obtidos para estrelas membros de aglomerados abertos.

# Capítulo 5

## Resultados

No capítulo anterior mostramos que nosso programa é eficiente para a determinação de velocidades radiais e parâmetros físicos de estrelas, em especial para o conjunto de espectros padrões observados. Podemos assim aplicar o método para obtenção dos parâmetros de um conjunto de estrelas observadas previamente determinadas como membros de aglomerados abertos.

Pela comparação realizada no Capítulo 4, verificamos que o grid de Coelho 2014 produziu os melhores resultados quando comparamos com os dados presentes na literatura. Assim, os resultados presentes nesse capítulo foram obtidos utilizando a biblioteca Coelho 2014.

### 5.1 Resultados para os aglomerados abertos

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentadas as velocidades radiais e os parâmetros físicos de estrelas e os respectivos aglomerados abertos aos quais pertencem. Os erros associados a cada medida foram determinados na mesma maneira que no capítulo anterior.

<b>Estrela</b>	<b>VR</b>	<b>Teff</b>	<b>log(g)</b>	<b>Fe/H</b>	<b>Aglomerado</b>	<b>Anexo</b>
HD115617	-6,9	5750	4,5	0,0	—	A7
HD136202	52,3	6500	4,5	0,2	—	A12
HD80170	9,1	4750	3,0	0,0	—	A28
TYC8626-2133-1	5,8	6000	5,0	-1,0	Trumpler 15	A51
CPD-614103	-13,8	4750	3,0	0,2	NGC 5316	A1
CPD-614106	-12,1	5000	3,0	0,2	NGC 5316	A3
HD84117a	42,2	6250	4,5	0,0	—	A29
HIP80574	-8,9	21000	3,5	0,0	NGC 6124	A36
TYC470-696-1	-15,5	6250	5,0	-1,0	—	A39
TYC7857-119-1	-3,0	8250	4,5	-0,5	NGC6124	A45
TYC9009-1370-1	-30,8	4500	2,5	0,0	Lynga 1	A53
HD309461a	22,7	4750	3,0	0,0	NGC 4052	A25
HD120494	-32,2	3400	1,0	-0,5	NGC 5316	A10
TYC7857-895-1	-2,9	8250	4,5	-0,5	NGC 6124	A46
TYC7674-2589-1	10,3	6250	4,5	-0,5	—	A44
TYC7674-2085-1	33,5	6250	5,0	-1,0	Pismis 4	A43
TYC7380-959-1	-11,2	6250	5,0	-1,0	Trumpler 28	A42
HD112164	43,8	6000	4,5	0,2	—	A6
HD126053	-15,3	5500	4,0	-0,5	—	A11
HD171391	9,7	5250	3,5	0,0	—	A17
HD92588	50,5	5500	4,5	0,0	—	A33
TYC7876-309-1	-11,7	6000	5,0	-1,0	NGC 6231	A49
HD97253	6,3	6000	5,0	-1,0	Hogg 10	A34
HD87435	21,5	6250	4,5	0,2	Loden 28	A31
TYC8685-69-1	-9,9	6000	5,0	-1,0	NGC 5823	A52
TYC8333-1282-1	-13,4	5750	5,0	-1,0	NGC 6167	A50
TYC7876-2443-1	-6,1	5750	5,0	-1,0	—	A48
TYC7872-2044-1	-3,4	5500	5,0	-1,0	Trumpler 24	A47
TYC6540-4066-1	15,9	5000	3,0	-0,5	—	A41
TYC5408-2011-1	32,2	5000	3,5	-0,5	—	A40
HD309461b	25,0	5000	3,5	0,0	NGC 4052	A26
HD300814	11,2	6250	5,0	-1,0	Loden 112	A24
HD147824	1,5	8750	4,5	0,0	NGC 6124	A15

Tabela 5.1: Valores de velocidades radiais e parâmetros físicos encontrados com código utilizando espectros sintéticos Coelho 2014 com os respectivos aglomerados abertos a qual pertencem essas estrelas. Estrelas observadas em 2008.

Para os aglomerados que foram realizadas observações de mais de uma estrela, calculamos os valores médios para os parâmetros dessas estrelas e os erros associados foram obtidos utilizando a propagação de erros na forma usual. Nas Tabelas 5.3 e 5.4 apresentamos os resultados de velocidade radial e metalicidade para aglomerados que possuem dados presentes na literatura. Os valores da literatura apresentados nas tabelas foram retirados do catálogo (DALM2002) (Dias et al., 2002).

<b>Estrela</b>	<b>VR</b>	<b>Teff</b>	<b>log(g)</b>	<b>Fe/H</b>	<b>Aglomerado</b>	<b>Anexo</b>
HD144585	1,5	5750	4,0	0,2	—	A13
HD146233	26,2	6000	4,5	0,2	—	A14
HD161408	-1,6	4000	1,5	-0,5	Collinder 347	A16
GSC06842-01276	7,3	5500	4,5	-1,0	Bochum 14	A4
HD210302a	-10,7	6500	4,5	0,0	—	A19
HD217357	21,3	4250	5,0	-0,5	—	A22
HD196761	-33,7	5250	4,0	-0,5	—	A18
HD210302b	-9,0	6750	4,5	0,2	—	A20
CD2313793	5,4	6250	5,0	-1,0	Bochum 14	A2
HIP10725	-12,4	6000	4,5	0,0	—	A35
HD222368	9,8	6250	4,0	-0,5	—	A23
HD210302c	-12,1	6500	4,5	0,0	—	A21
HR509	-12,2	5500	4,0	-0,8	—	A38
HR1084	22,7	5250	5,0	0,0	—	A37
HD42807	15,1	5750	4,5	0,0	—	A27
UCAC4-253-028553	29,9	8500	4,5	-0,5	Pismis 5	A54
HD84117b	41,9	6250	4,5	0,0	—	A30
HD89707	92,7	6000	4,5	-0,5	—	A32
HD103932	55,9	4750	5,0	0,2	—	A5
HD117176	11,3	5750	4,0	0,0	—	A8
HD119288	-3,9	7000	4,5	0,0	—	A9

Tabela 5.2: Valores de velocidades radiais e parâmetros físicos encontrados com código utilizando espectros sintéticos Coelho 2014 com os respectivos aglomerados abertos a qual pertencem essas estrelas. Estrelas observadas em 2014.

<b>Aglomerado</b>	<b>VR</b>	<b>Erro_VR</b>	<b>N_Est</b>	<b>VR_Lit</b>	<b>Erro_VR(lit)</b>	<b>N_Est_Lit</b>
Trumpler 15	5,8	12,6	1	-15,06	4,05	2
NGC 5316	-19,4	11,1	3	-15,10	0,28	4
NGC 6124	-3,3	4,3	4	-21,07	0,19	8
Lynga 1	-30,8	10,3	1	-24,31	0,52	6
Pismis 4	33,5	13,2	1	30,00	5,00	1
Trumpler 28	-11,2	11,4	1	7,0	—	1
NGC 6231	-11,7	14,1	1	-27,54	2,65	10
Hogg 10	6,3	11,3	1	1,0	4,0	—
NGC 5823	-9,9	13,3	1	-19,27	0,18	1
NGC 6167	-13,4	13,7	1	-21,32	0,41	5
Trumpler 24	-3,4	15,9	1	-3,45	5,42	6

Tabela 5.3: Valores da Velocidade Radial encontrada. As velocidades estão em Km/s e N\_Est é o número de estrelas observadas para cada aglomerado.

Aglomerado	Fe/H	Erro_Fe/H	N_Est	Fe/H_Lit	Erro_Fe/H(lit)	N_Est_Lit
NGC 5316	0,0	0,3	3	-0,02	—	—
Lynga 1	0,0	0,3	1	0,040	0,010	—
Pismis 4	-1,0	0,3	1	-0,2	—	—
Trumpler 28	-1,0	0,3	1	0,326	0,110	1

Tabela 5.4: Valores da Metalicidade encontrada e valores da literatura retirados do catálogo DALM2014, onde **N\_Est** o número de estrelas observadas para cada aglomerado.

Os gráficos 5.1 e 5.2 mostram os valores das velocidades radiais e metalicidades obtidos nesse trabalho comparados com os valores presentes na literatura para os aglomerados que deles dispunham.

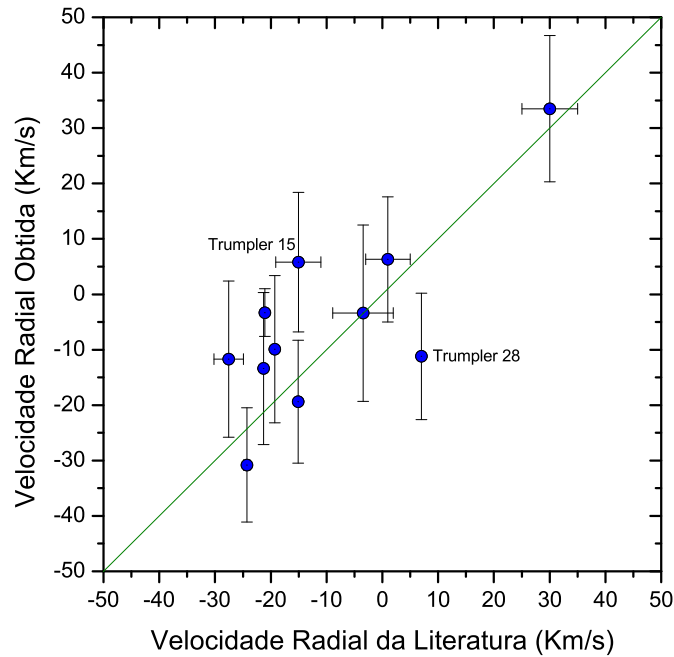


Figura 5.1: Velocidades radiais dos aglomerados obtidas pelo nosso método comparadas com valores presentes na literatura.

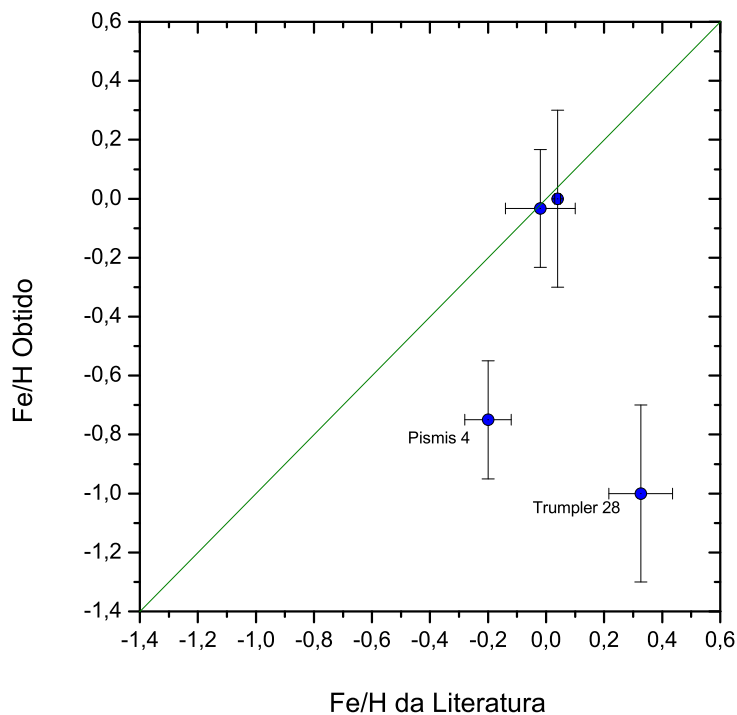


Figura 5.2: Metalicidade dos aglomerados obtidas pelo nosso método comparadas com valores presentes na literatura.

O gráfico 5.1 mostra um bom acordo dos dados obtidos por esse trabalho com os dados da literatura disponíveis. Dois aglomerados, Trumpler 15 e Trumpler 28 apresentaram uma divergência pouco maior que os demais. Para as estrelas desses aglomerados verifica-se que isso se deve a qualidade dos dados observados como mostrado nas figuras A51 e A42 onde é possível observar um baixo sinal ruído e poucas linhas identificadas. A discrepância aparece também quando avaliamos a metalicidade (ver Gráfico 5.2), onde o aglomerado Trumpler 28 visivelmente ficou distante da linha identidade. O Aglomerado Pismis 4 também apresentou um desvio significativo da reta identidade. Assim como no caso anterior, observa-se no ajuste do espectro sintético (Figura A43) que o programa não conseguiu obter um bom ajuste devido a baixa razão sinal-ruído presente nos espectros observados.

Os resultados acima mostram que o programa é eficiente para obtenção das velocidades radiais e dos parâmetros físicos de estrelas. Isso possibilita a obtenção de velocidades radiais e metalicidades para aglomerados abertos de maneira eficiente.



## 5.2 Resultados Inéditos.

Na seção anterior mostramos a aplicação do método desenvolvido a determinação de velocidades radiais e metalicidades para estrelas membros de aglomerados abertos que foram observadas em duas missões em 2008 e 2014. Em particular mostramos a concordância de resultados por nós obtidos com valores previamente determinados obtidos da literatura. Os dados foram obtidos com o intuito de obter uma verificação adicional da eficiência do método em obter estes parâmetros em aglomerados.

Nas missões observacionais de 2008 e 2014 também foi possível obter dados espectroscópicos para um conjunto de estrelas membros de aglomerados para os quais não haviam na literatura valores de velocidade radial ou metalicidade. Com isso foi possível obter resultados inéditos para valores de velocidade radial de 6 aglomerados abertos e da metalicidade de 13 aglomerados abertos. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.5. Os resultados serão incluídos futuramente no catálogo de aglomerados abertos DALM2002.

<b>Aglomerado</b>	<b>VR</b>	<b>Erro_VR</b>	<b>Fe/H</b>	<b>Erro_Fe/H</b>	<b>N_Est</b>
Trumpler 15	5,8	12,6	-1,0*	0,3	1
NGC 6124	-3,3	4,3	-0,3*	0,2	4
NGC 4052	23,9*	1,6	0,0*	0,2	2
NGC 6231	-11,7	14,1	-1,0*	0,3	1
Hogg 10	6,3	11,3	-1,0*	0,3	1
Loden 28	21,5*	11,3	0,2*	0,3	1
NGC 5823	-9,9	13,3	-1,0*	0,3	1
NGC 6167	-13,4	13,7	-1,0*	0,3	1
Trumpler 24	-3,4	15,9	-1,0*	0,3	1
Loden 112	11,2*	10,6	-1,0*	0,3	1
Collinder 347	-1,6*	9,5	-0,5*	0,3	1
Bochum 14	6,3*	1,4	-1,0*	0,2	2
Pismis 5	29,9*	11,2	-0,5*	0,3	1

Tabela 5.5: Valores da velocidade radial e Metalicidade encontrados, (\*) representam valores inéditos para esses aglomerados abertos.

# Capítulo 6

## Conclusão

Na presente Dissertação, foram apresentados os resultados obtidos a partir de dados observados de espectroscopia de alta resolução para velocidades radiais e Metalicidade de aglomerados abertos utilizando ajustes de espectros sintéticos aos dados observados. Descrevemos em detalhes as missões observacionais assim como o processo de redução dos dados de espectroscopia obtidos com o espectrógrafo Coude no telescópio de 1,60m do Observatório do Pico dos Dias. O método de ajuste de espectros sintéticos a partir de grids teóricos desenvolvido por nós foi apresentado em detalhes e validado cuidadosamente com base na comparação com valores obtidos da literatura. Em particular foi realizada uma comparação com o método usual de obtenção de velocidades radiais utilizando a correlação cruzada de espectros de estrelas de estudo e padrões de velocidade utilizando a task FXCOR no IRAF, onde verificou-se que os resultados obtidos por nosso método estão em acordo com os valores da literatura.

Para a validação do método foram utilizados dois grids de espectros sintéticos, CK04 e Coelho 2014, onde valores de velocidade radiais e parâmetros físicos estelares foram comparados com determinações prévias obtidas da literatura. Os resultados mostraram que o método foi eficiente em obter valores de velocidades radiais e parâmetros físicos para estrelas de um modo geral. Os resultados mostraram discrepâncias nos resultados obtidos para  $\log(g)$  e metalicidade quando comparamos os valores obtidos com o grid de CK04 e Coelho 2014. As discrepâncias são possivelmente resultado de diferenças nas listas de linhas utilizadas para geração dos respectivos grids, aspecto este que não foi avaliado em detalhe no presente trabalho. Baseado no melhor acordo com valores da literatura, o grid Coelho 2014 foi então adotado para o restante do trabalho no que diz respeito a

determinação de velocidades radiais e metalicidades de aglomerados abertos.

Com os dados observacionais apresentados foi possível obter resultados de 17 aglomerados sendo inéditos para valores de velocidade radial de 6 aglomerados abertos e de Metalicidade de 13 aglomerados abertos. Os valores para estes parâmetros, de aglomerados para os quais estes dados foram encontrados na literatura, foram também comparados e se mostraram no geral em acordo, a menos de três casos para os quais determinamos que um mal ajuste dos dados foi resultado de baixa razão sinal ruído dos espectros observados. Os dados inéditos são uma contribuição importante para o catálogo de aglomerados abertos DALM2002 que possuem vários objetos para os quais estes parâmetros não foram ainda determinados.

## 6.1 Perspectivas Futuras

O método de ajuste de espectros apresentado é o primeiro passo no desenvolvimento de uma ferramenta robusta para a determinação de parâmetros estelares. Os próximos passos para o desenvolvimento da ferramenta são basicamente no sentido de melhorar a resolução do grid utilizado. Em particular pretendemos implementar métodos de interpolação que permitam um maior refinamento dos parâmetros estelares, em particular  $\log(g)$ . O refinamento do grid levará a uma melhor determinação dos parâmetros estelares. Outras melhorias importantes a serem exploradas são outras formas de determinação da qualidade do ajuste e maneiras mais eficientes de dar mais peso a faixas do espectro com linhas onde se tem melhor razão sinal ruído.

Um aspecto interessante que necessita de um estudo mais aprofundado é a indicação de que com este método pode-se obter velocidades radiais utilizando espectroscopia de média-alta resolução através de observações com espectrógrafos Cassegrain. Caso se verifique essa possibilidade, poderíamos ter um aumento significativo na eficiência de obtenção de velocidades radiais de estrelas de aglomerados abertos visto que um dos principais fatores limitantes é a dificuldade de obtenção de espectros com alta razão sinal ruído utilizando espectrógrafos do tipo Coudé.

O método será aplicado em outros dados obtidos pelo grupo e já reduzidos, em missões realizadas nos anos 2001, 2003, 2007 e 2008 e dados obtidos no ESO observados em 2002, totalizando mais de 30 aglomerados a serem estudados.

É interessante ressaltar ainda que o método desenvolvido no presente trabalho não se limita a obtenção de parâmetros para aglomerados abertos e pode contribuir efetivamente em outras áreas da astrofísica, onde a determinação de parâmetros estelares é importante. Como todo o processo de ajuste é automatizado e requer pouca intervenção do usuário, pode-se obter parâmetros para uma grande quantidade de objetos com pouco desperdício de tempo.

Outros objetivos interessantes seriam testar outras bibliotecas sintéticas e verificar discrepâncias entre elas, visto que o método de ajuste seria o mesmo para ambas. Esse tipo de análise pode ser relevante no estudo e validação de modelos teóricos de estrutura e evolução estelar.

# Bibliografia

M51 as recorded by Lord Rosse, 1845 <<http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/groundup/lesson/basics/g44/>>, Página visitada em 15 de maio de 2014

Battinelli, P. and Capuzzo-Dolcetta, R., Formation and evolutionary properties of the galactic open cluster system, *M.N.R.A.S.*, **249**, 76-83, 1991.

Benjamin, R. A; Churchwell, E., Babler; B. L. Indebetouw, R.; Meade, M. R.; Whitney, B. A.; Watson, C.; Wolfire, M. G.; Wolff, M. J.; Ignace, R.; Bania, T. M.; Bracker, S.; Clemens, D. P.; Chomiuk, L.; Cohen, M.; Dickey, J. M.; Jackson, J. M.; Kobulnicky, H. A.; Mercer, E. P.; Mathis, J. S.; Stolovy, S. R.; Uzpen, S. R., First glimpse results on the stellar structure of the galaxy, *ApJ*, **630**, L149, 2005.

Baranne, A.; Mayor, M.; Poncet, J. L., *Vistas Astron*, 23, 279, 1979.

S. van den Bergh; R. D. McClure, Galactic Distribution of the Oldest Open Clusters, *AA*, 88, 360-362, 1979.

Castelli, F., & Kurucz, R. L. 2004, arXiv:astro-ph/0405087

Coelho, P. R. T. A new library of theoretical stellar spectra with scaled-solar and  $\alpha$ -enhanced mixtures, *MNRAS*, v. **440**, p. 1027-1043, 2014.

Conrad, C.; Scholz, R. -D.; Kharchenko, N. V. et al., A RAVE investigation on Galactic open clusters, *AA*, **526**, A54, 2014.

Combes, F.; Boissé, P.; Mazure, A. Blanchard, A., *Galaxies Cosmology*, AA Library, Springer , P. 447, 1999.

Dias, W. S.; Boczko, R.; Camargo, J. B. I., et al., Proper motion and membership determination in the young open cluster NGC 1662, *A&A*, **357**, 149, 2000.

- Dias, W. S.; Lépine, J. R. D.; Alessi, B. S., Proper motions of open clusters based on the TYCHO2 Catalogue, *ApJ*, **388**, 168, 2002.
- Dias, W. S.; Alessi, B. S. ; Moitinho, A.; Lépine, J. R. D., New catalogue of optically visible open clusters and candidates, *AA*, **389**, 871, 2002b.
- Dias, W. S.; Monteiro, H. ; Caetano. T. C.; Lépine, J. R. D.; Assafin, M.; Oliveira, A. F., Proper motions of the optically visible open clusters based on the UCAC4 catalog, *AA*, **564**, A79, 2014.
- Dias W. S.; Lépine J. R. D., Direct determination of the spiral pattern rotation speed of the Galaxy, *ApJ*, **629**, 825, 2005.
- Dravins, D.; Gullberg, D.; Lindegren, L.; Madsen S., Astrometric versus Spectroscopic Radial Velocities *ASP Conf.*, Ser. 185, IAU Coll., 170, 41, 1999a.
- Dravins D.; Lindegren, L.; Madsen S., Astrometric radial velocities I. Non-spectroscopic methods for measuring stellar radial velocity *AA*, pp 1040-1051, 1999b.
- Friel, E. D., Janes, K. A., Metallicities and radial velocities of old open clusters, *A&A*, **267**, 75-91, 1997.
- Gray, R. O., Corbally, C. J., The calibration of MK spectral classes using spectral synthesis. 1: The effective temperature calibration of dwarf stars, *AJ*, **107**, 742, 1994.
- Hearnshaw J. B. , The analysis of starlight: two centuries of astronomical spectroscopy, Cambridge University Press, New York, 2004.
- Herschel W., Philosophical Transactions Series I, **75:213**, 1785.
- Kharchenko, N. V.; Piskunov A. E.; Röser S.; Schilbach E.; Scholz R.-D., Astrophysical parameters of Galactic open clusters *AA*, 436, pp 1163-1173, 2005.
- Lépine, J. R. D., A via láctea: nossa ilha no universo., Edusp, 283p. 2008.
- Lin C. C., Shu F. H., On the spiral structure of disk Galaxies, *ApJ*, 140, 646. 1964.
- Martins, L. P., & Coelho, P. 2007, MNRAS, 381, 1329
- Monteiro, H., Dias, W. S., The possibility of determining open-cluster parameters from photometry, *A&A*, **530**, A91

- Nishiyama, S.; Nagata, T.; Sato, S.; Kato, D.; Nagayama, T.; Kusakabe, N.; Matsunaga, N.; Naio, T.; Sugitani, K.; Tamura, M., The distance to the galactic center derived from infrared photometry of bulge red clump stars, *ApJ*, 647, 1093. 2006.
- Nilakshi S. R.; Pandey A. K.; Mohan V., A study of spatial structure of galactic open star clusters, *AA*, 383, 153. 2002.
- Oliveira Filho, K. S. Saraiva, M. F. O., *Astronomia e astrofísica*, 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Livraria da Física , P. 557, 2004.
- Saito, R. K.; Zoccali, M., McWilliam, A., Mapping the X-Shaped Milky Way Bulge, *AJ*, 142, 76, 2011.
- Schneider, S. E. Arny, T. T., *Pathways to Astronomy*, Publisher: McGraw-Hill Companies , P. 809, 2009.
- Shapley, H., *Star Clusters*, Publisher: Osmania University Library, p. 276, 1930
- Smalley B. Teff and logg determinations, *Mem. Soc. Astron. Ital. Suppl.*, 8, 130, 2005
- M. Steinmetz, T.; Zwitter,; A. Siebert; et al. THE RADIAL VELOCITY EXPERIMENT (RAVE): FIRST DATA RELEASE, *AJ*, 132: 1645-1668, 2006
- Tonry, J. and Davis, M., A survey of galaxy redshifts. I - Data reduction techniques, *AJ*, 84, 1511, 1979.
- Trumpler, H., Preliminary results on the distences, dimensions and space distribution of open star clusters, *Lick Obs. Bull No.*, 420, 154, 1930
- Urquhart, J. S.; Figura, C. C.; Moore, T. J. T.; Hoare, M. G.; Lumsden, S. L.; Mottram, J. C.; Thompson, M. A.; Oudmaijer, R. D., The RMS survey: galactic distribution of massive star formation, *M.N.R.A.S* , Vol. 437 1791-1807, 2013.
- Wuensche, C. A., *GALÁXIAS*, In: Milone, A. C., *Introdução à astronomia e astrofísica*, INPE, São José dos Campos, 2003, P. 197-229.
- Wiessinger, S. Series: Astrophysics Visualizations 11118, <  
<http://www.nasa.gov/press/2014/january/nasas-swift-catches-x-ray-action-at-milky-ways-center>>, Página visitada em 16 de abril de 2014

Zwitter, T.; Castelli, F.; Munari, U., An extensive library of synthetic spectra covering the far red, RAVE and GAIA wavelength ranges, *AA*, 417, 1055 , 2004



## Anexo - Gráficos dos Espectros

Gráfico finais utilizando os espectros Coelho para todas as 54 estrelas observadas e ajustados os melhores espectros sintéticos. Os gráficos estão na escala de fluxo normalizado por comprimento de onda em angstroms. Ao lado de cada gráfico temos seu resíduo, alguns resíduos passam a informação de uma variação de fluxo considerável nas extremidades dos espectros, porém essa região não foi computada no código, sendo que 25 angstroms em cada extremidade não eram utilizados para os cálculos de comparação dos espectros.

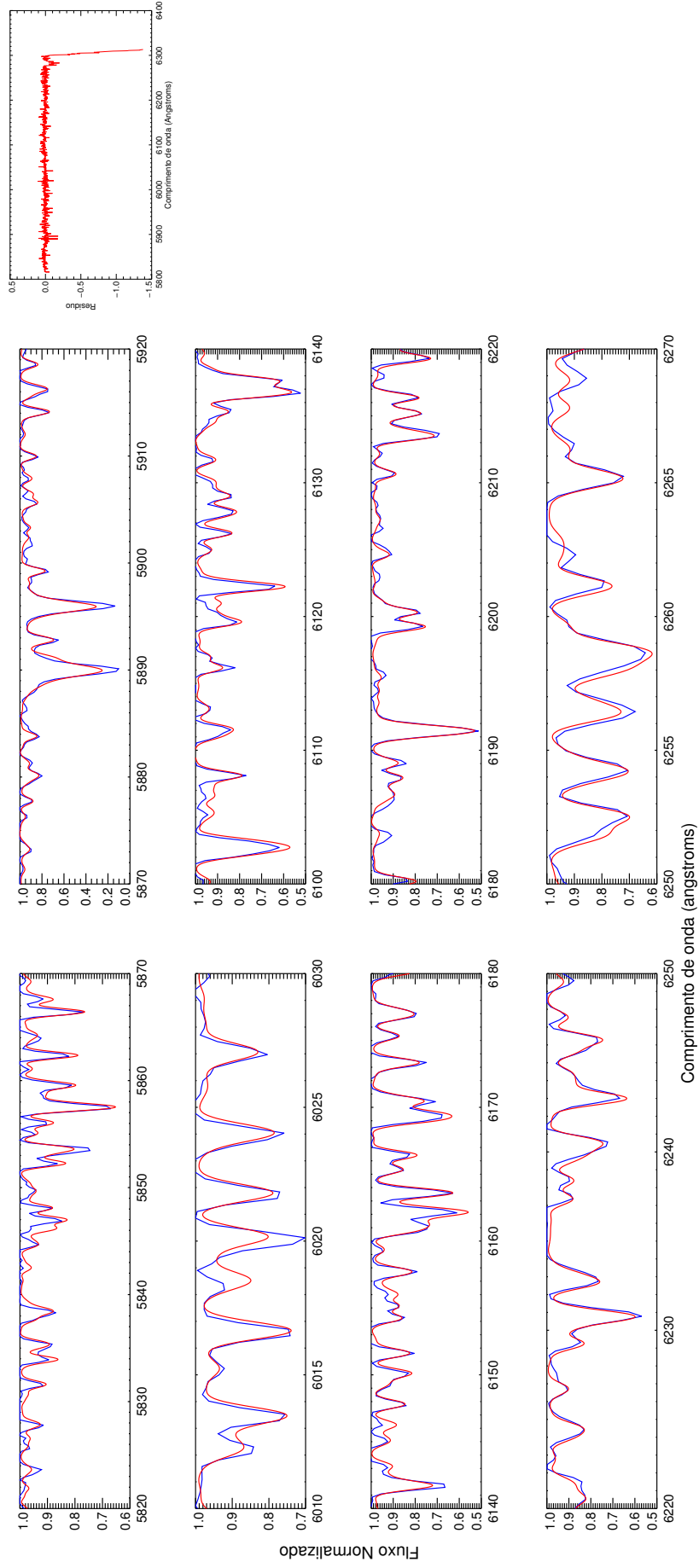


Figura A1: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela CPD-614103 com seu respectivo resíduo.

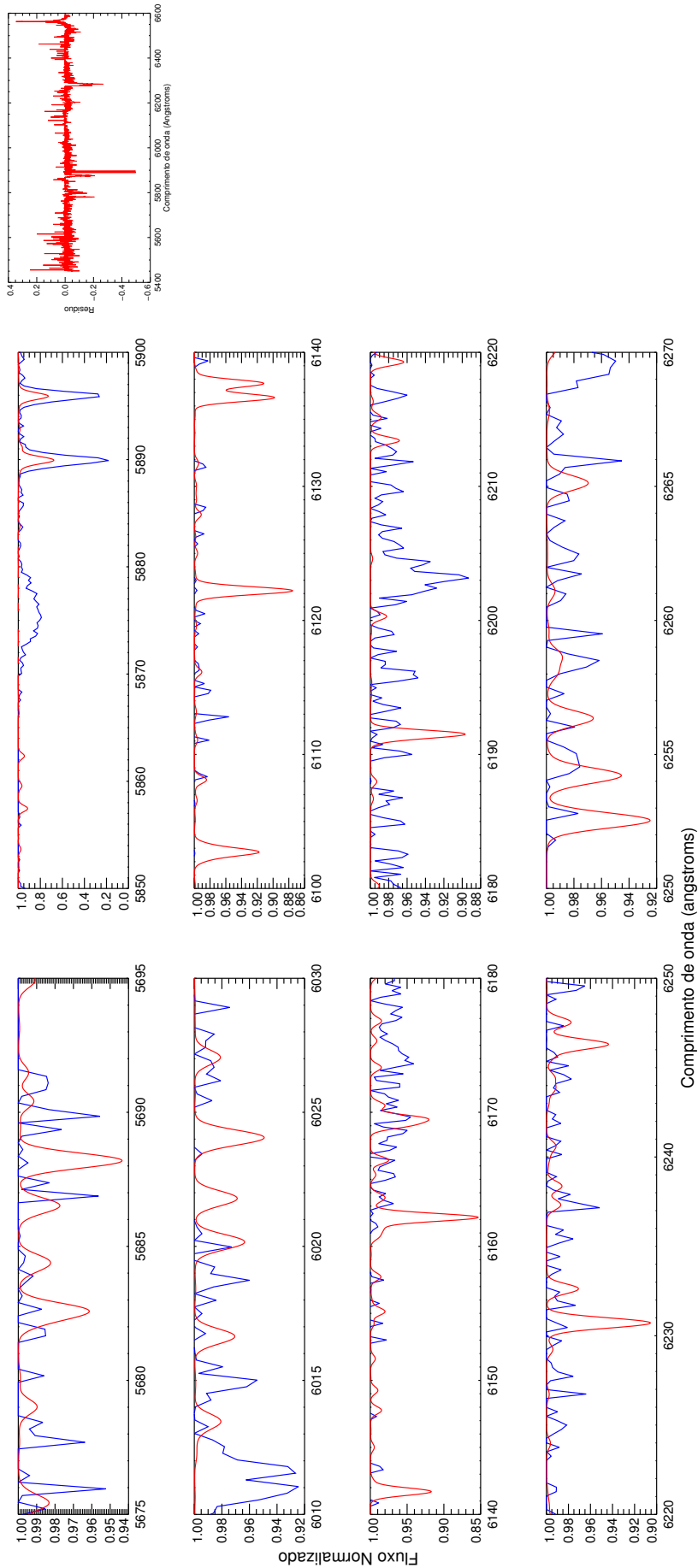


Figura A2: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela CD2313793 com seu respectivo resíduo.

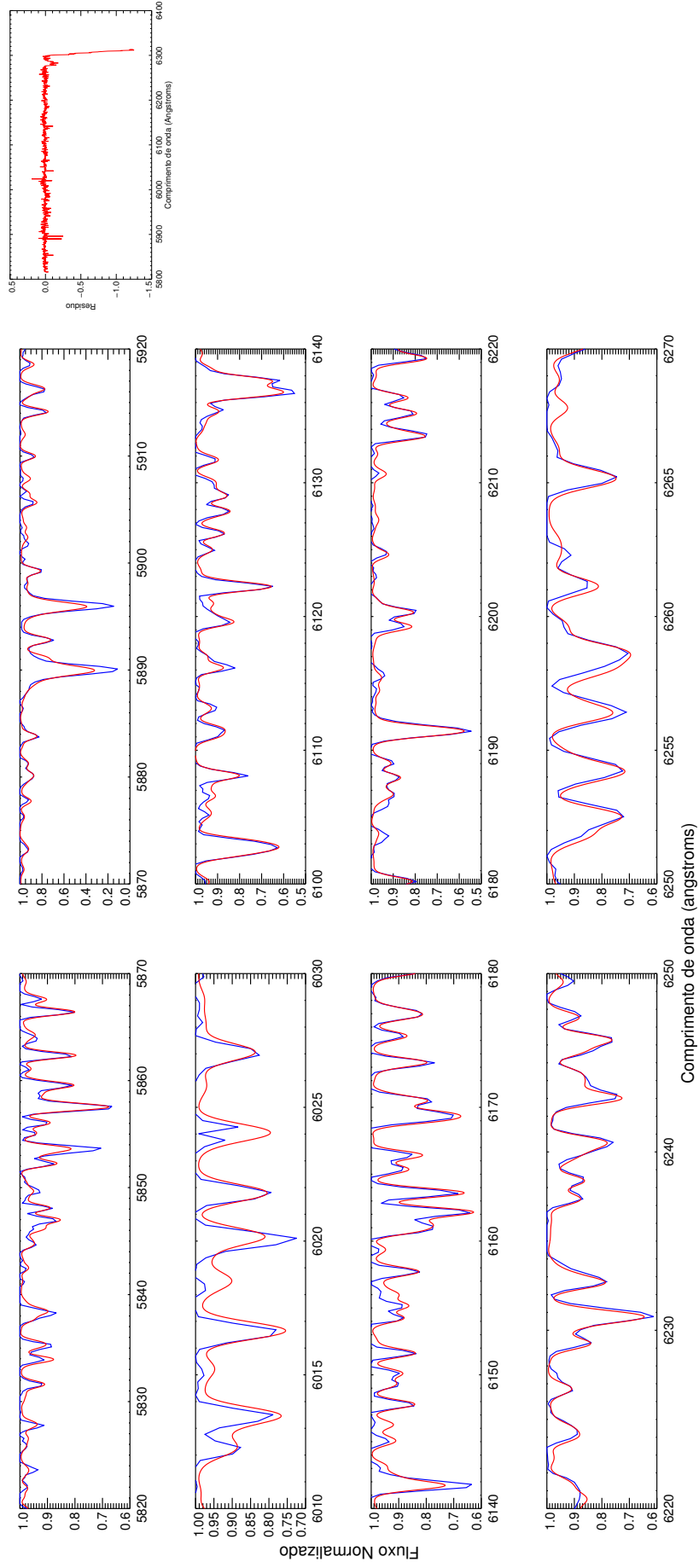


Figura A3: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela CPD-614106 com seu respectivo resíduo.

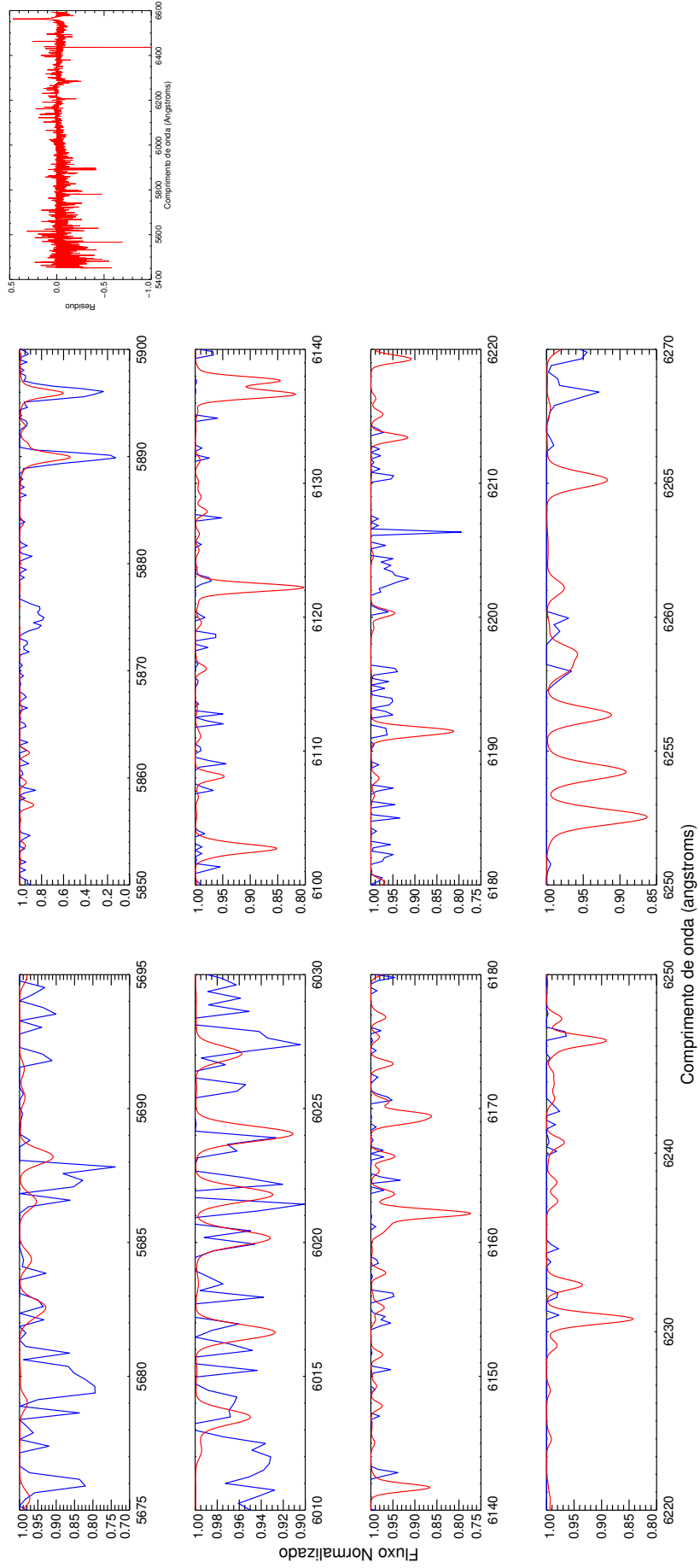


Figura A4: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela GSC06842-01276 com seu respectivo resíduo.

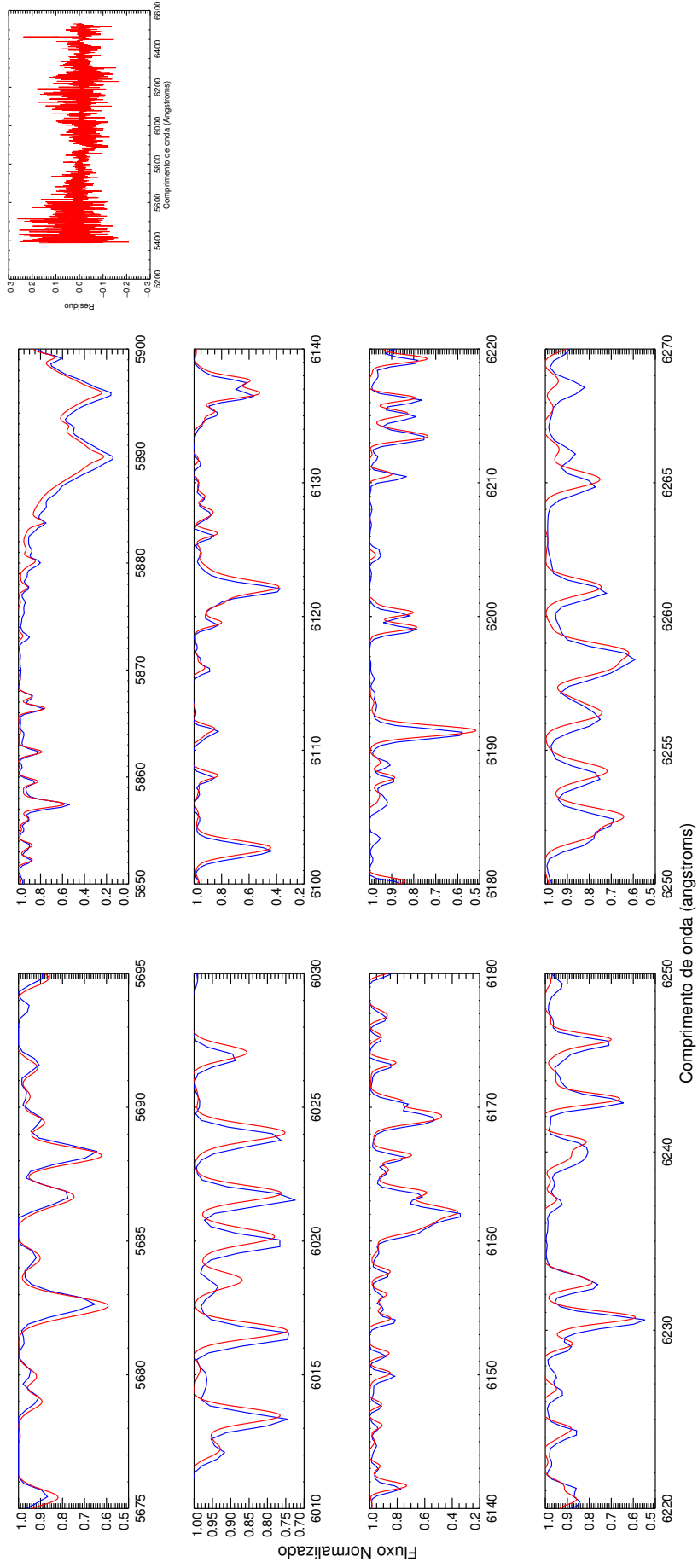


Figura A5: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD103932 com seu respectivo resíduo.

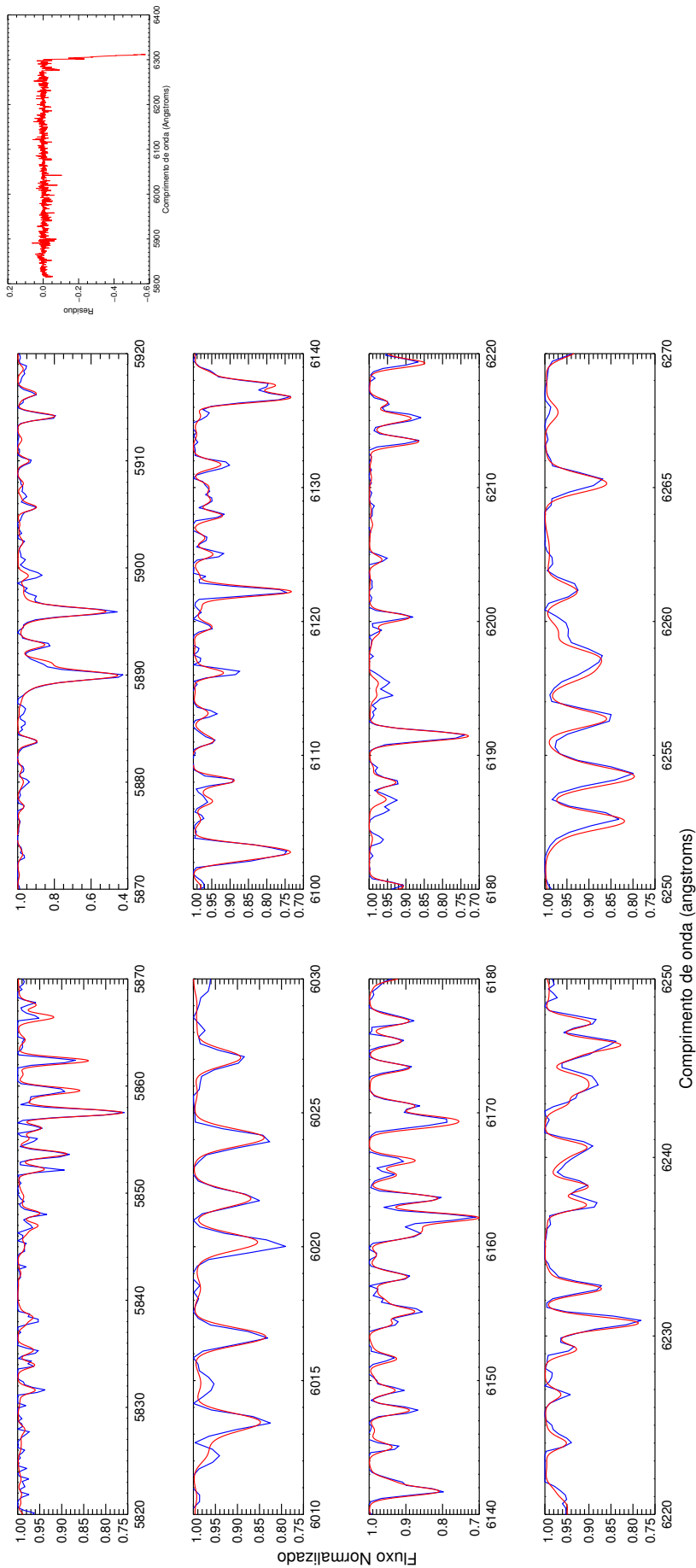


Figura A6: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD112164 com seu respectivo resíduo.

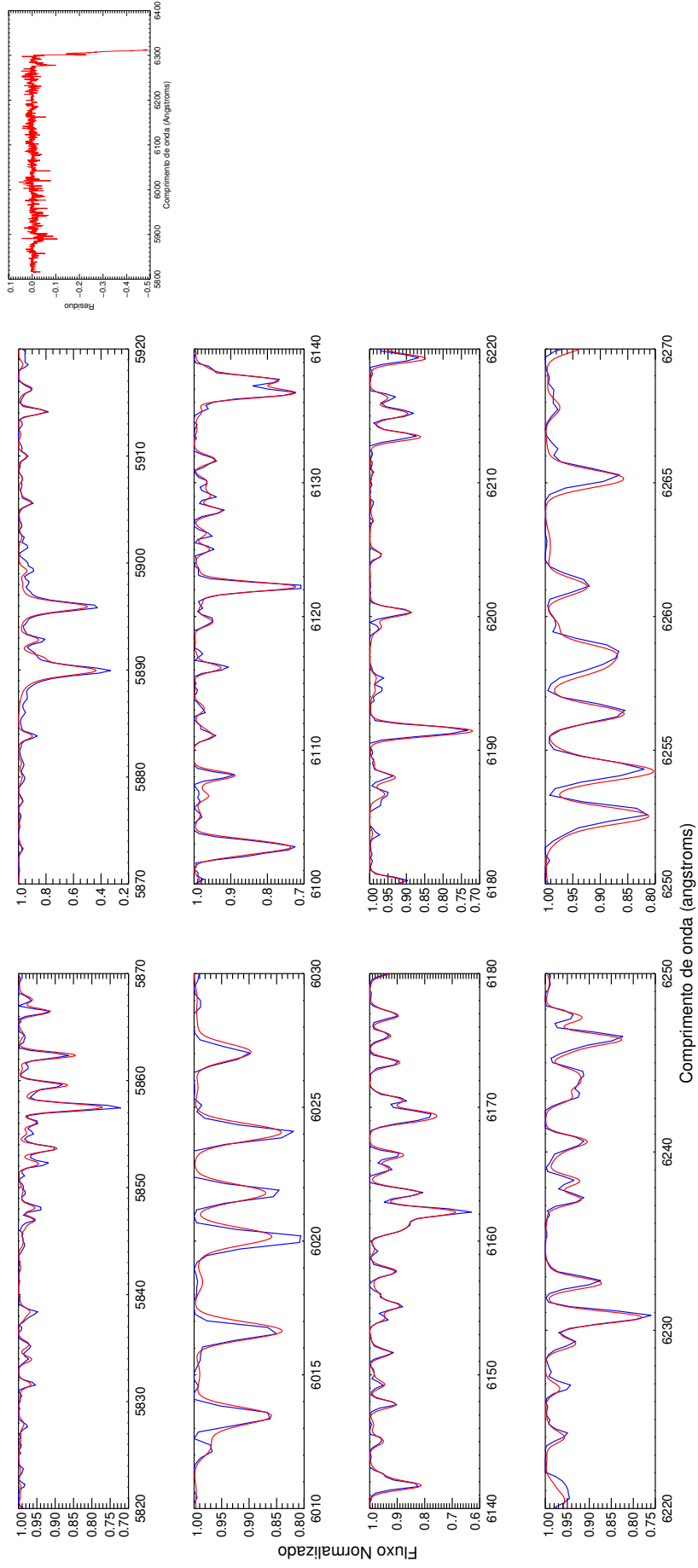


Figura A7: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD115617 com seu respectivo resíduo.



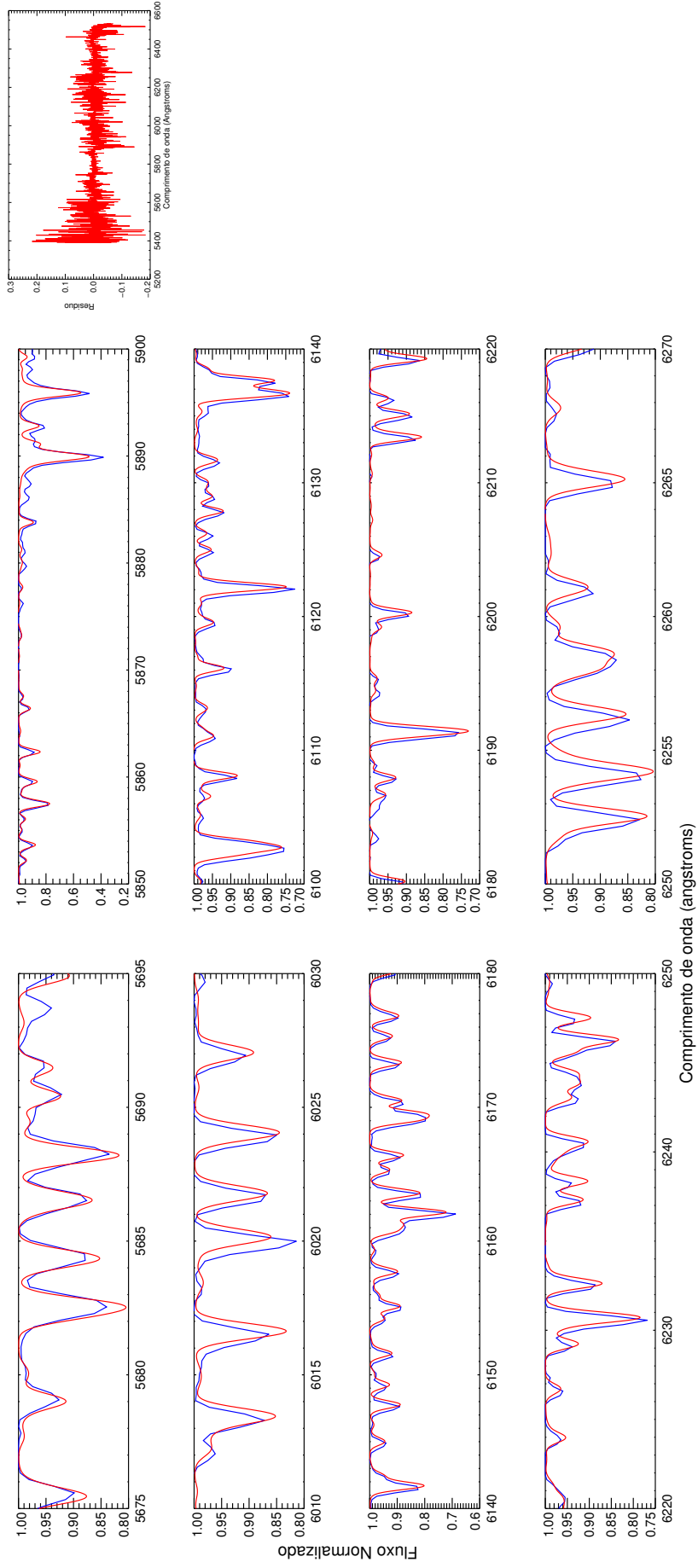


Figura A8: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD117176 com seu respectivo resíduo.

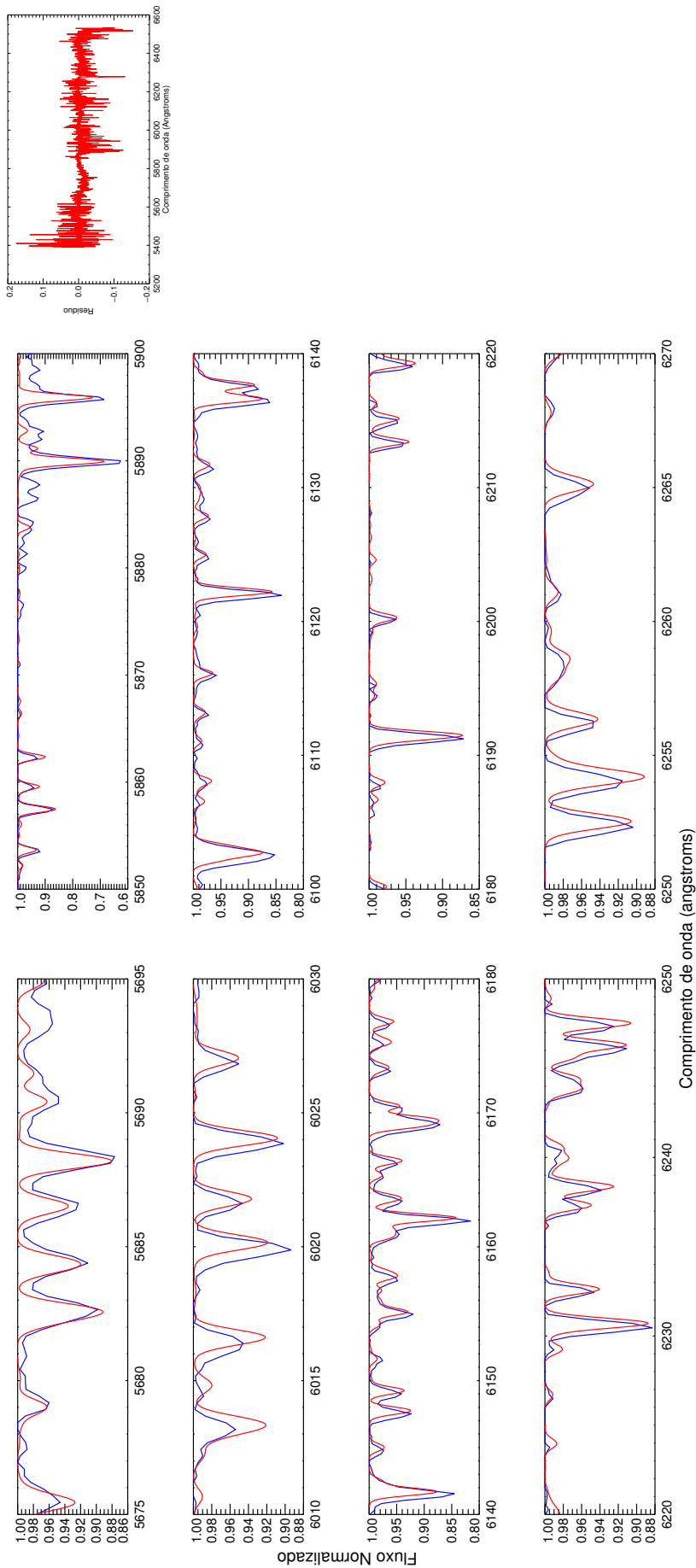


Figura A9: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD119288 com seu respectivo resíduo.

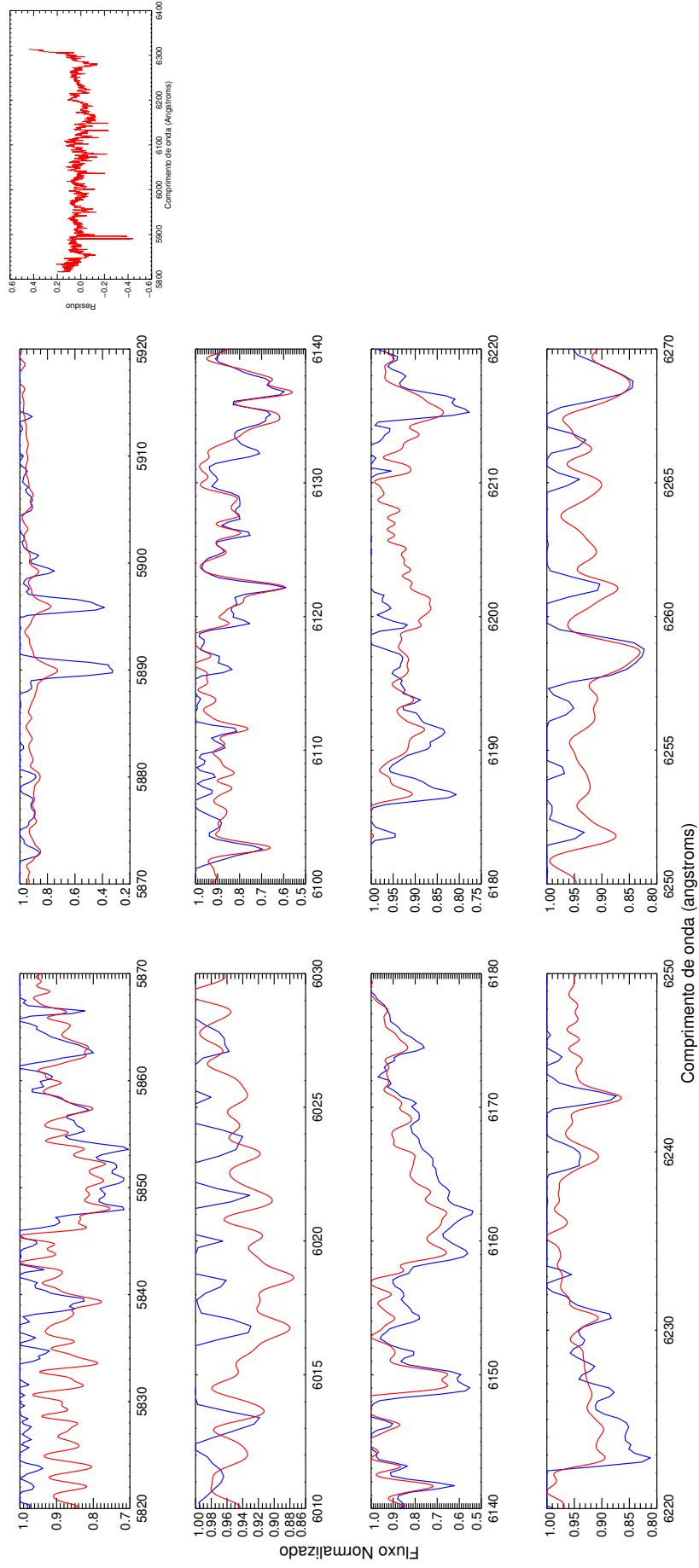


Figura A10: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD120494 com seu respectivo resíduo.

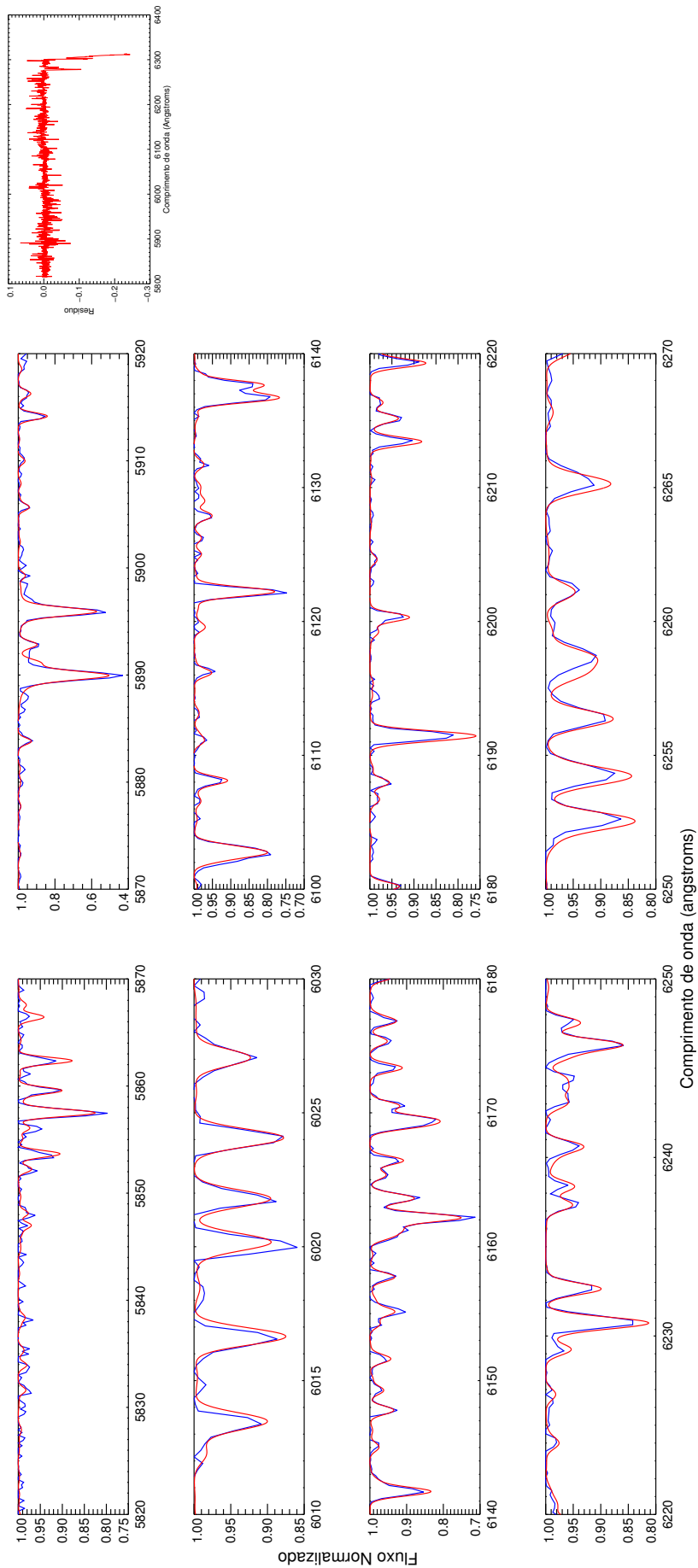


Figura A11: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD126053 com seu respectivo resíduo.

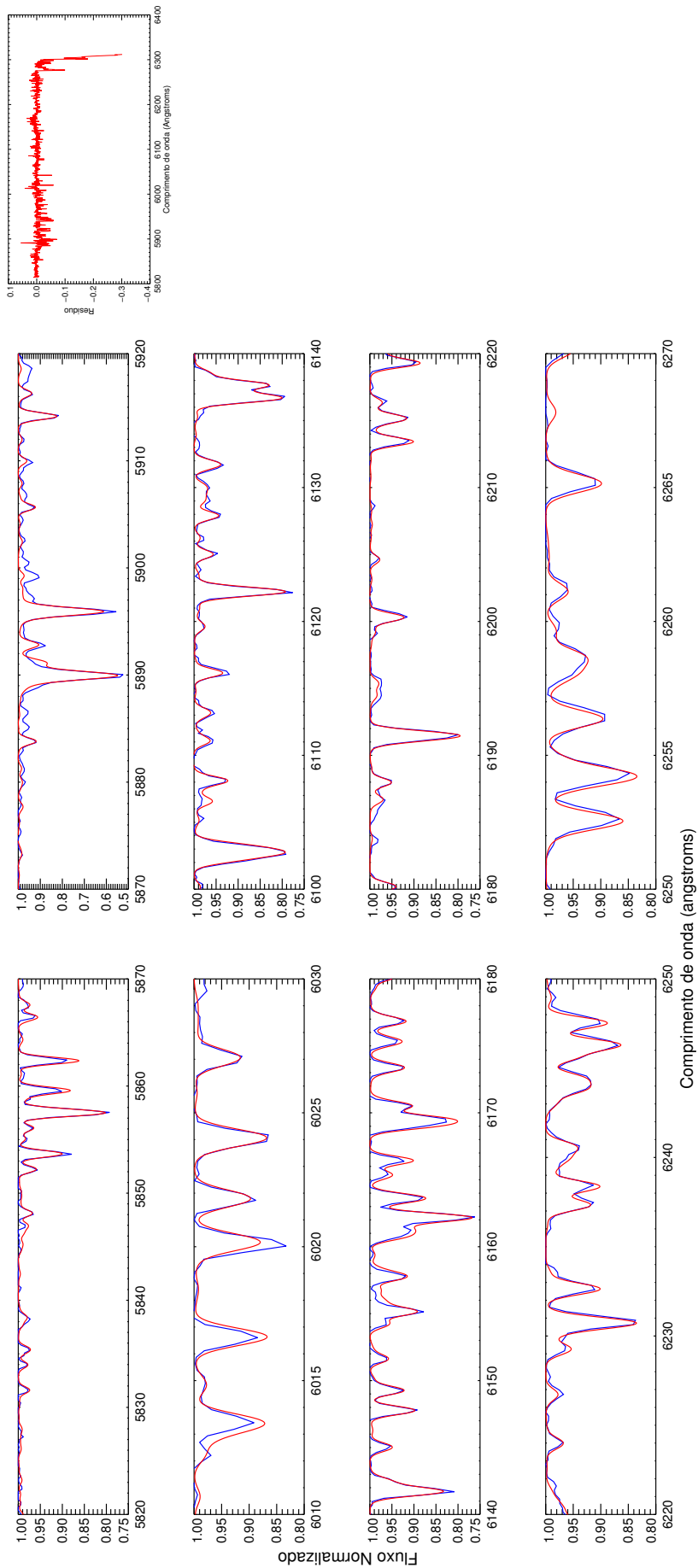


Figura A12: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD136202 com seu respectivo resíduo.

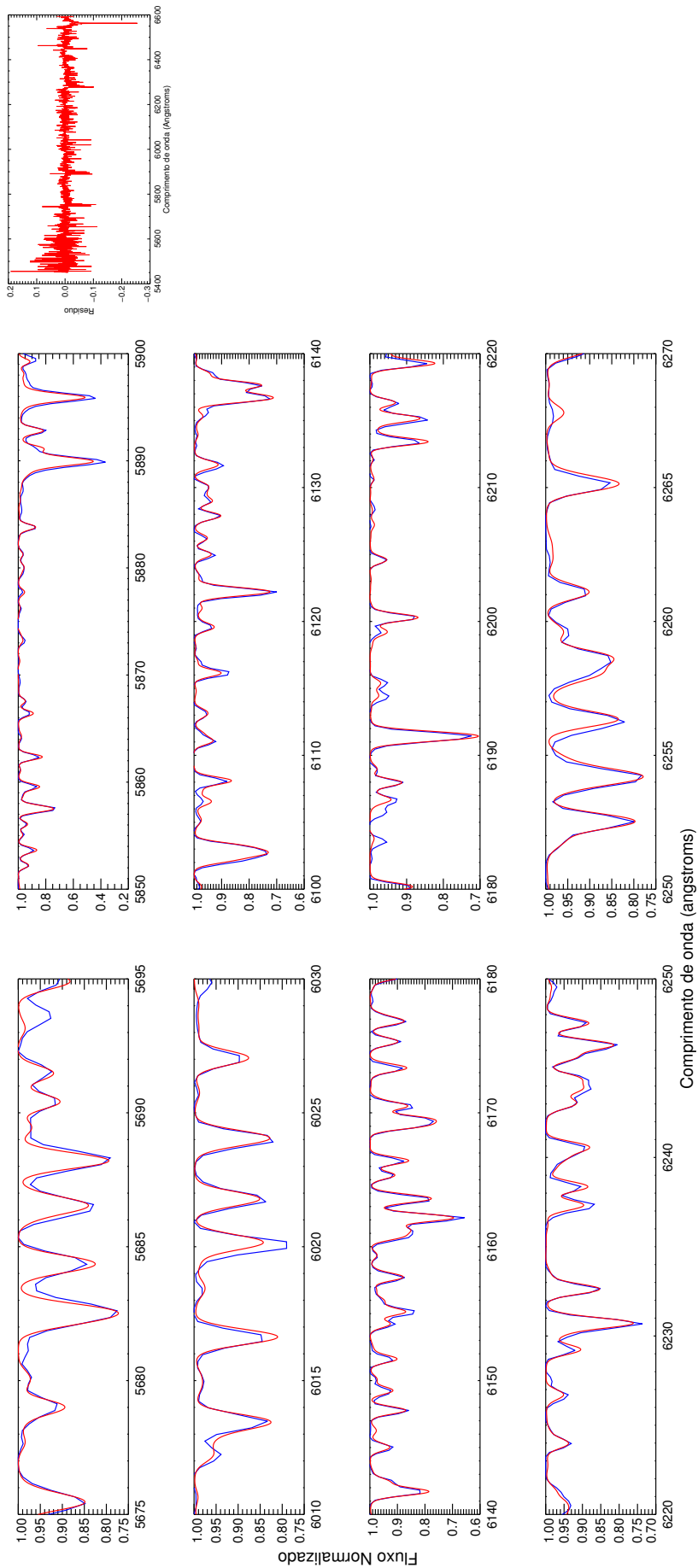


Figura A13: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD144585 com seu respectivo resíduo.

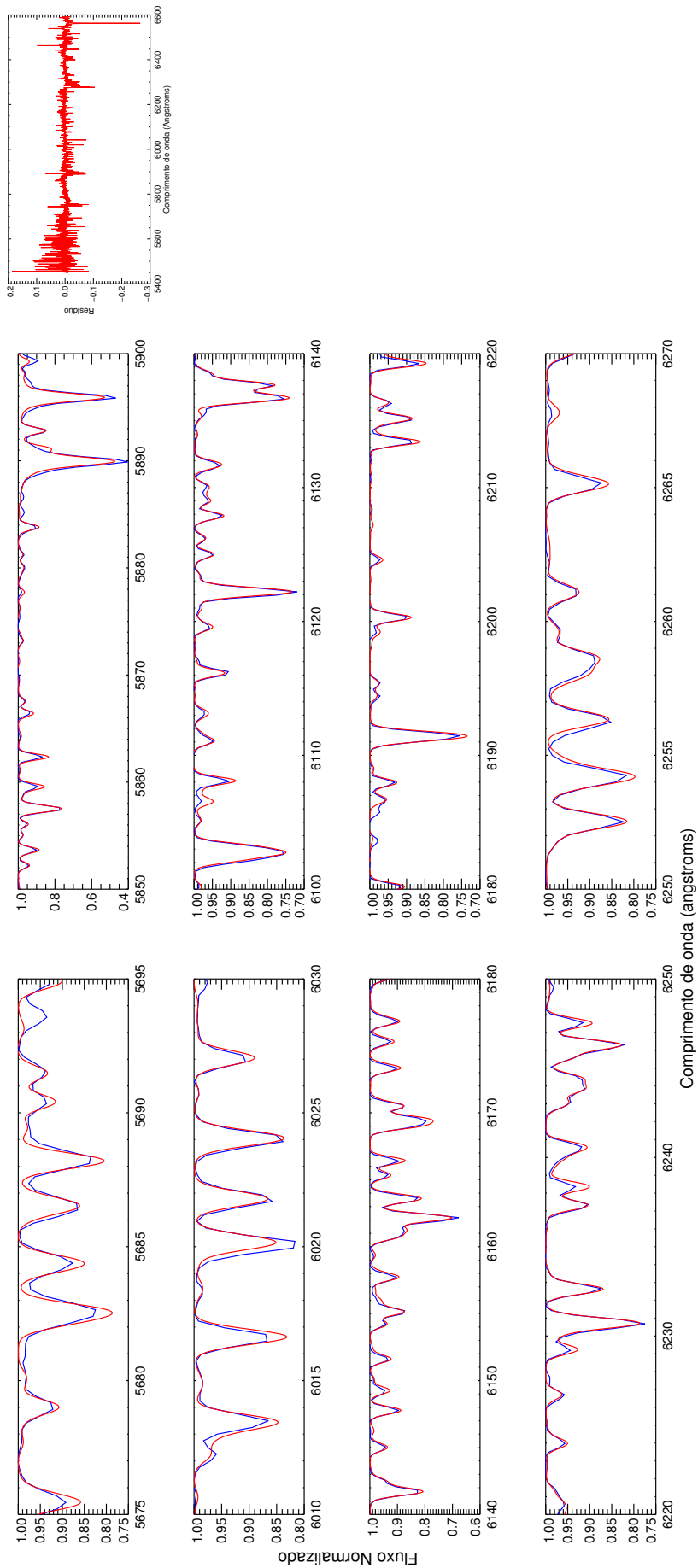


Figura A14: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD146233 com seu respectivo resíduo.

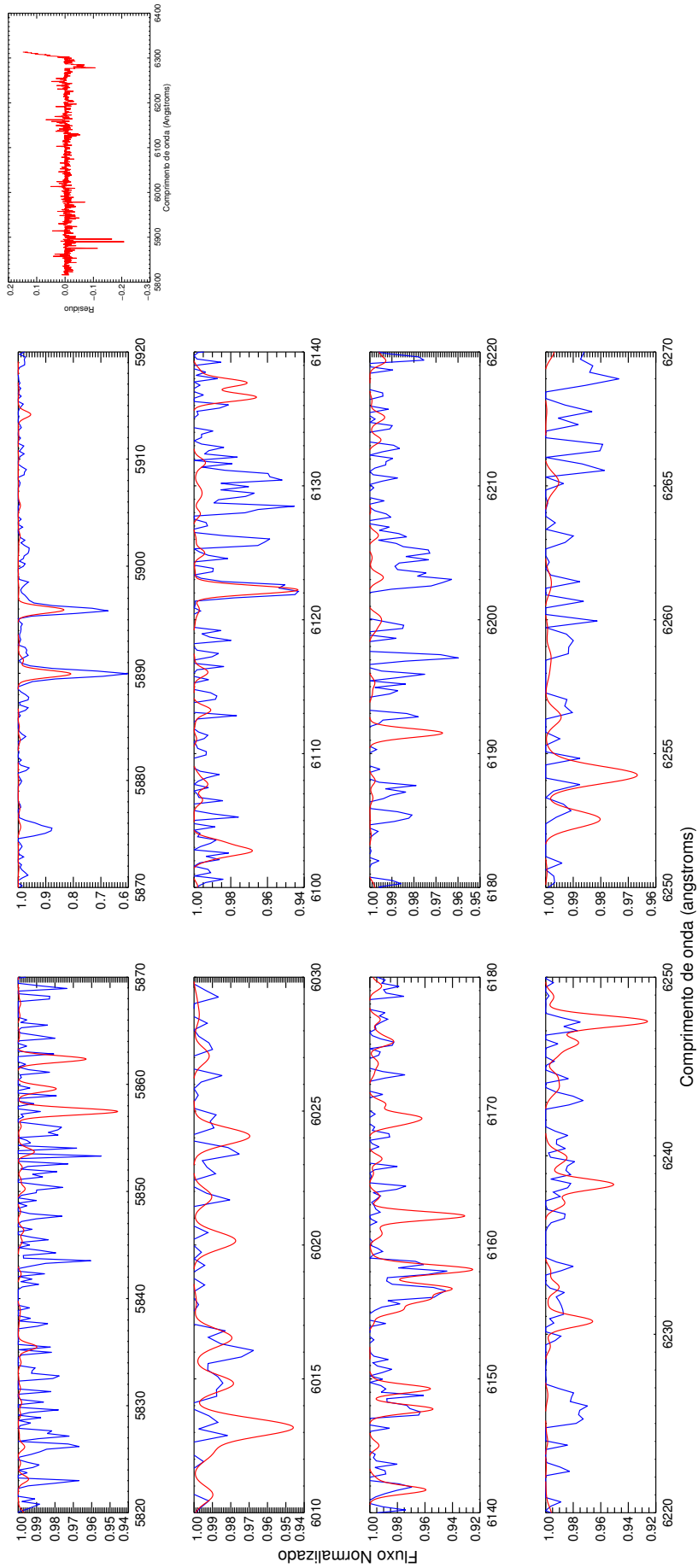


Figura A15: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD147824 com seu respectivo resíduo.



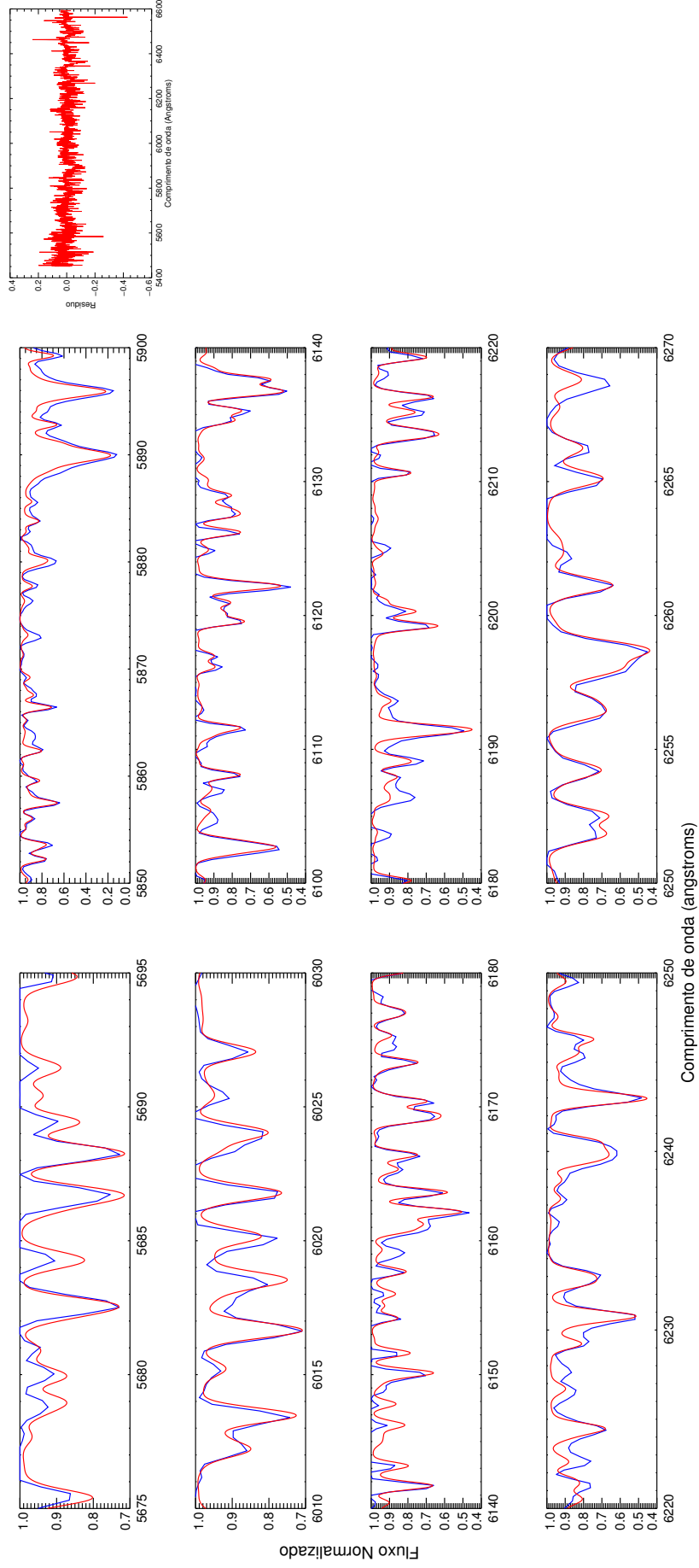


Figura A16: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD161408 com seu respectivo resíduo.

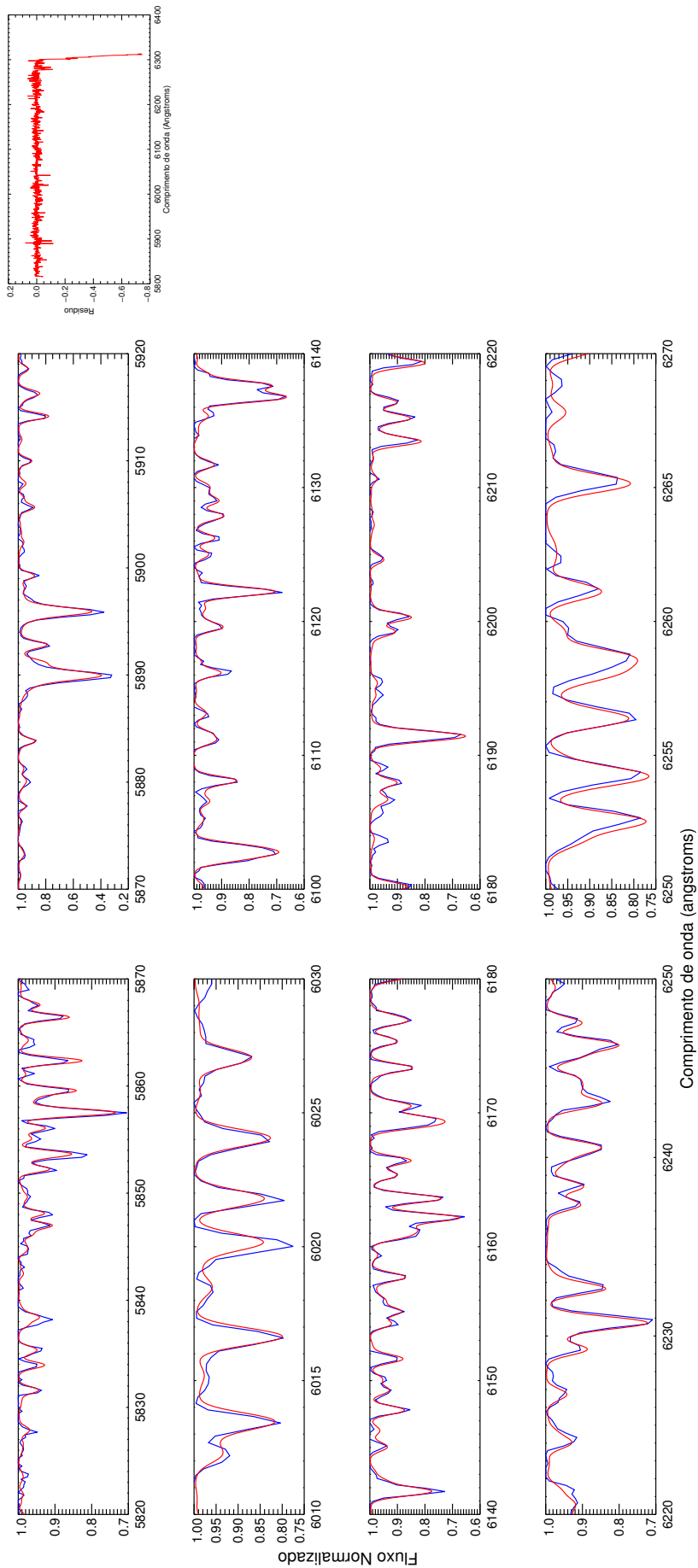


Figura A17: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD171391 com seu respectivo resíduo.

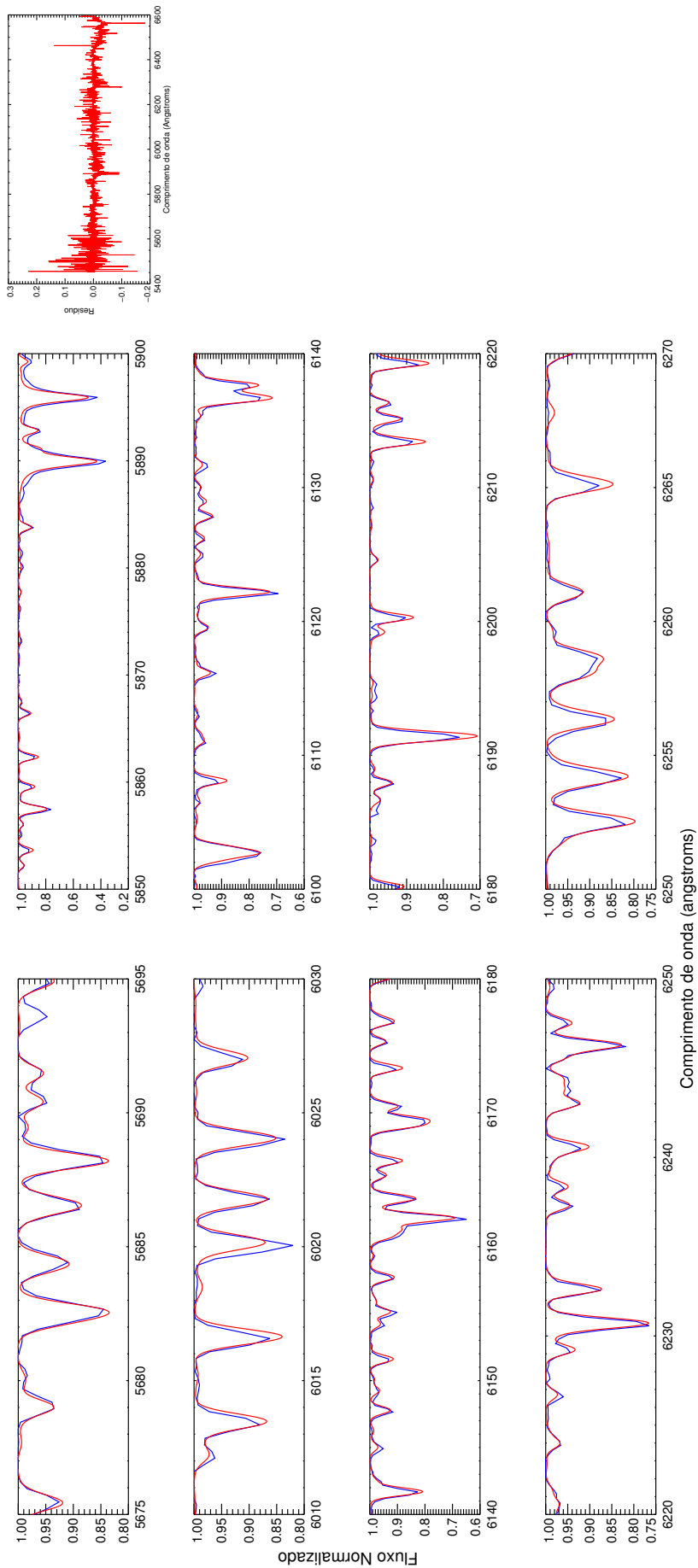


Figura A18: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD196761 com seu respectivo resíduo.

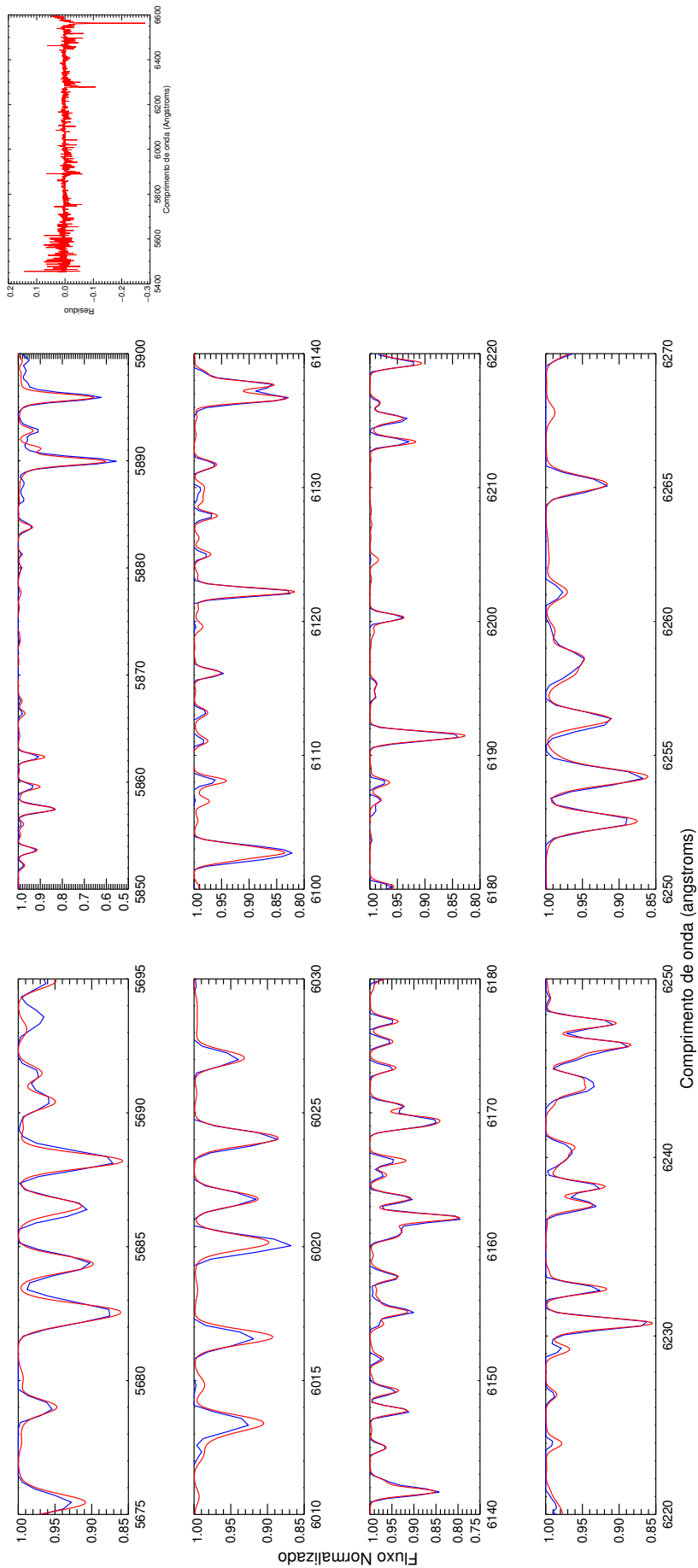


Figura A19: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD210302a com seu respectivo resíduo.

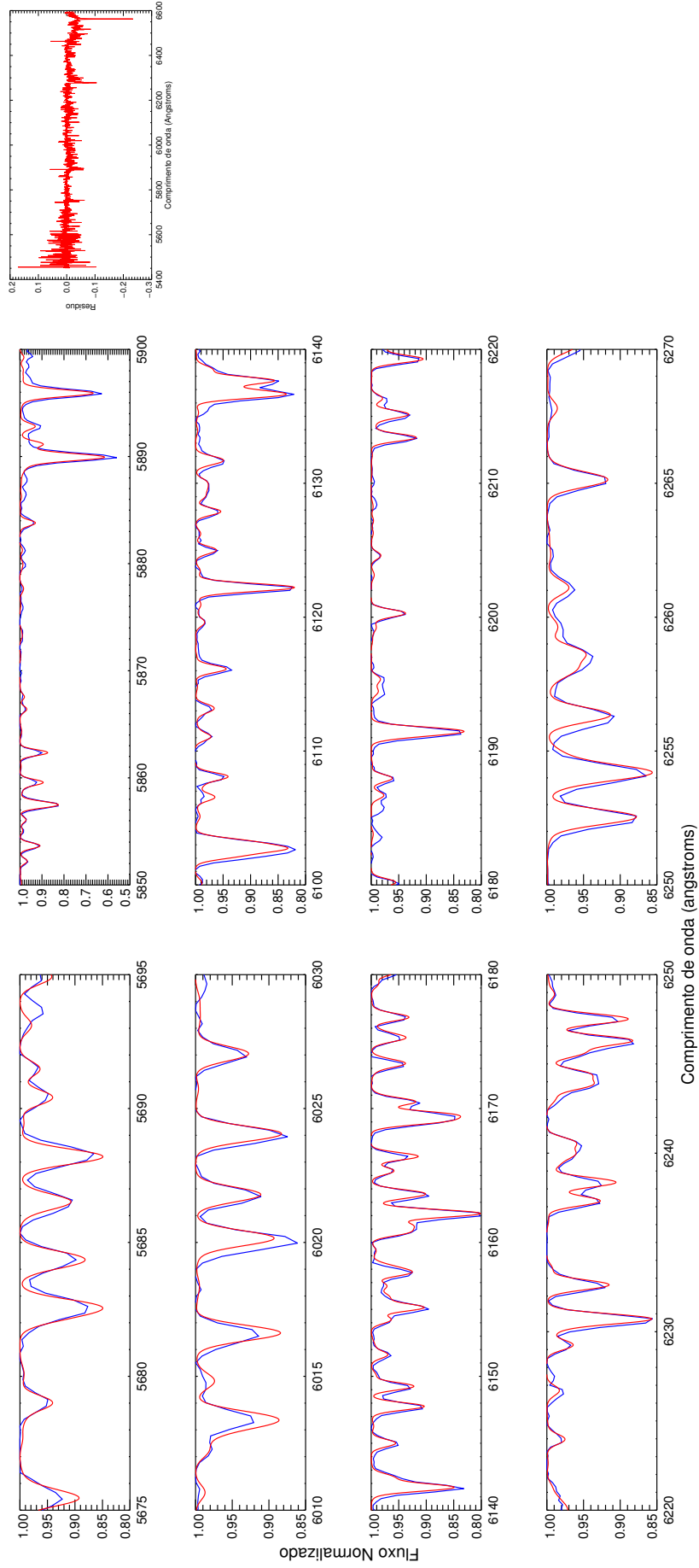


Figura A20: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD210302b com seu respectivo resíduo.

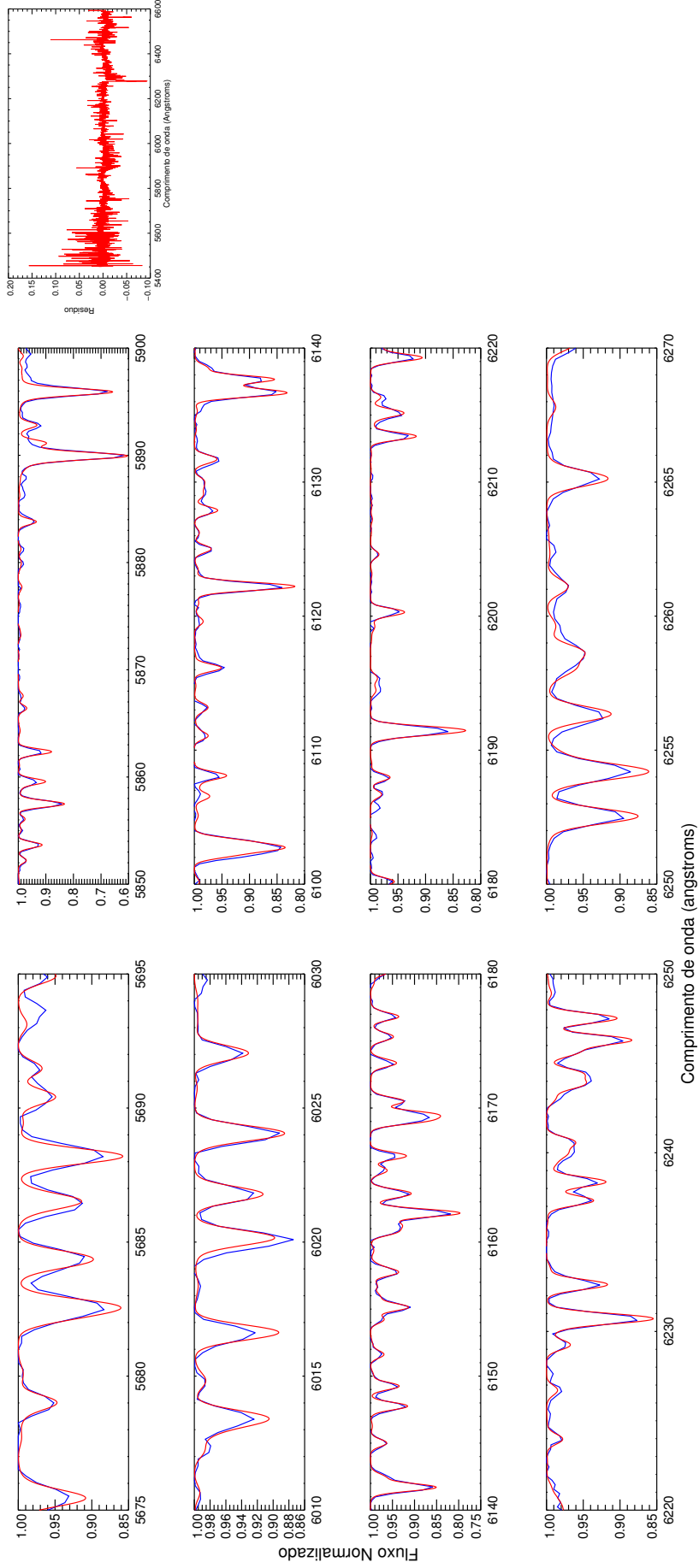


Figura A21: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD210302c com seu respectivo resíduo.

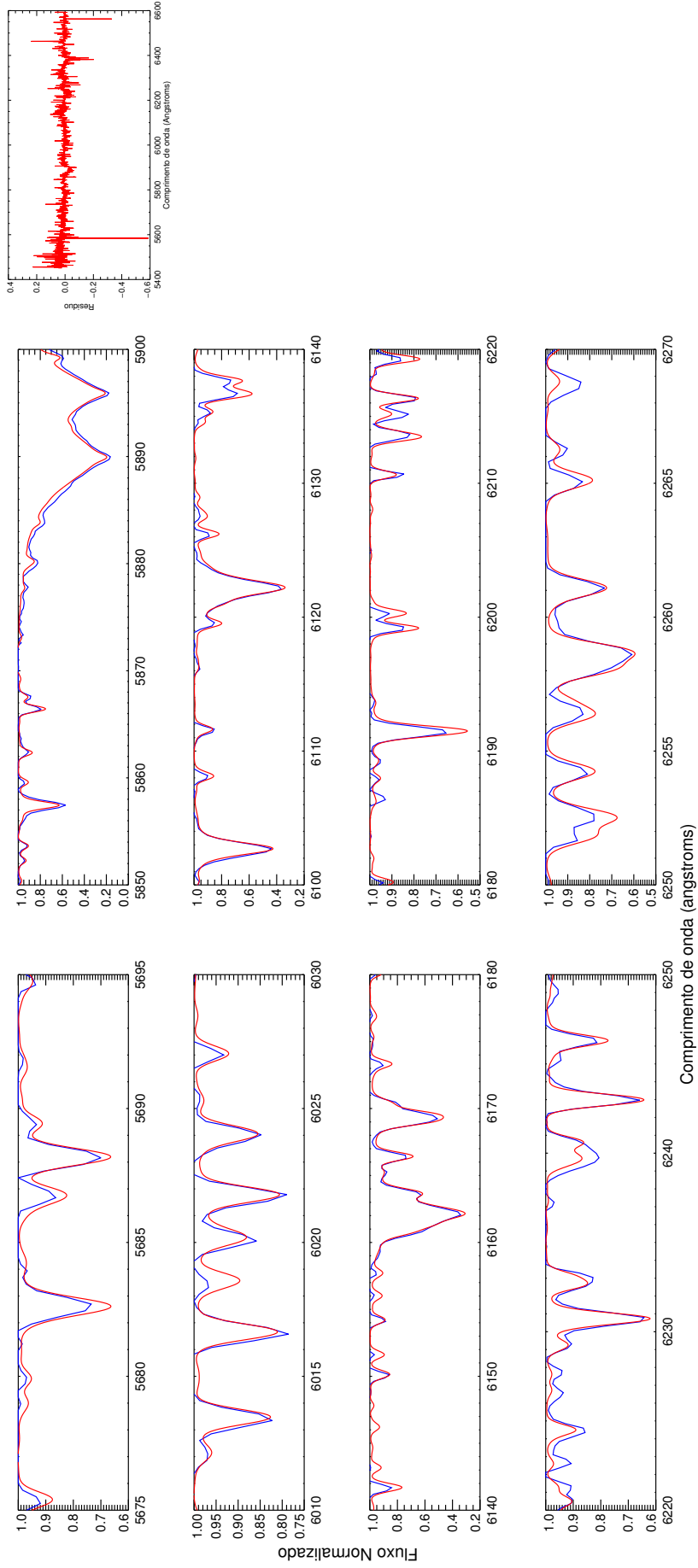


Figura A22: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD217357 com seu respectivo resíduo.

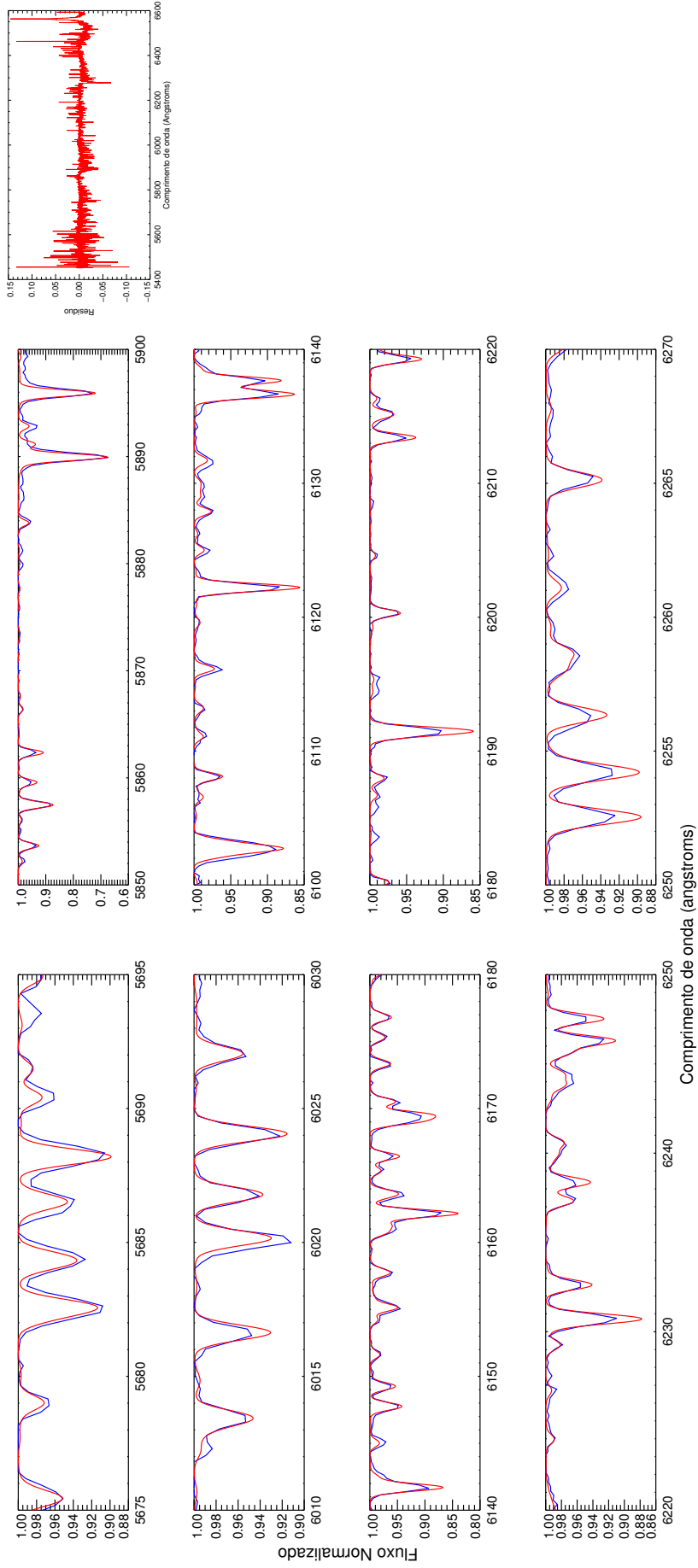


Figura A23: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD222368 com seu respectivo resíduo.



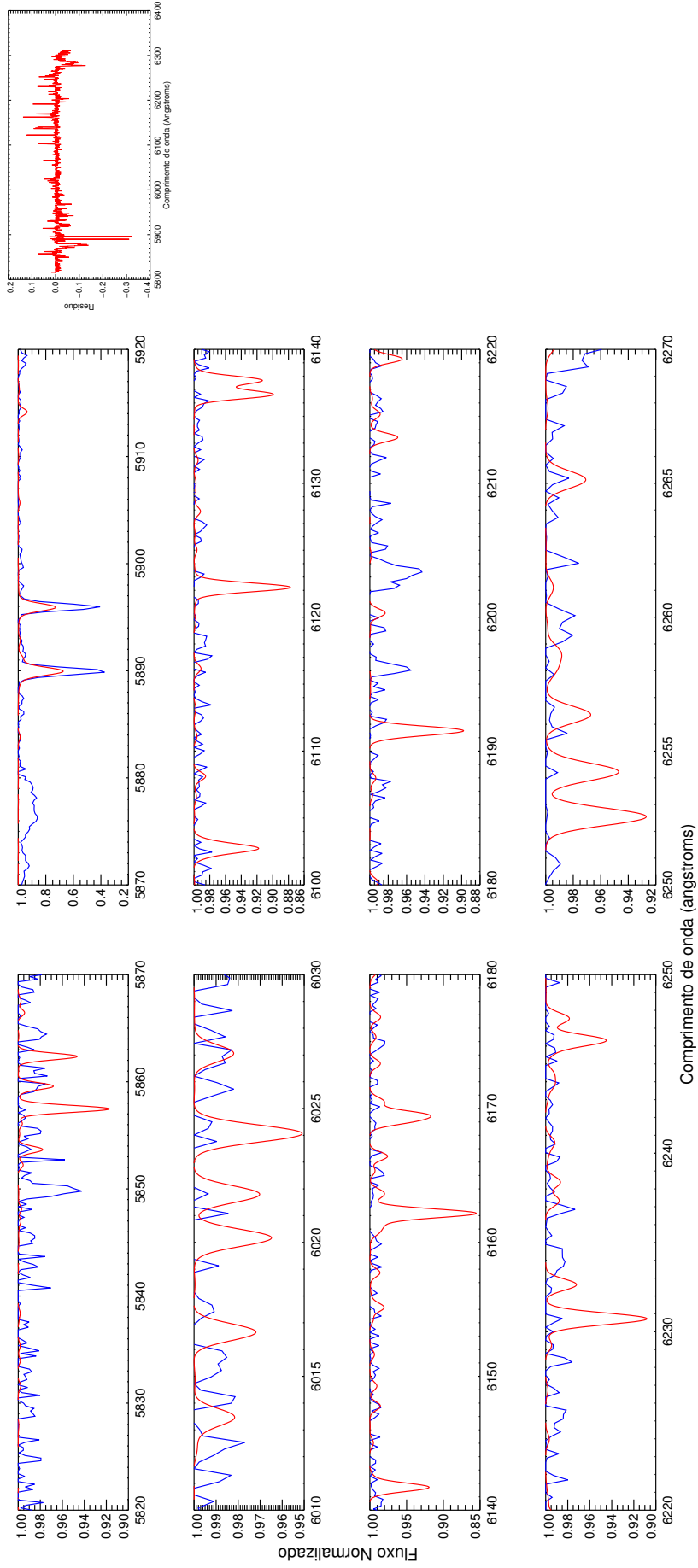


Figura A24: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD300814 com seu respectivo resíduo.

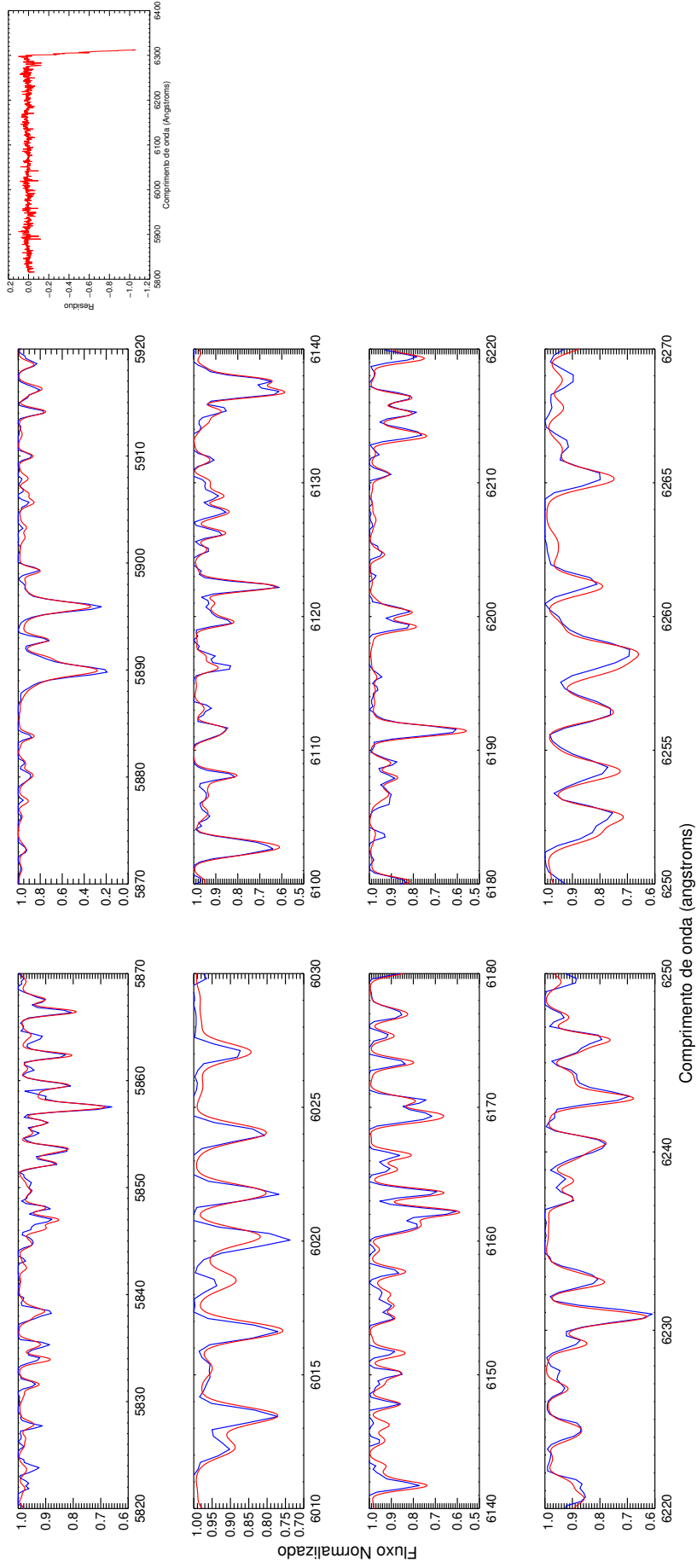


Figura A25: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD309461a com seu respectivo resíduo.

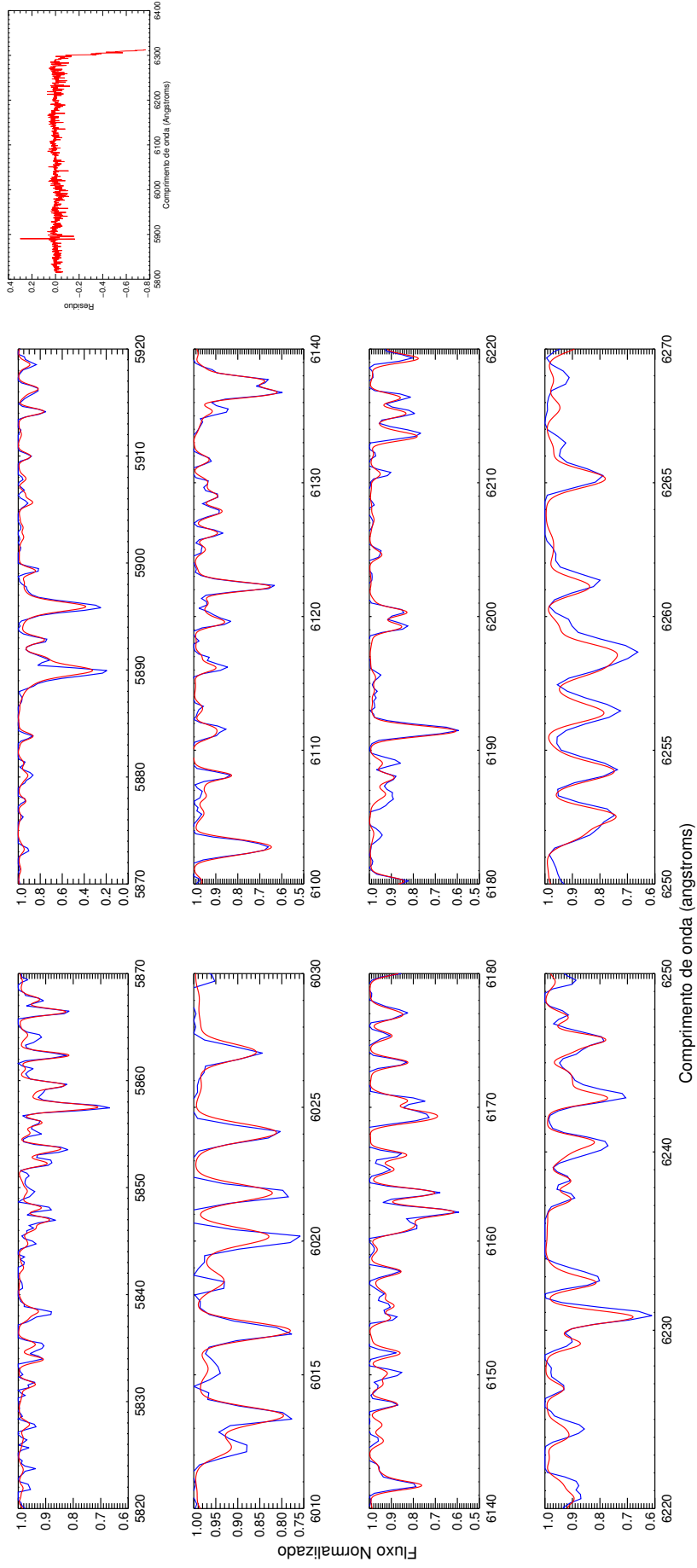


Figura A26: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD309461b com seu respectivo resíduo.

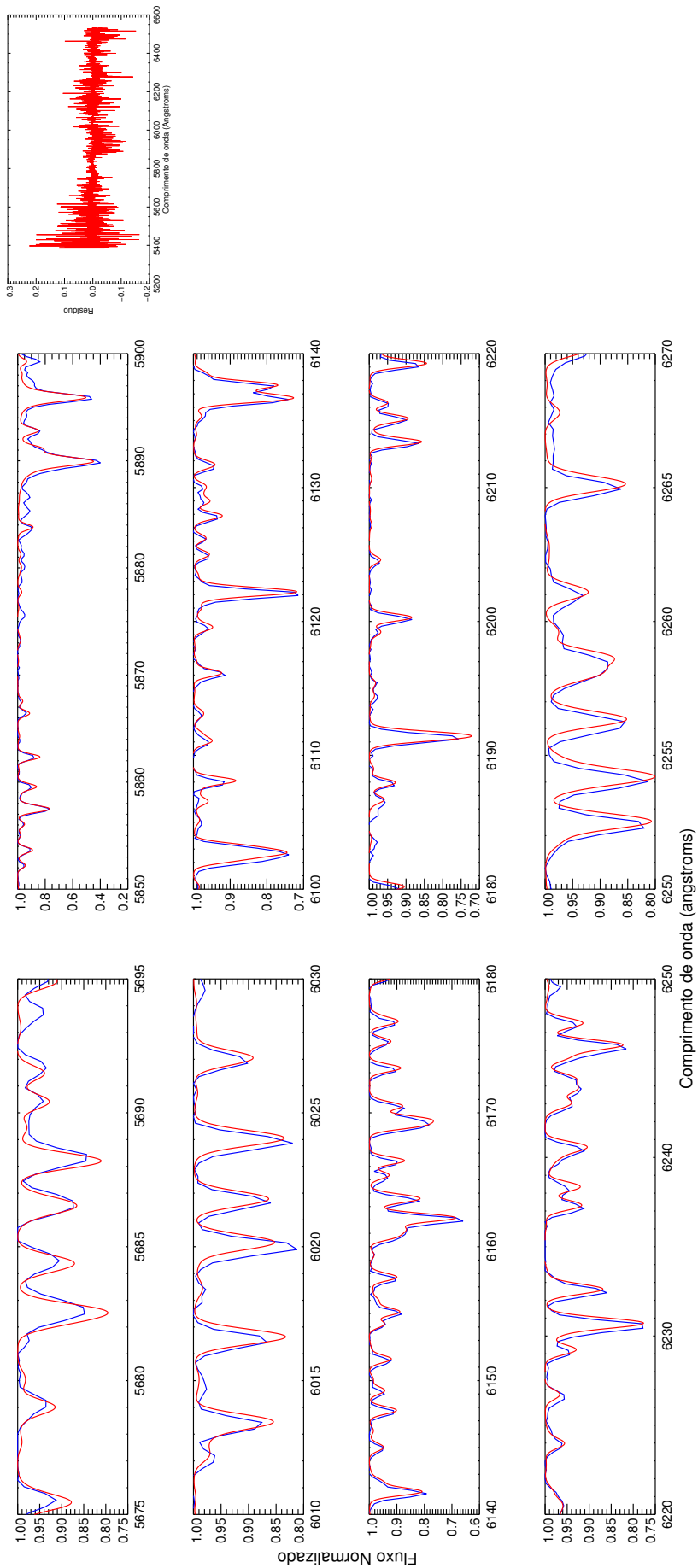


Figura A27: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD42807 com seu respectivo resíduo.

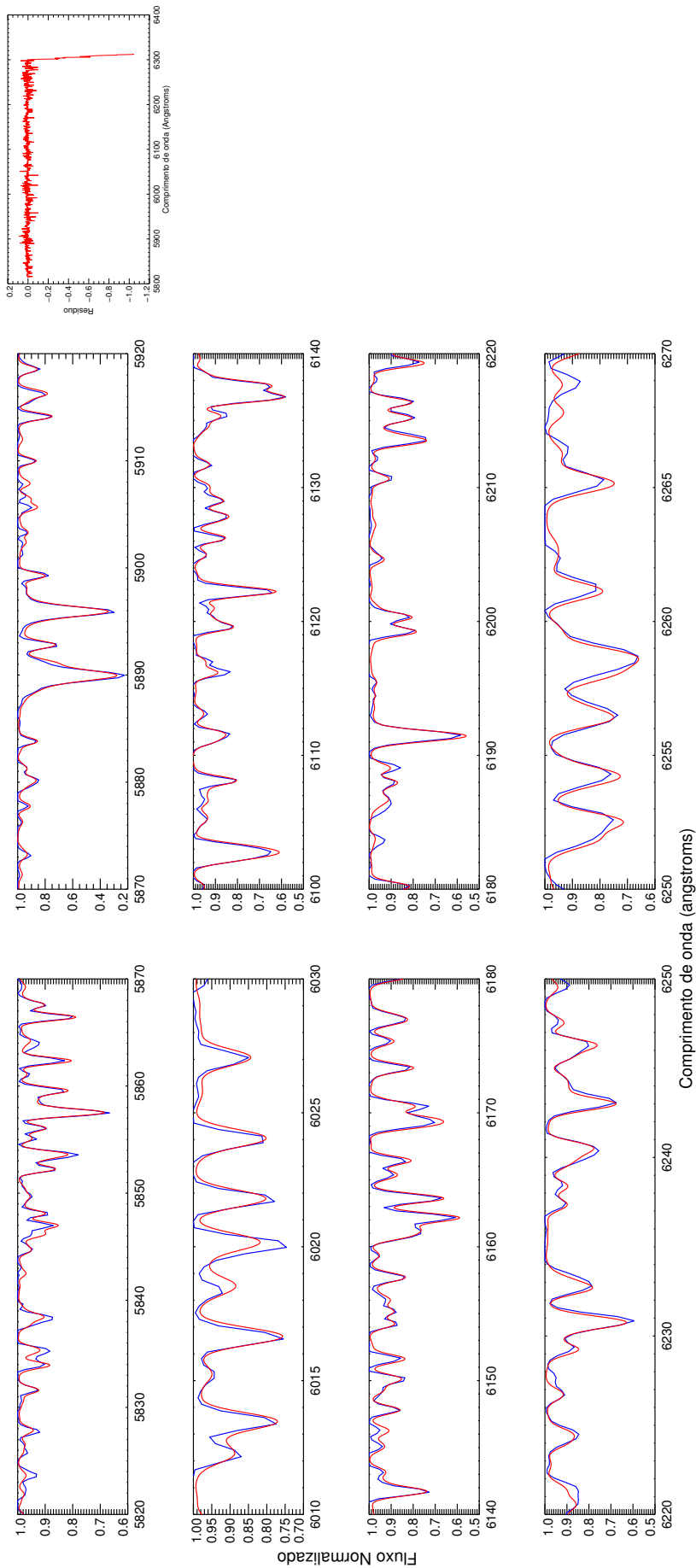


Figura A28: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD80170 com seu respectivo resíduo.

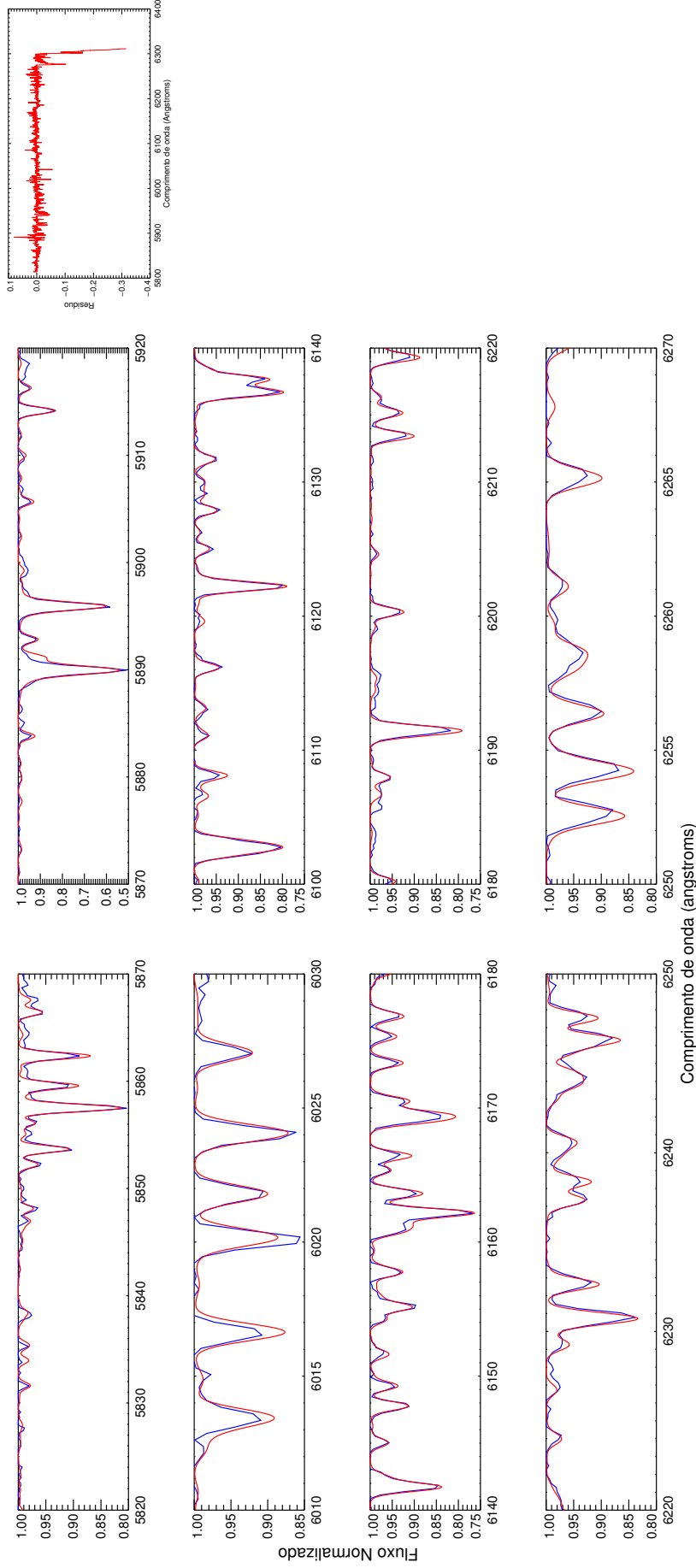


Figura A29: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD84117a com seu respectivo resíduo.

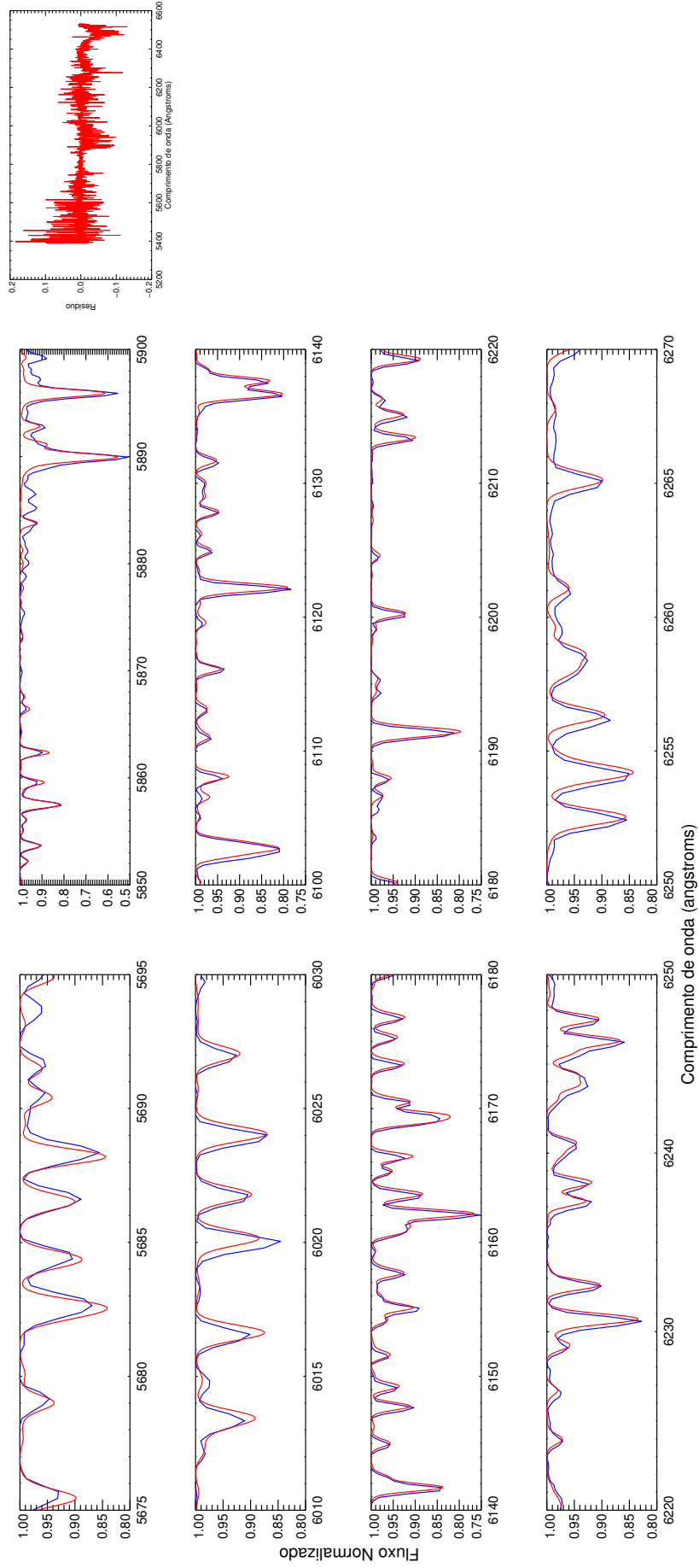


Figura A30: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD84117b com seu respectivo resíduo.

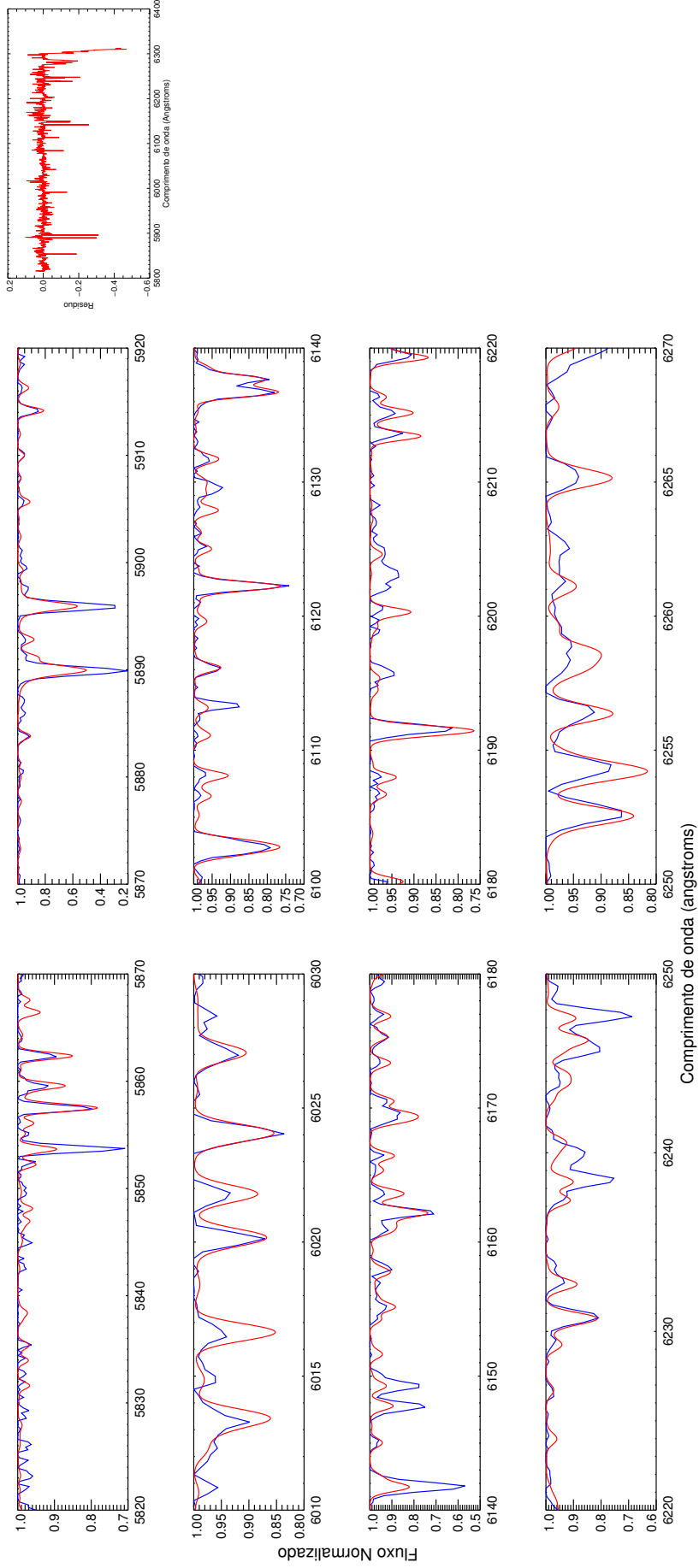


Figura A31: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD87435 com seu respectivo resíduo.



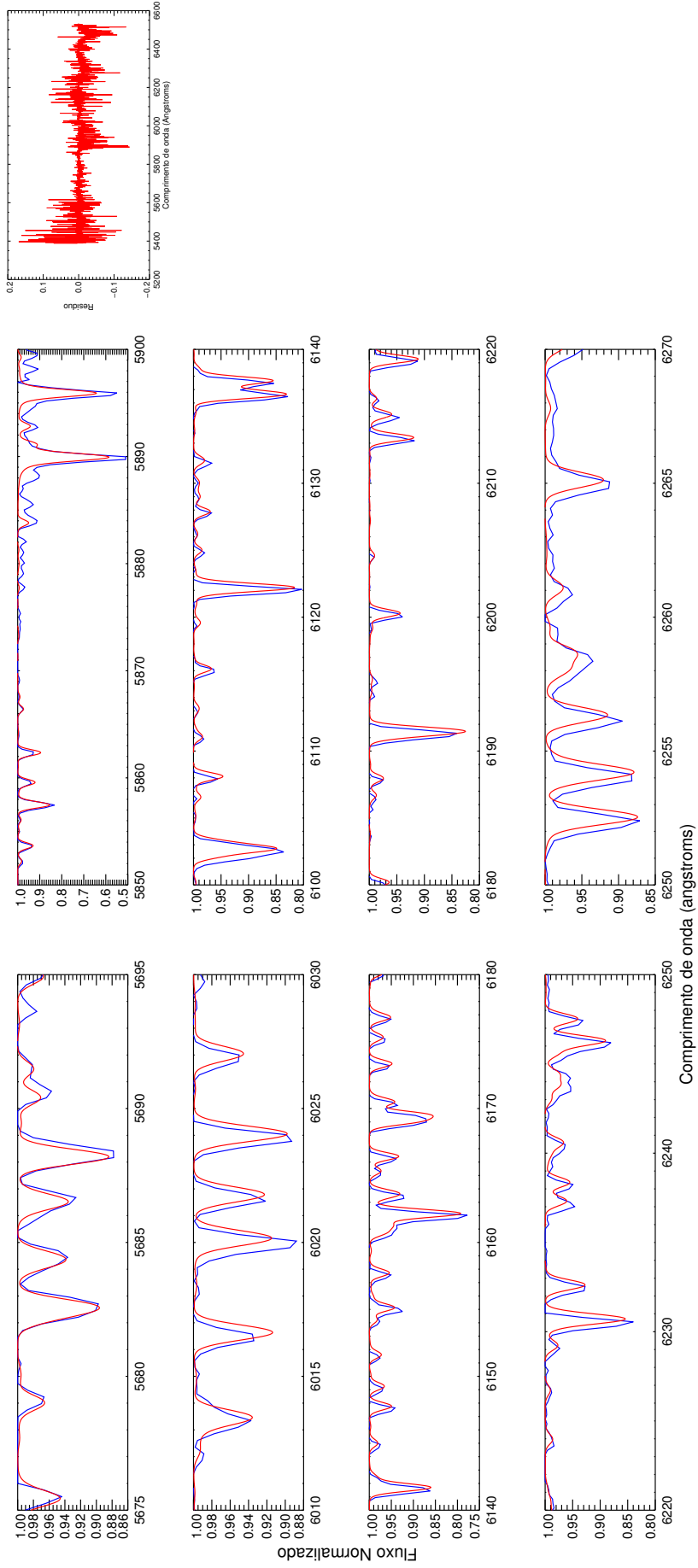


Figura A32: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD89707 com seu respectivo resíduo.

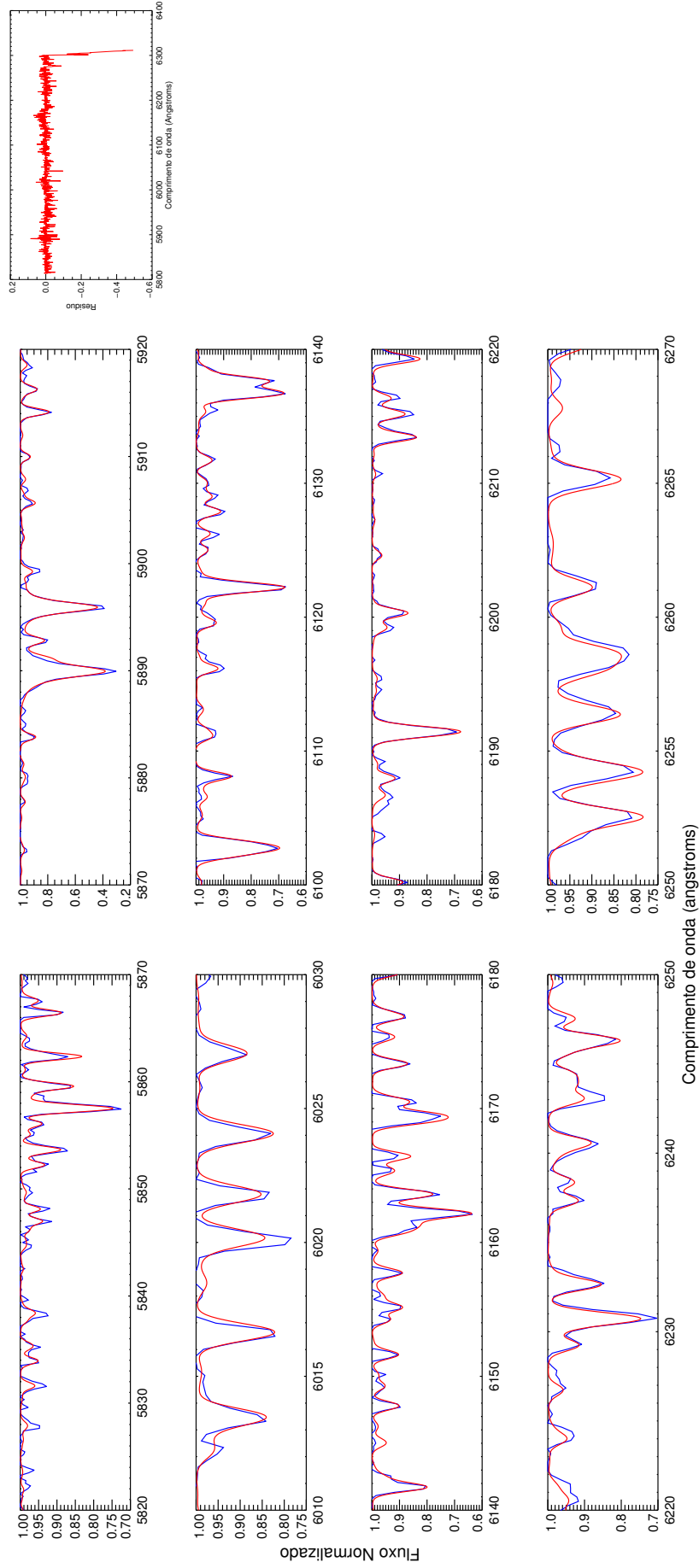


Figura A33: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD92588 com seu respectivo resíduo.

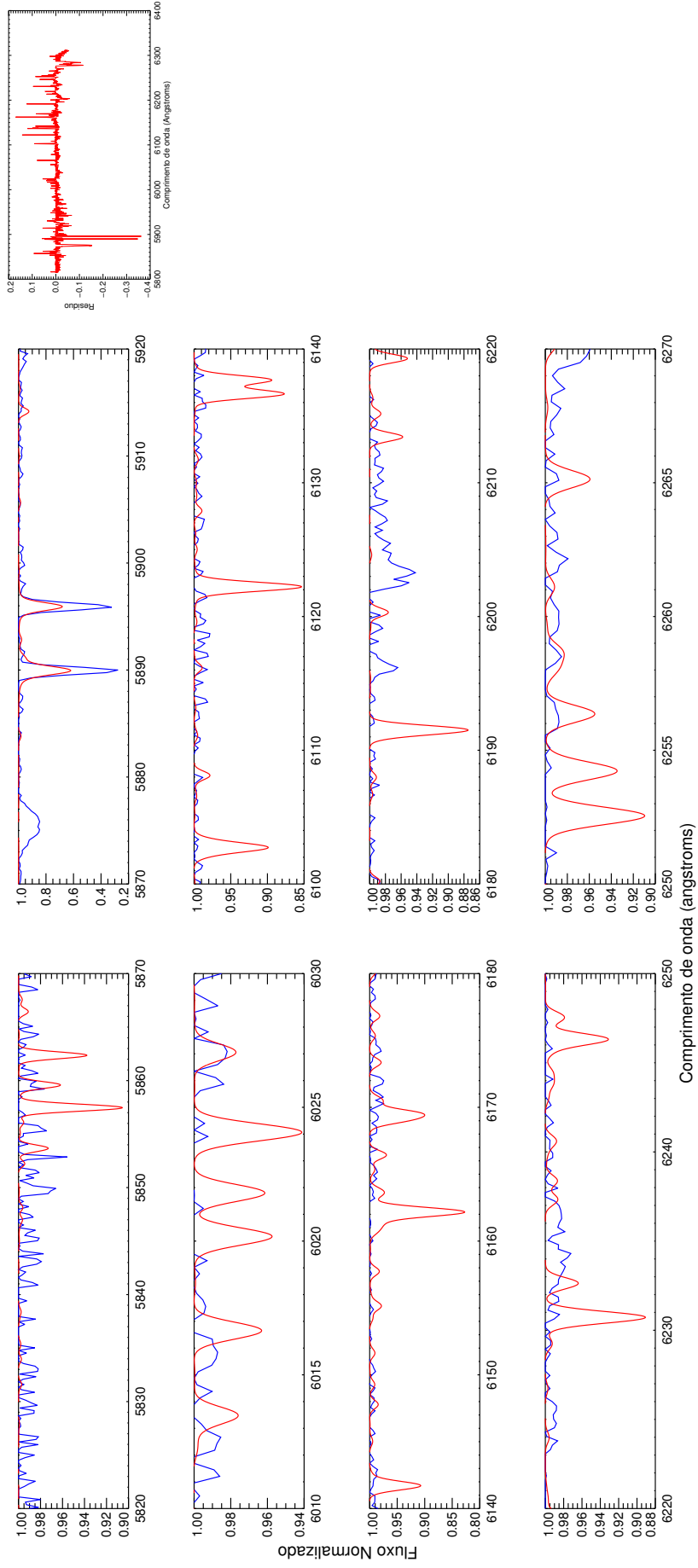


Figura A34: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HD97253 com seu respectivo resíduo.

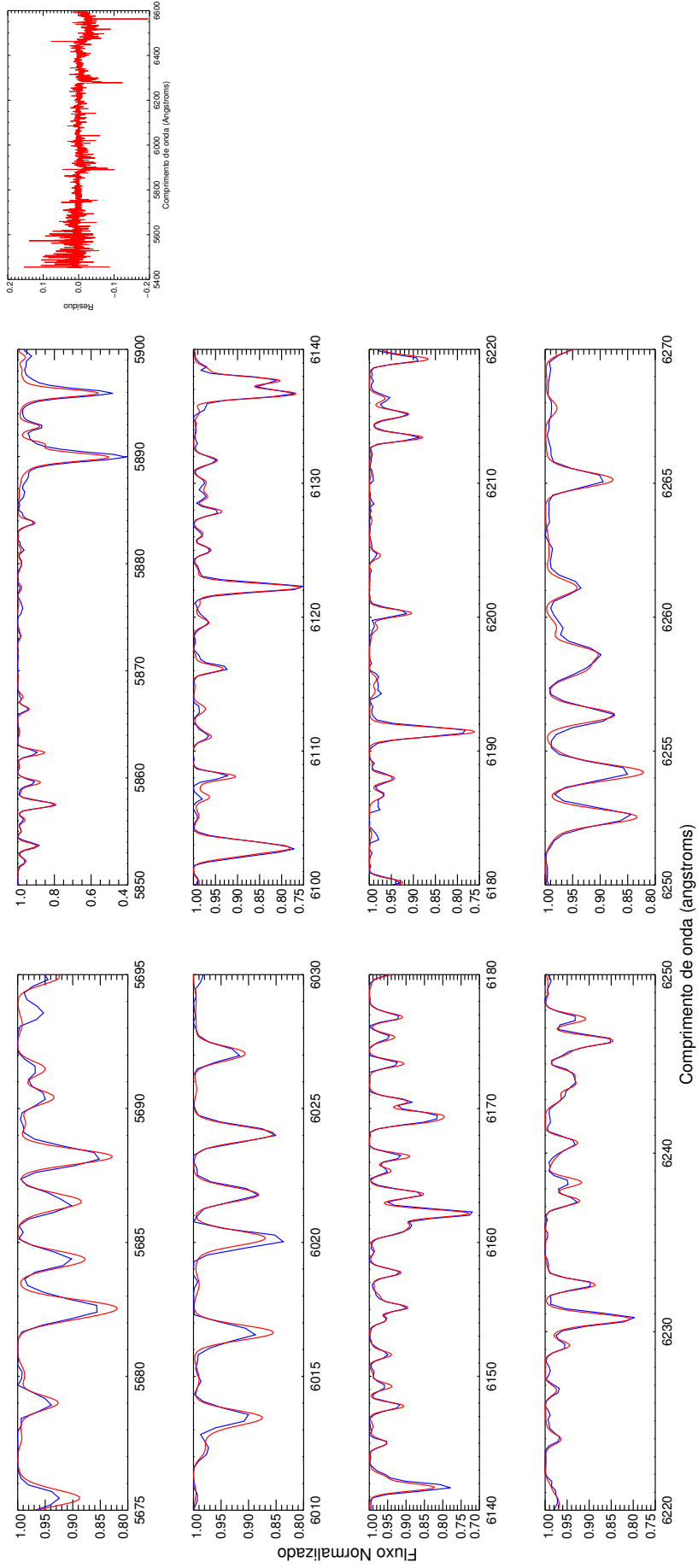


Figura A35: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HIP10725 com seu respectivo resíduo.

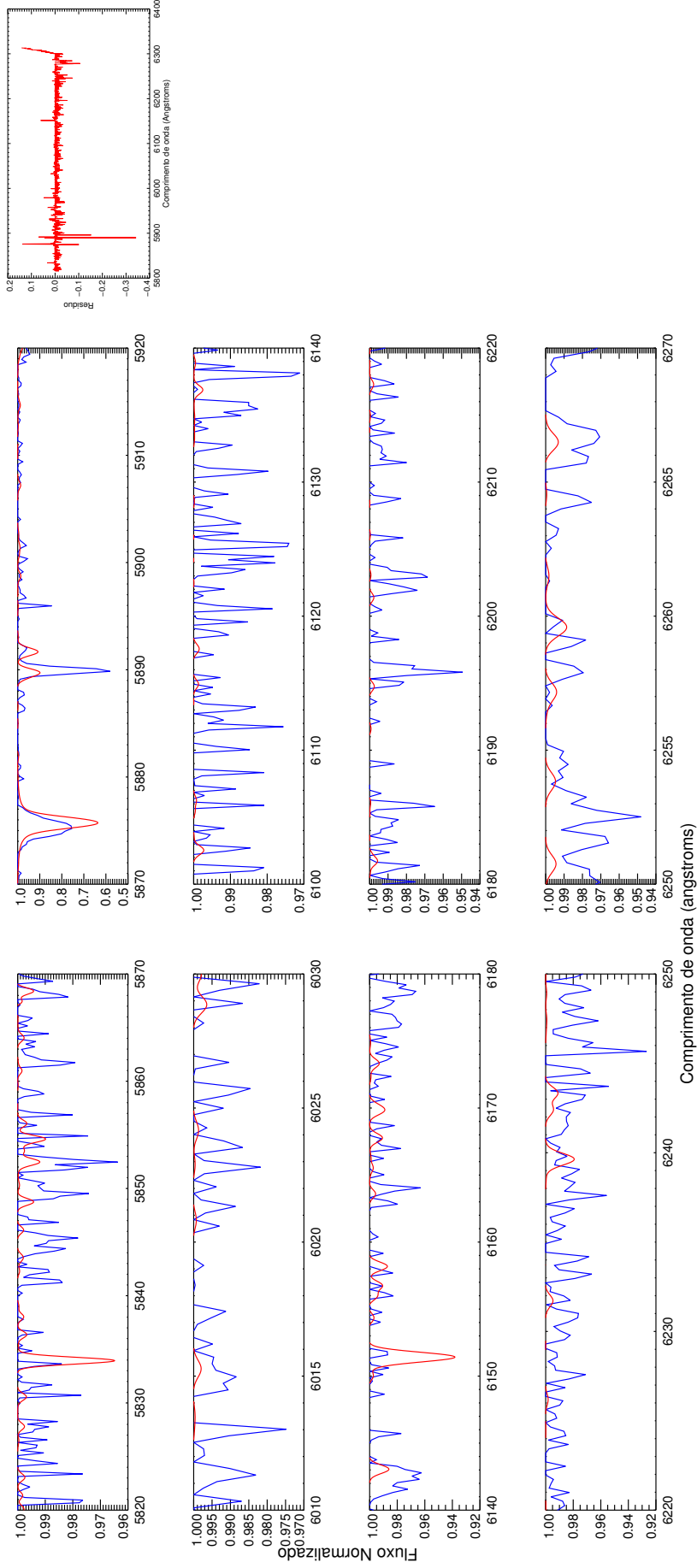


Figura A36: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HIP80574 com seu respectivo resíduo.

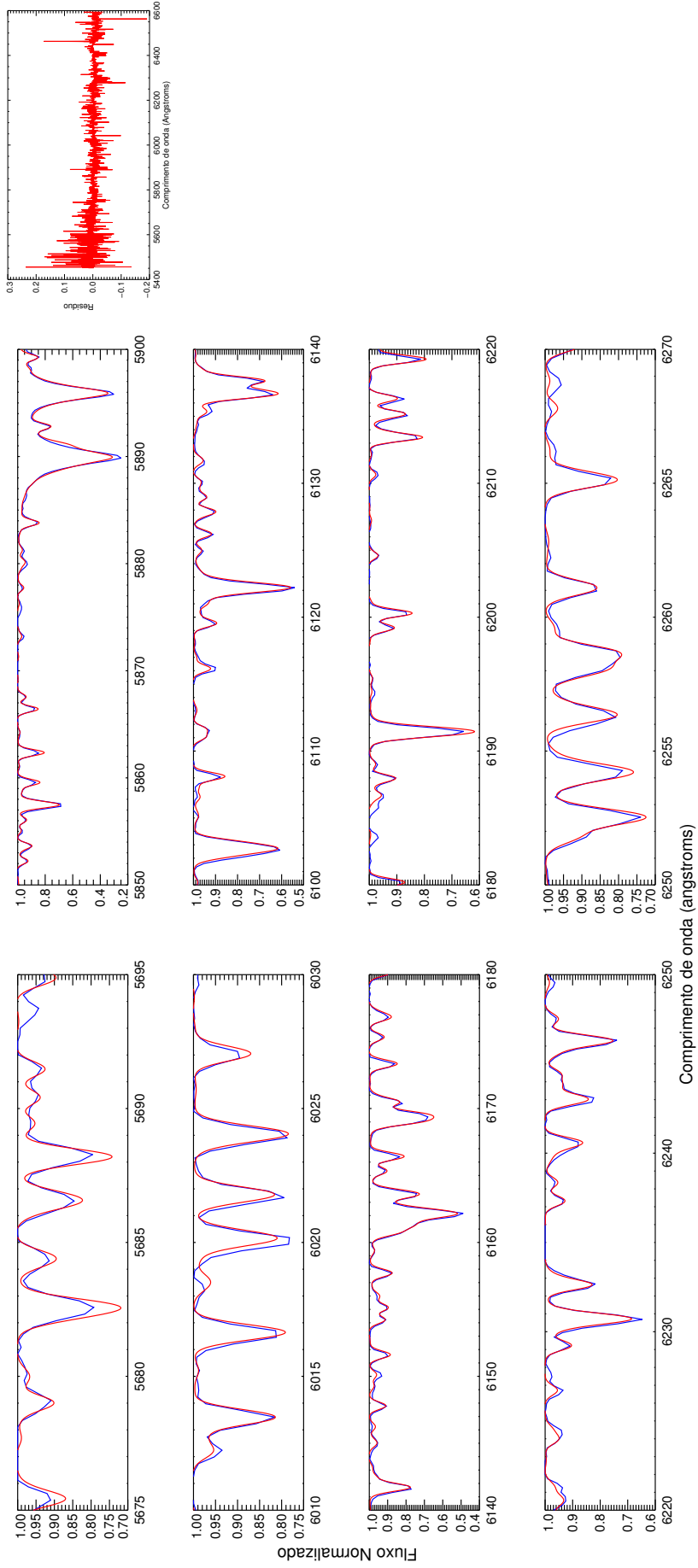


Figura A37: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HR1084 com seu respectivo resíduo.

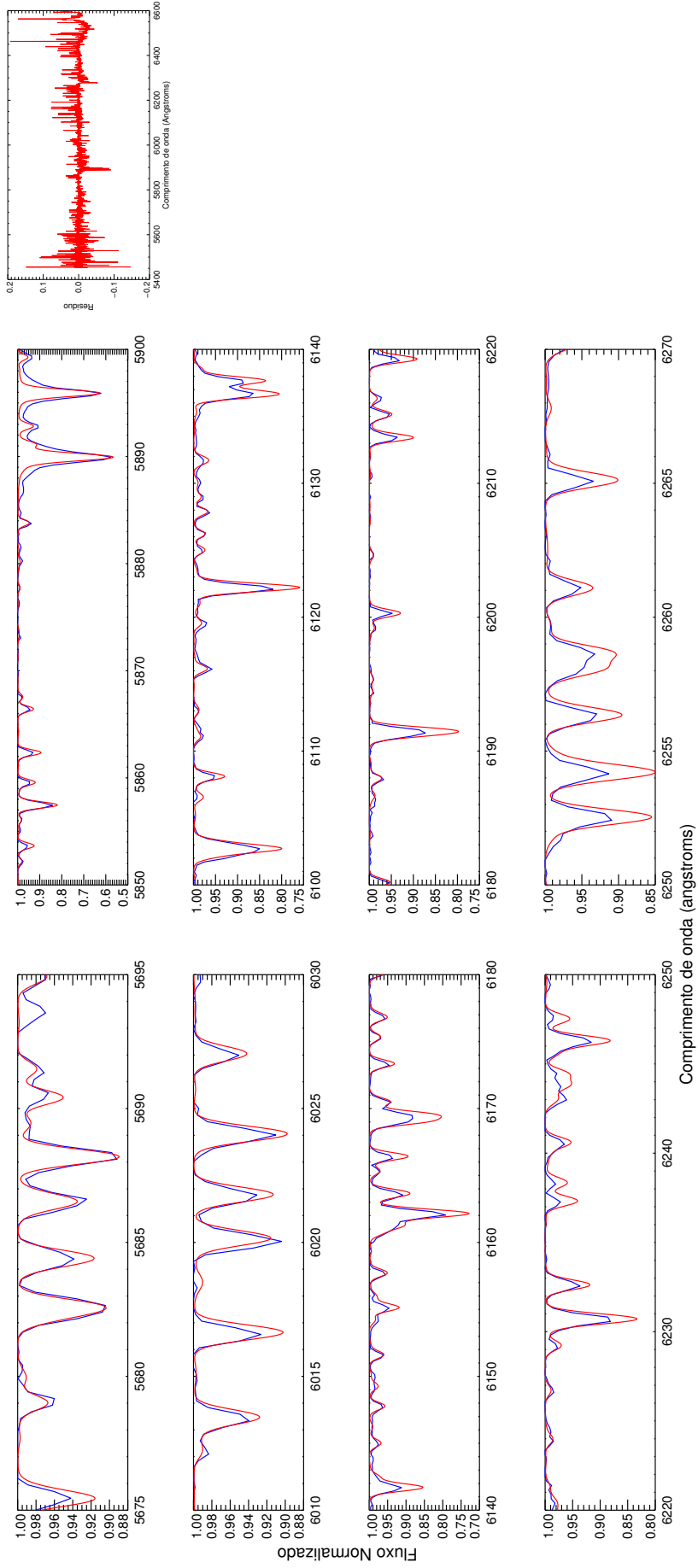


Figura A38: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela HR509 com seu respectivo resíduo.

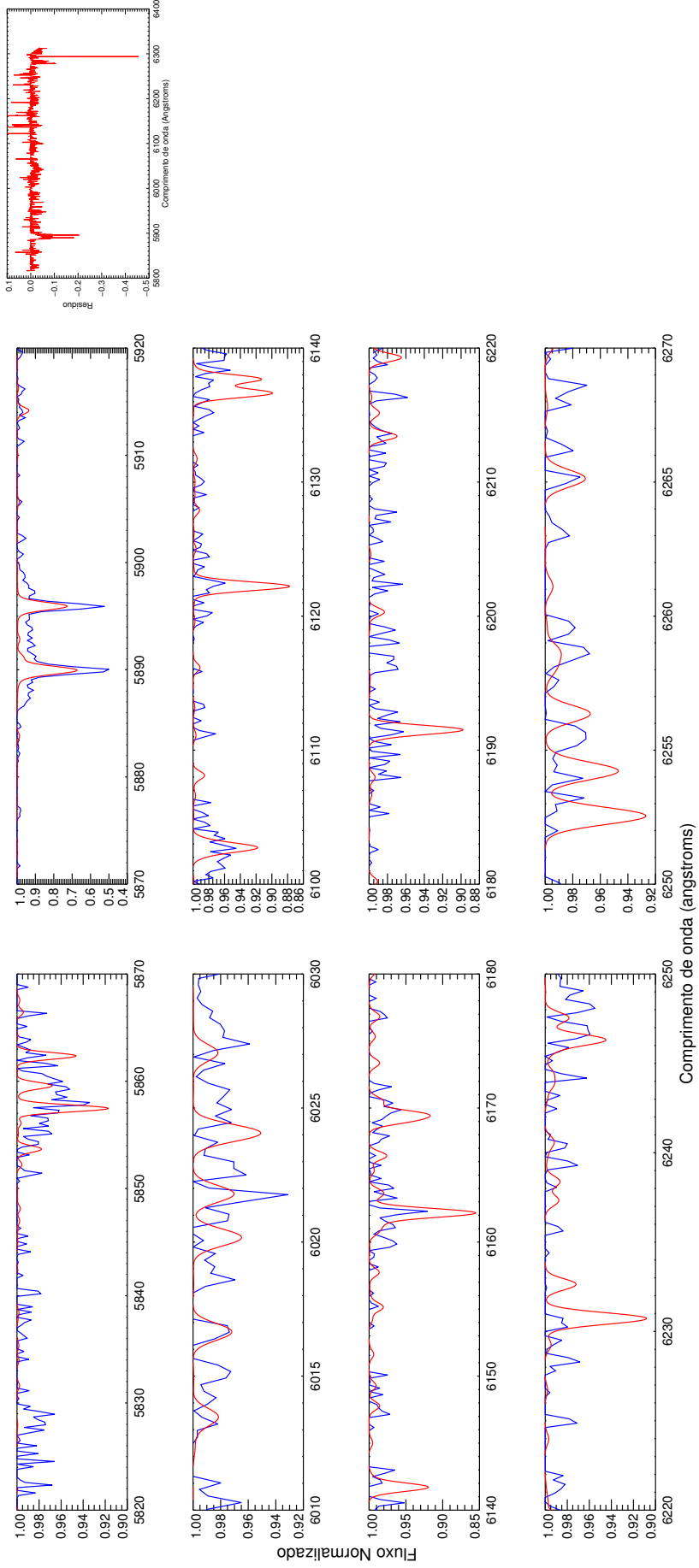


Figura A39: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC470-696-1 com seu respectivo resíduo.



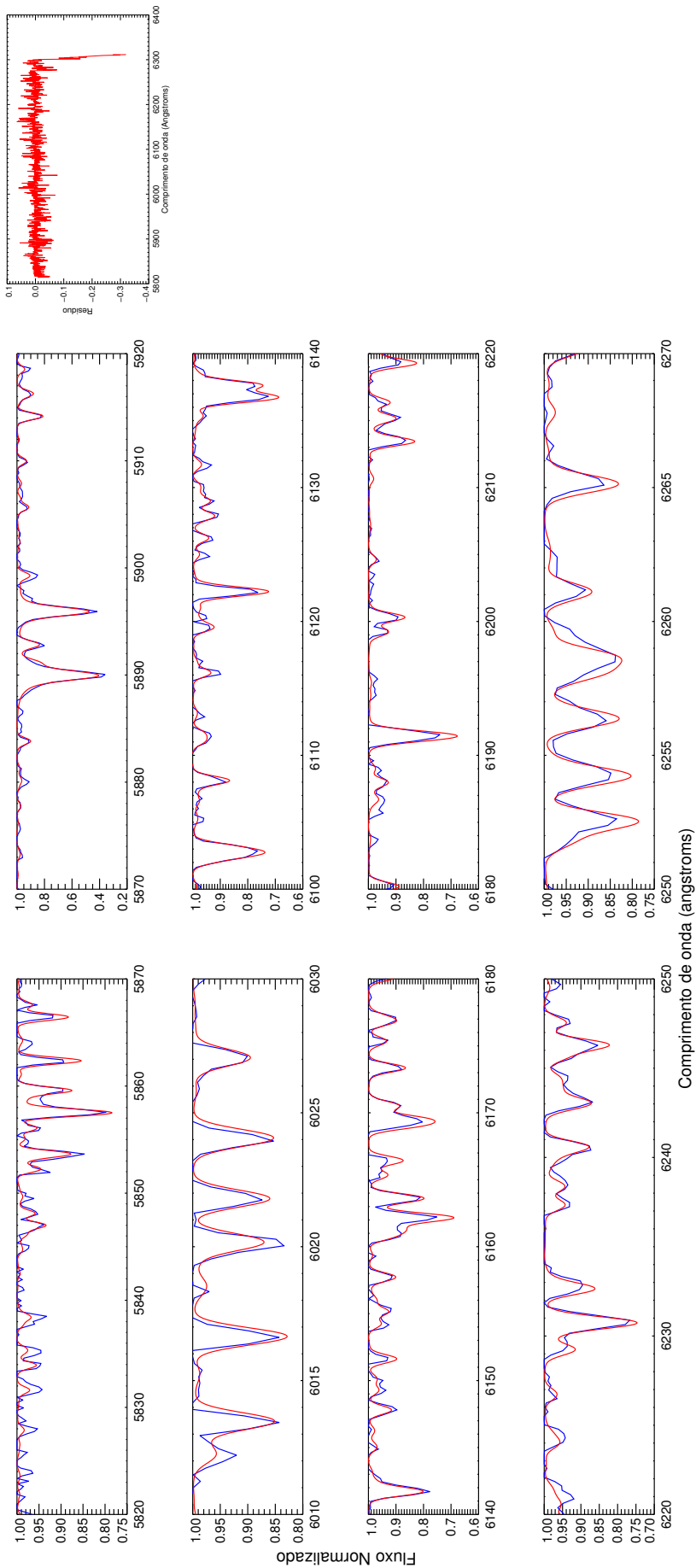


Figura A40: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC5408-2011-1 com seu respectivo resíduo.

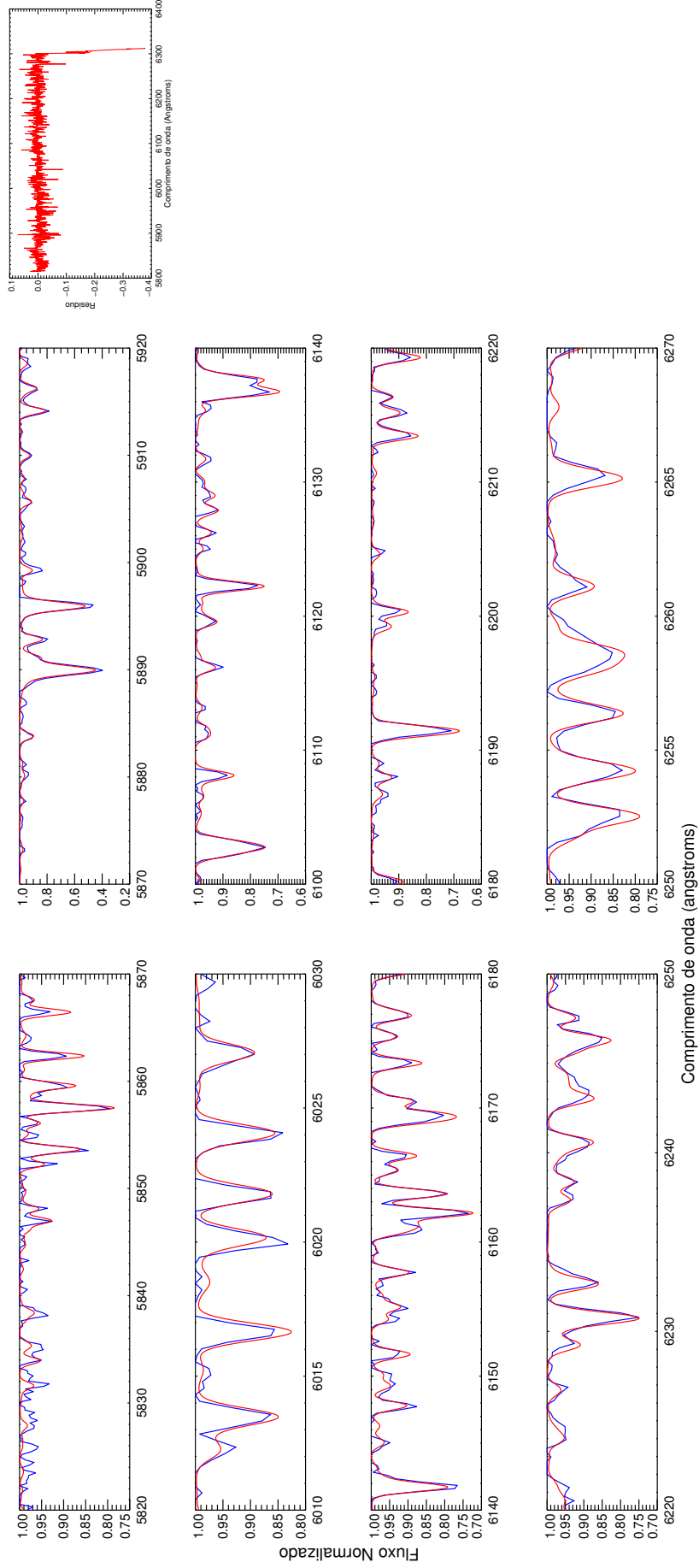


Figura A41: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC6540-4066-1 com seu respectivo resíduo.

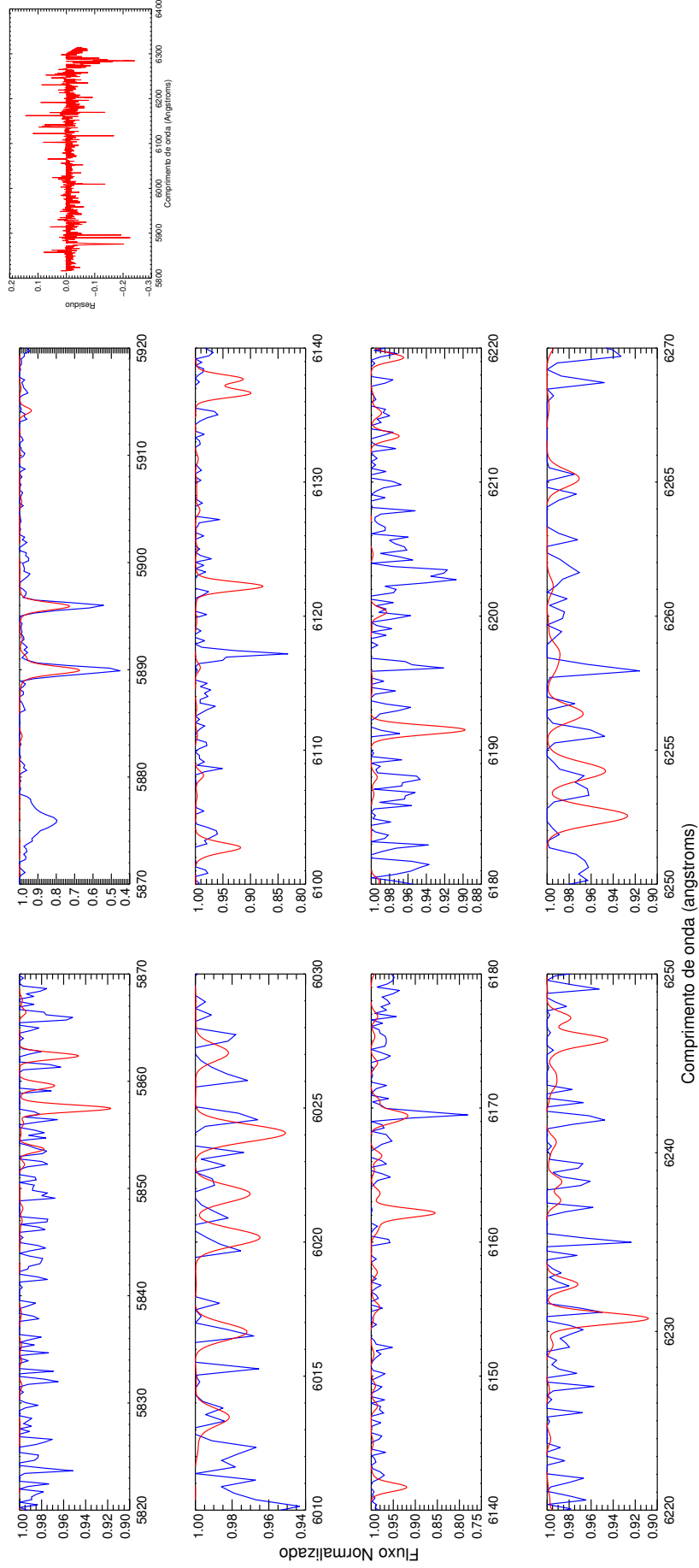


Figura A42: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7380-959-1 com seu respectivo resíduo.

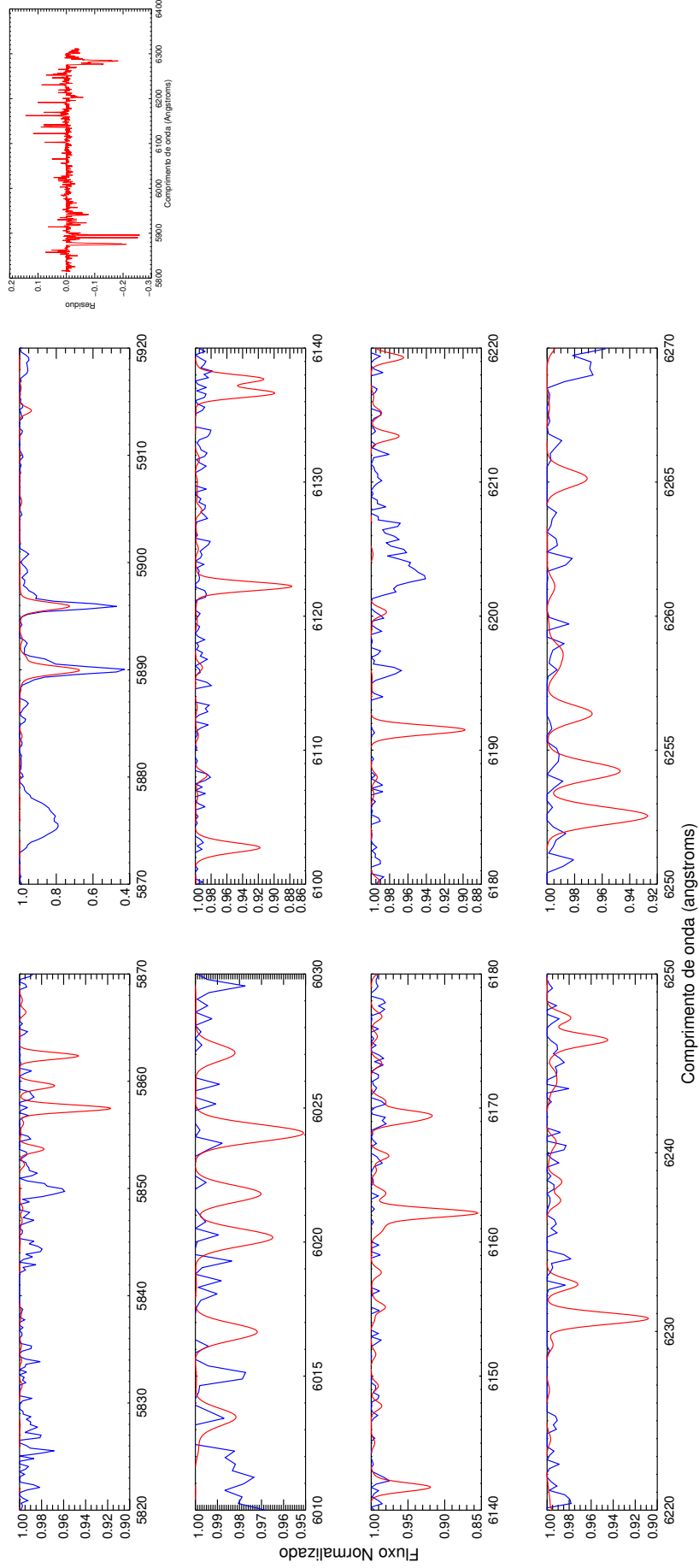


Figura A43: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7674-2085-1 com seu respectivo resíduo.

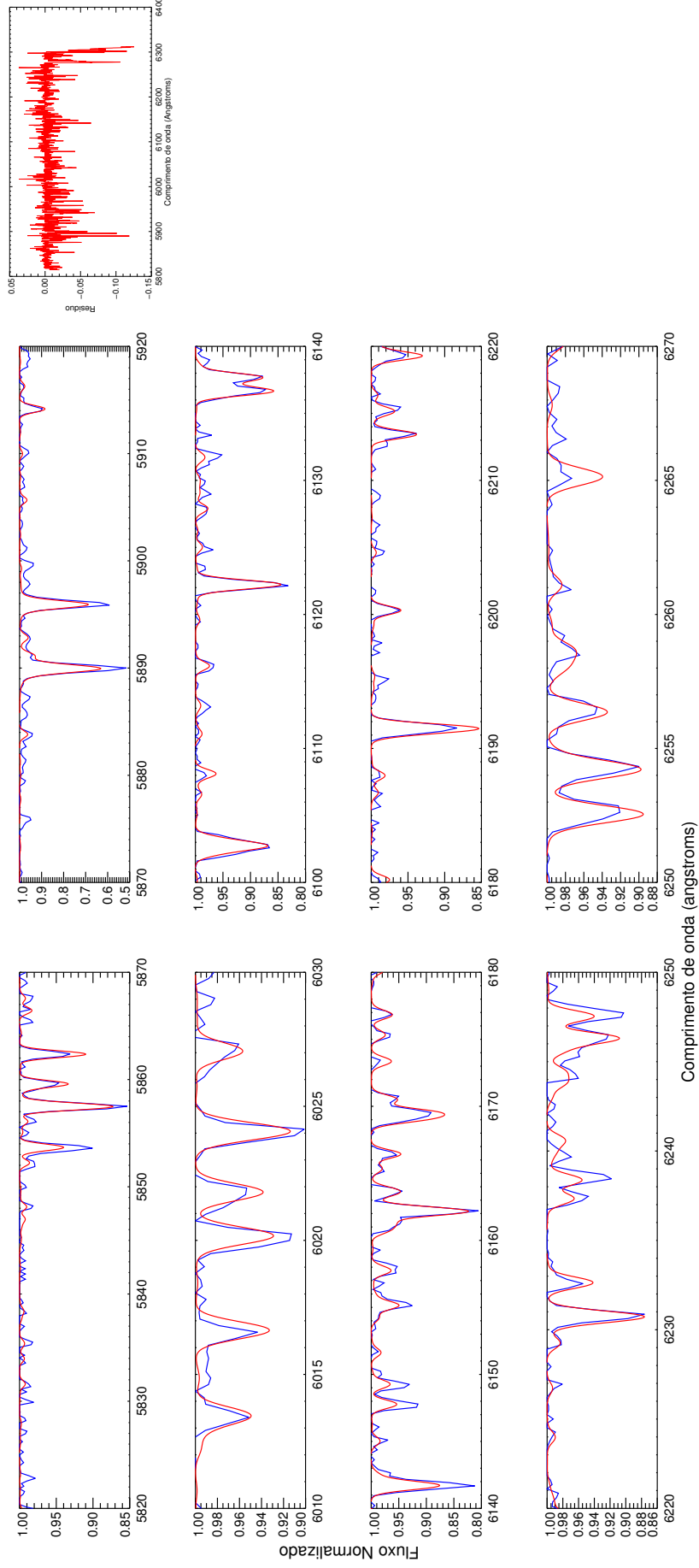


Figura A44: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7674-2589-1 com seu respectivo resíduo.

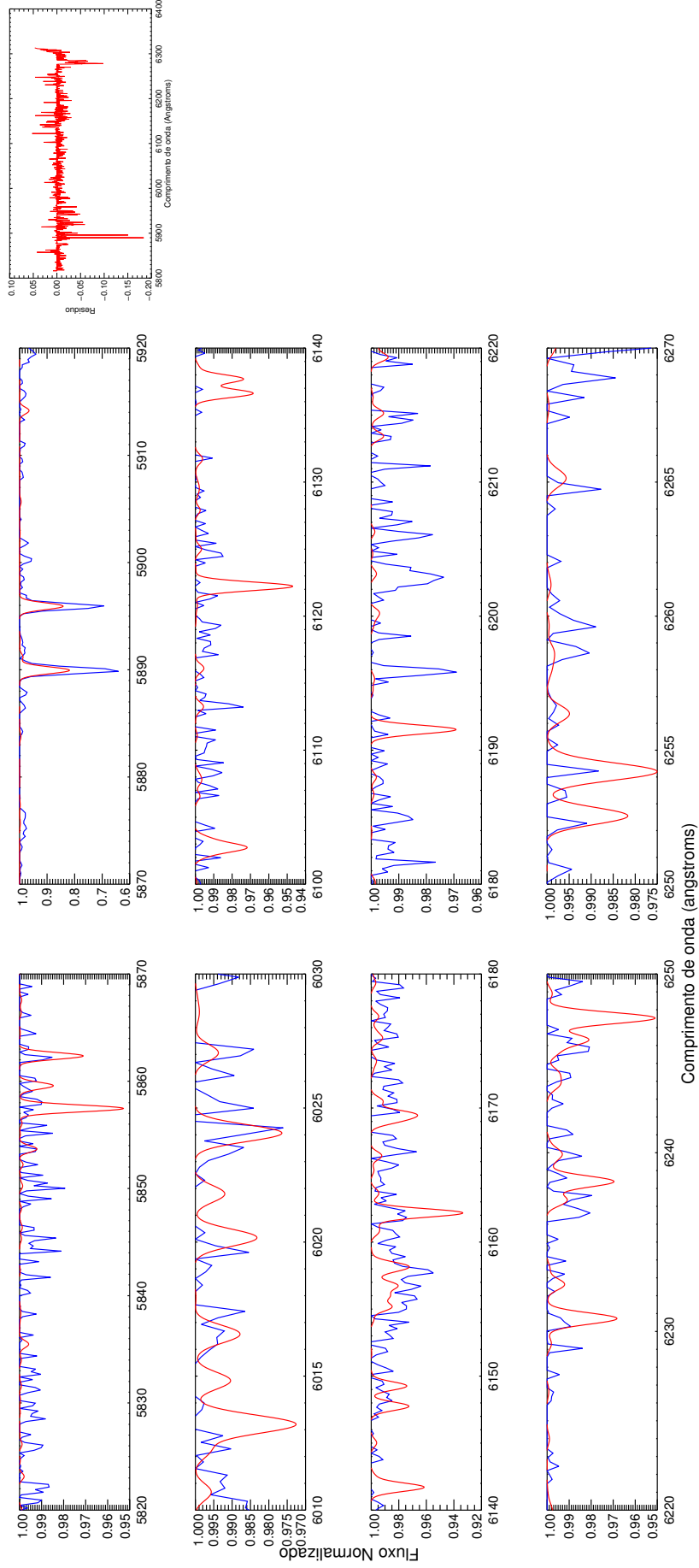


Figura A45: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7857-119-1 com seu respectivo resíduo.

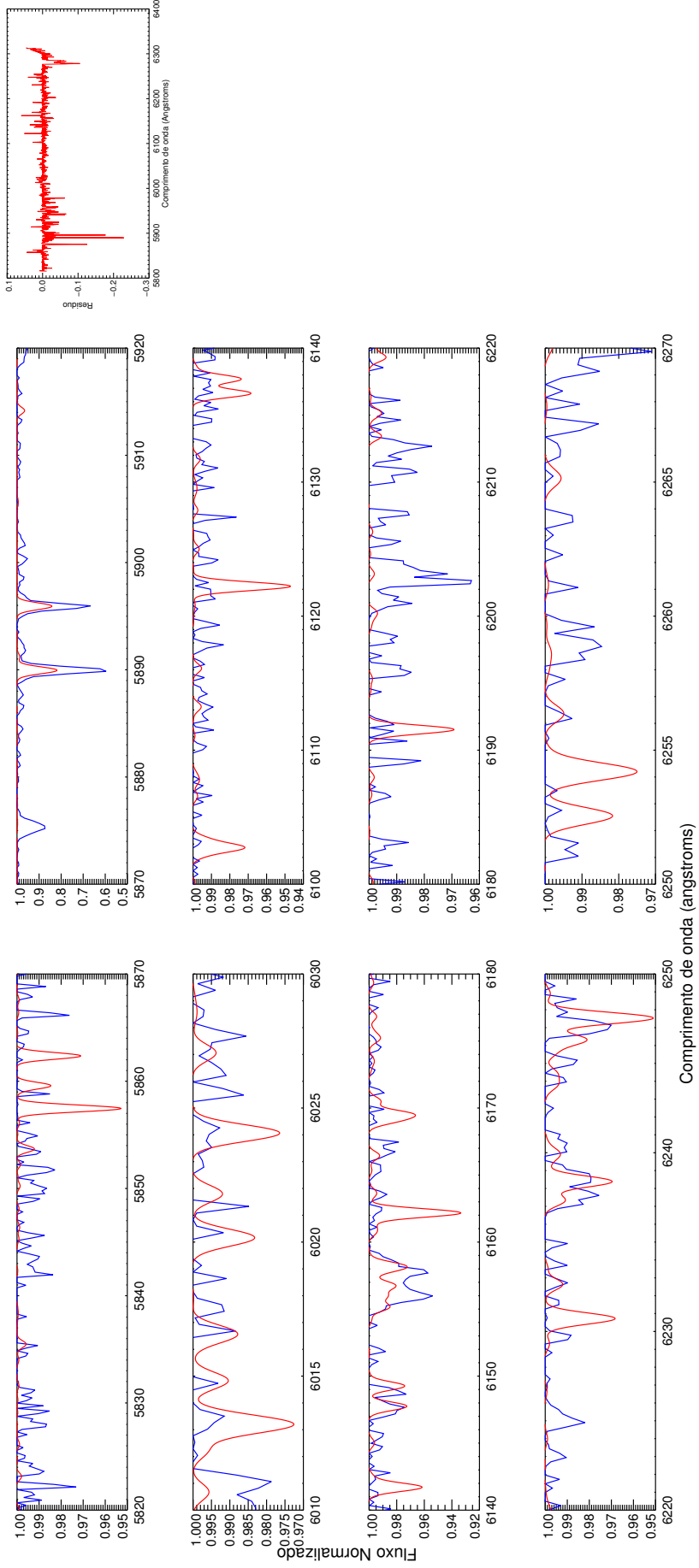


Figura A46: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7857-895-1 com seu respectivo resíduo.

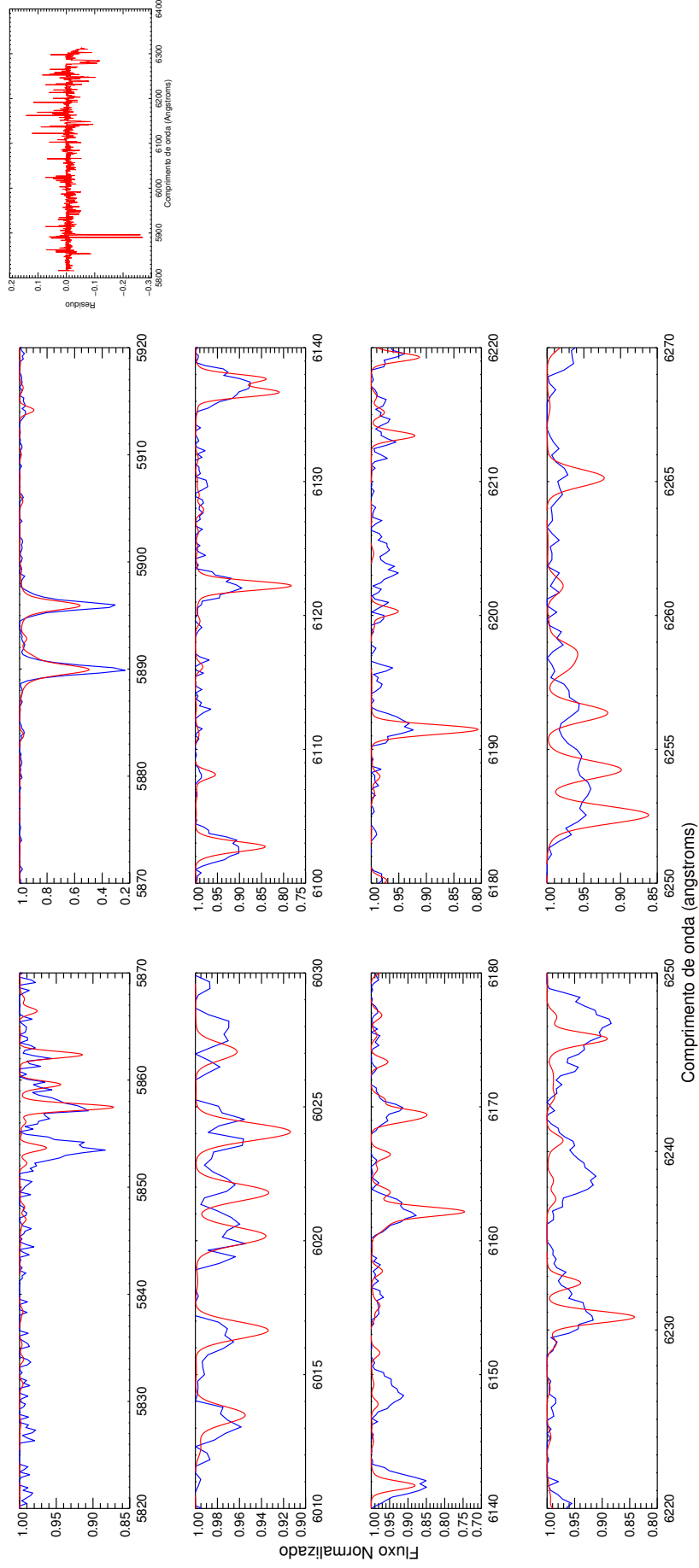


Figura A47: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7872-2044-1 com seu respectivo resíduo.



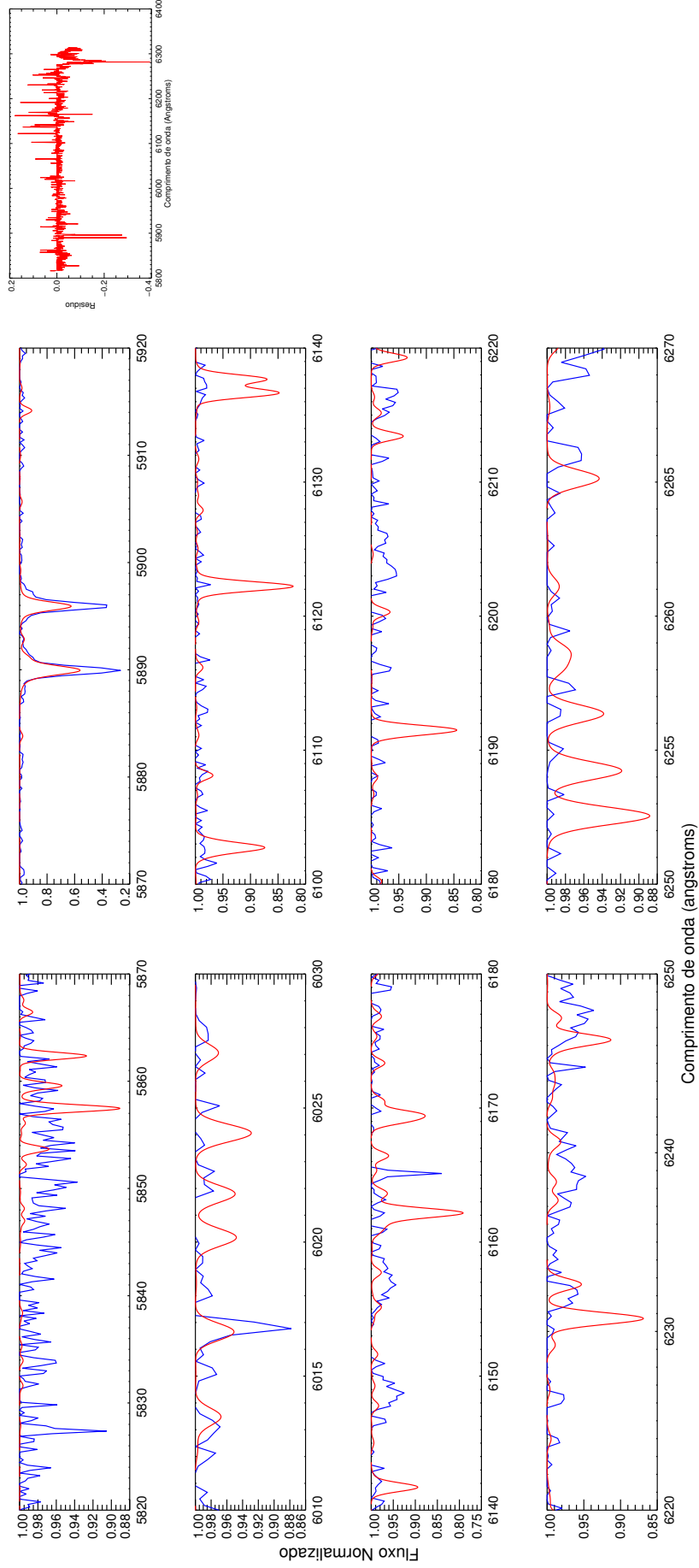


Figura A48: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7876-2443-1 com seu respectivo resíduo.

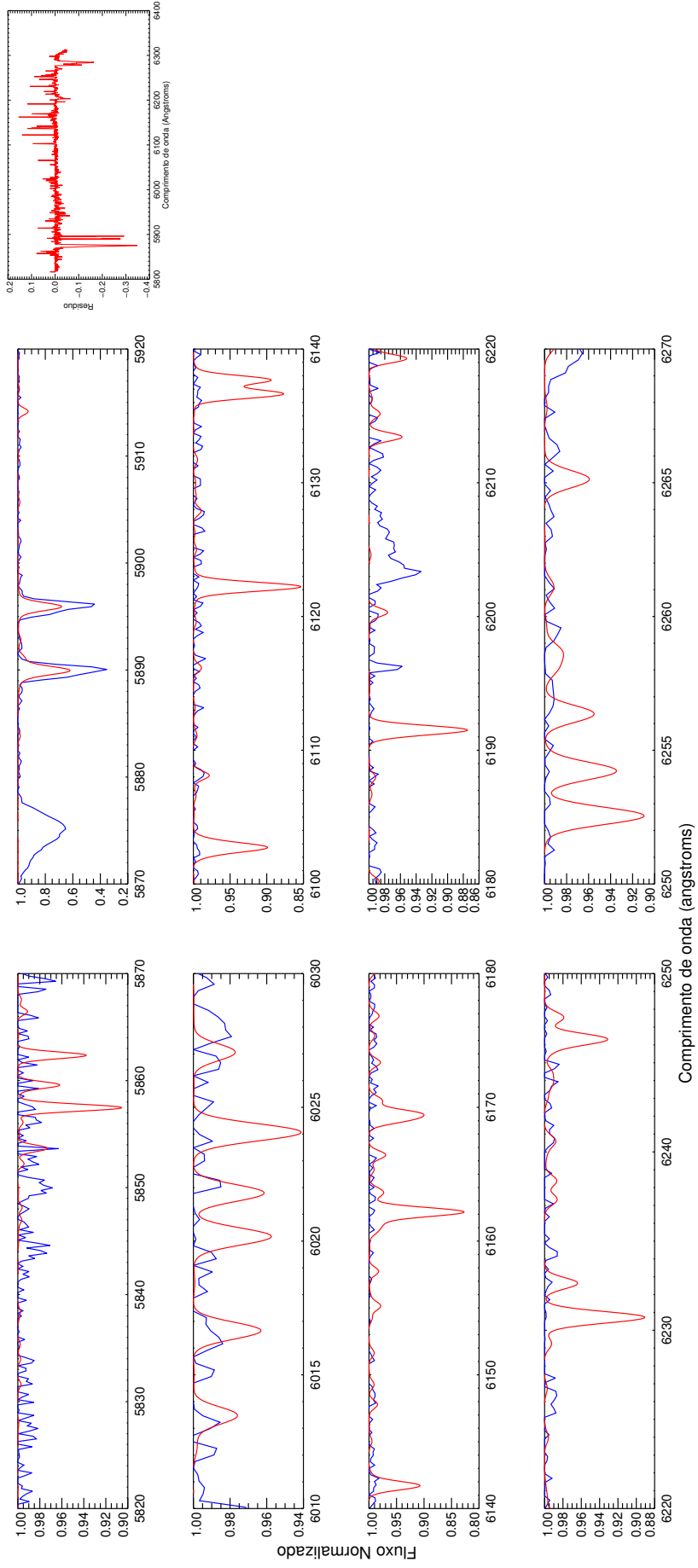


Figura A49: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC7876-309-1 com seu respectivo resíduo.

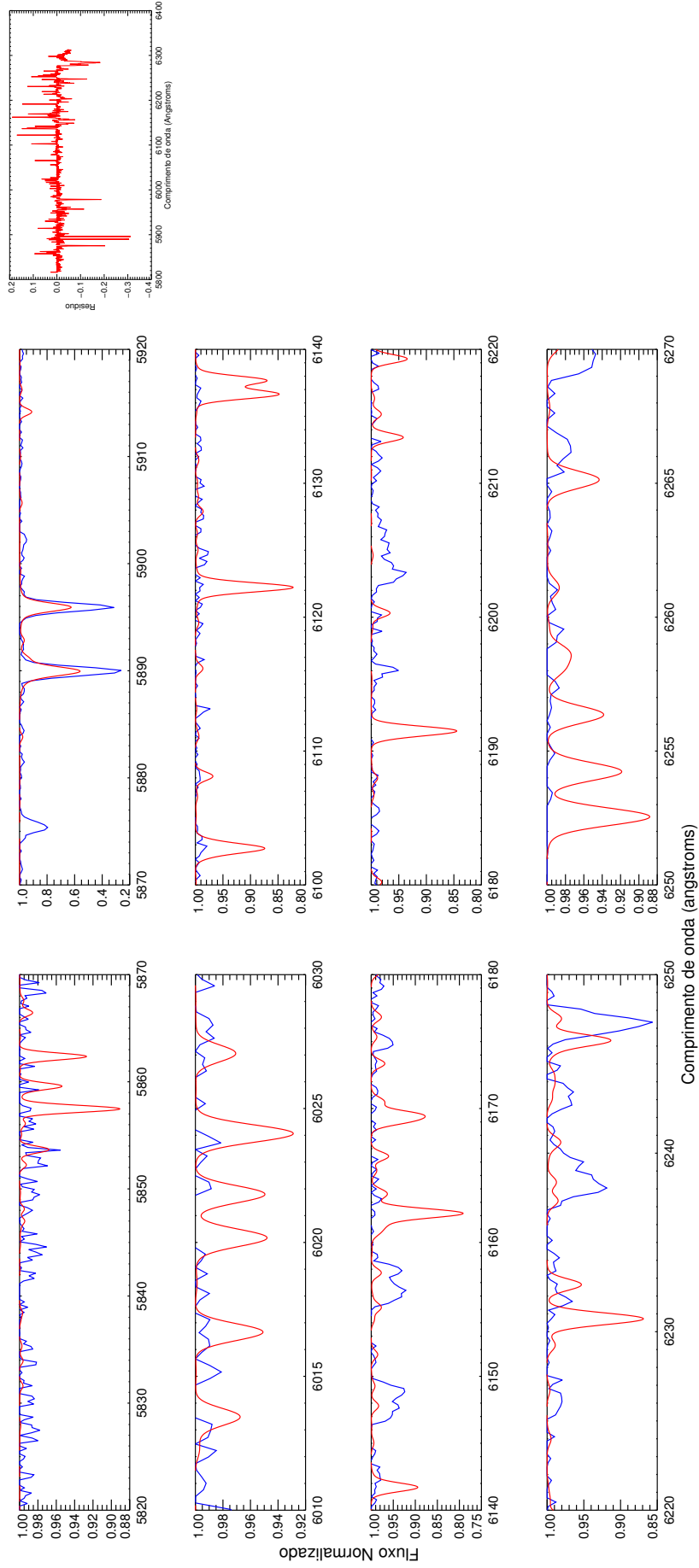


Figura A50: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC8333-1282-1 com seu respectivo resíduo.

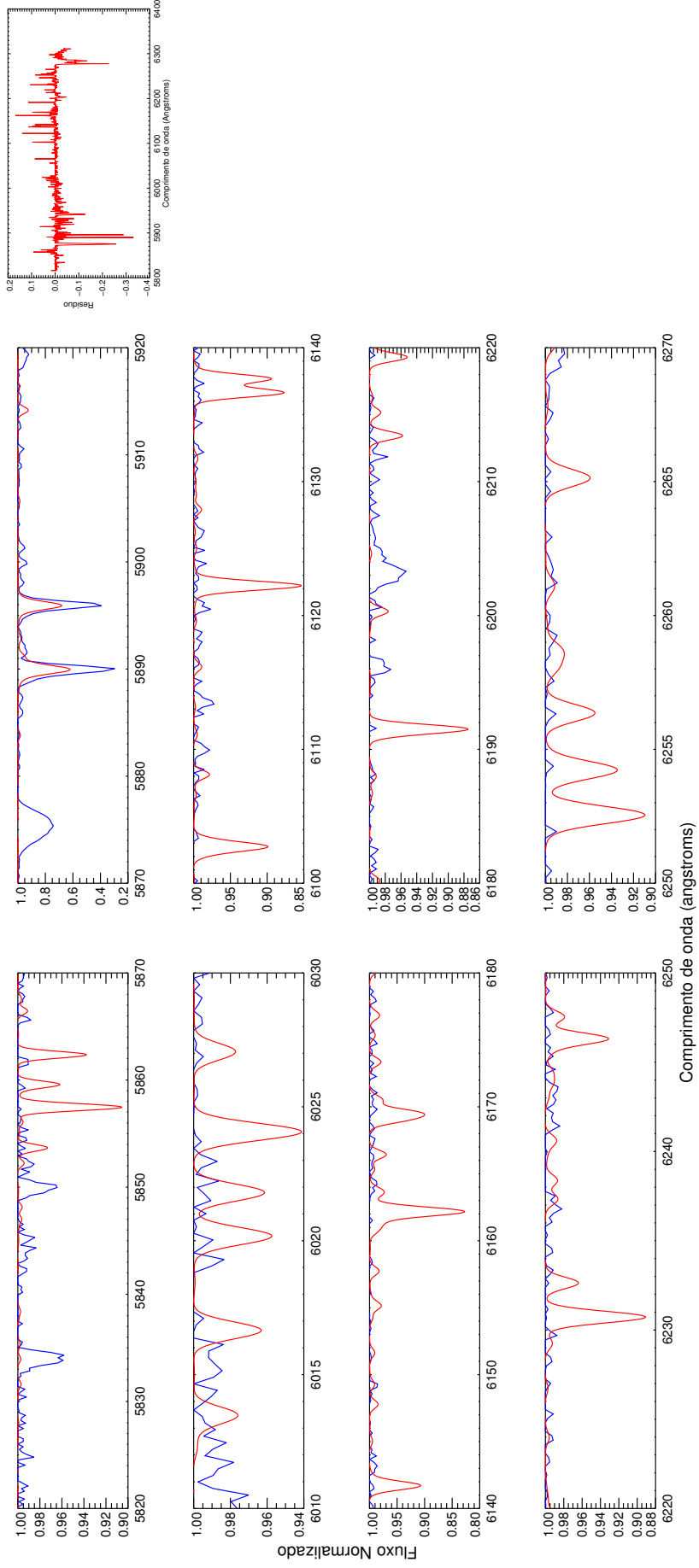


Figura A51: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC8626-2133-1 com seu respectivo resíduo.

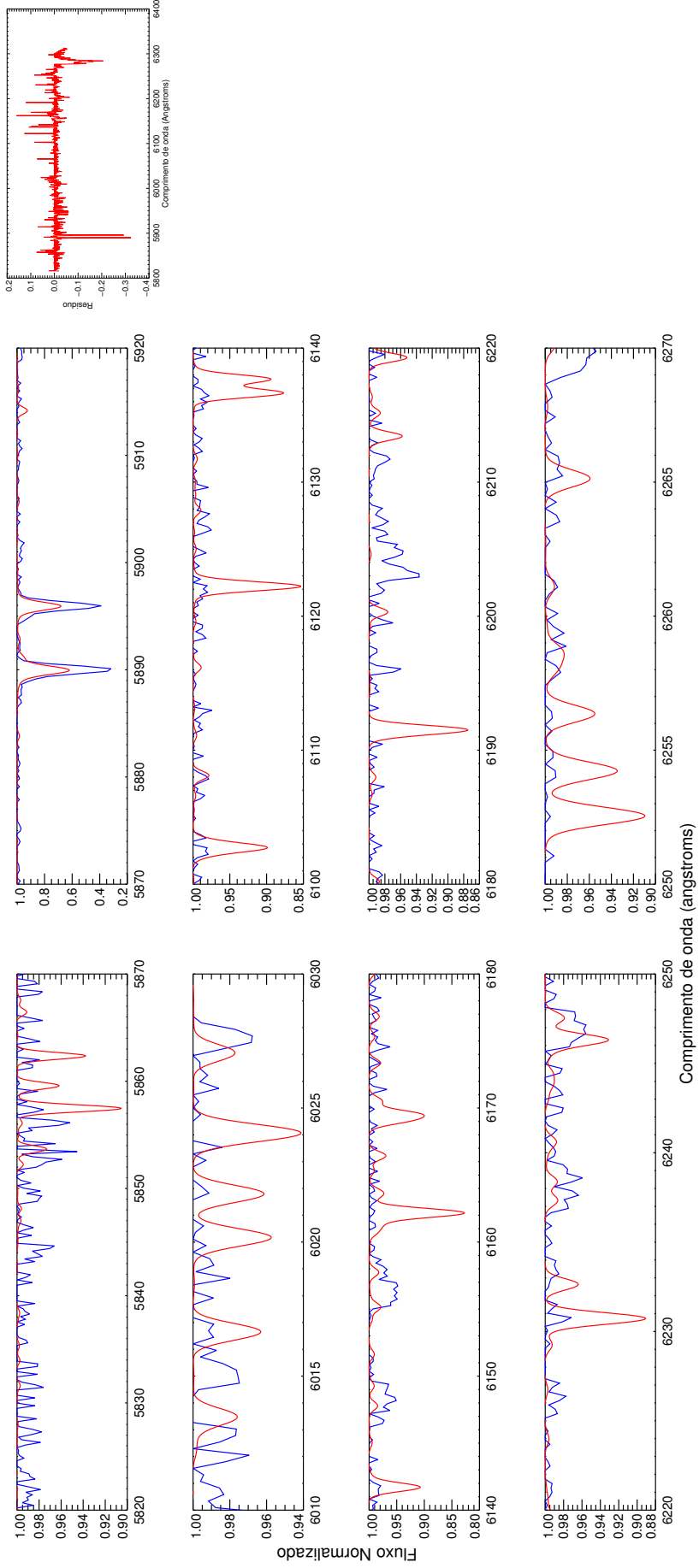


Figura A52: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC8685-69-1 com seu respectivo resíduo.

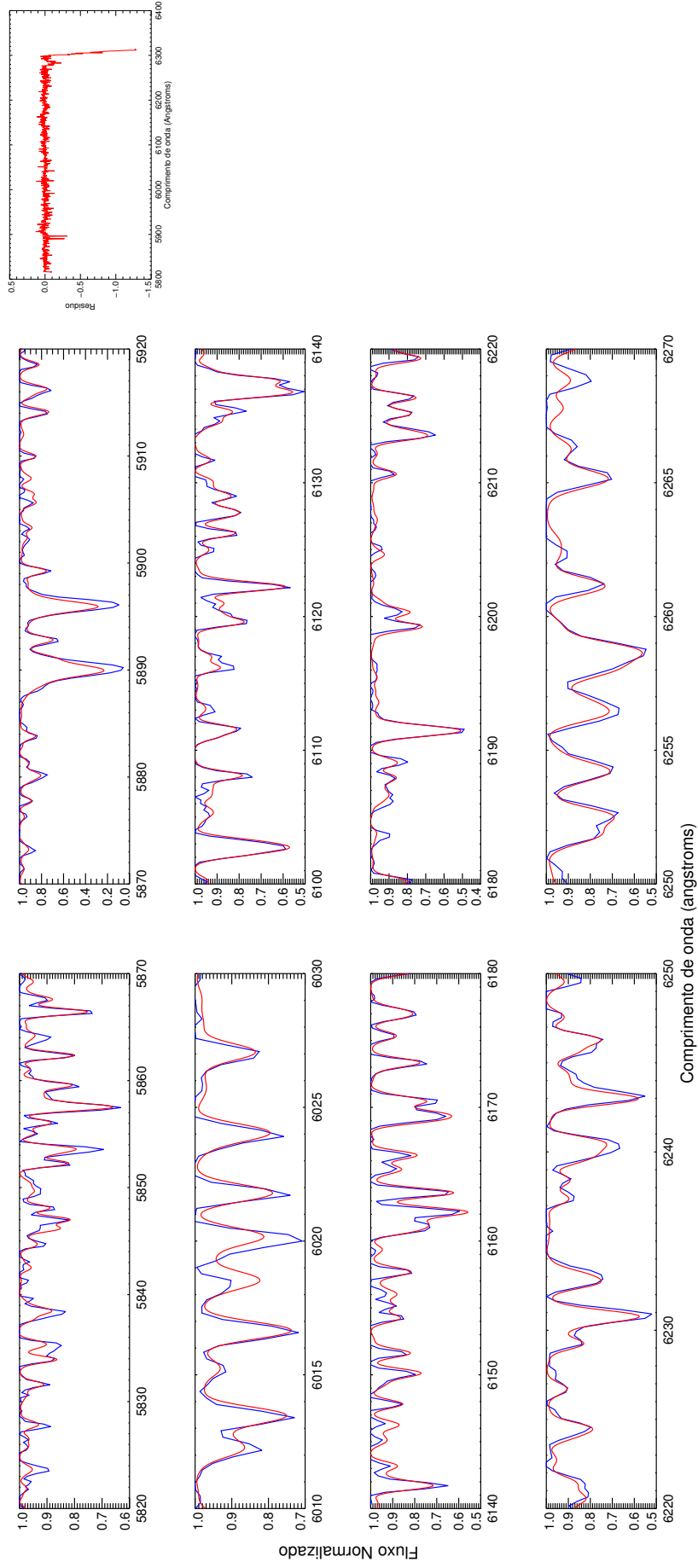


Figura A53: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela TYC9009-1370-1 com seu respectivo resíduo.

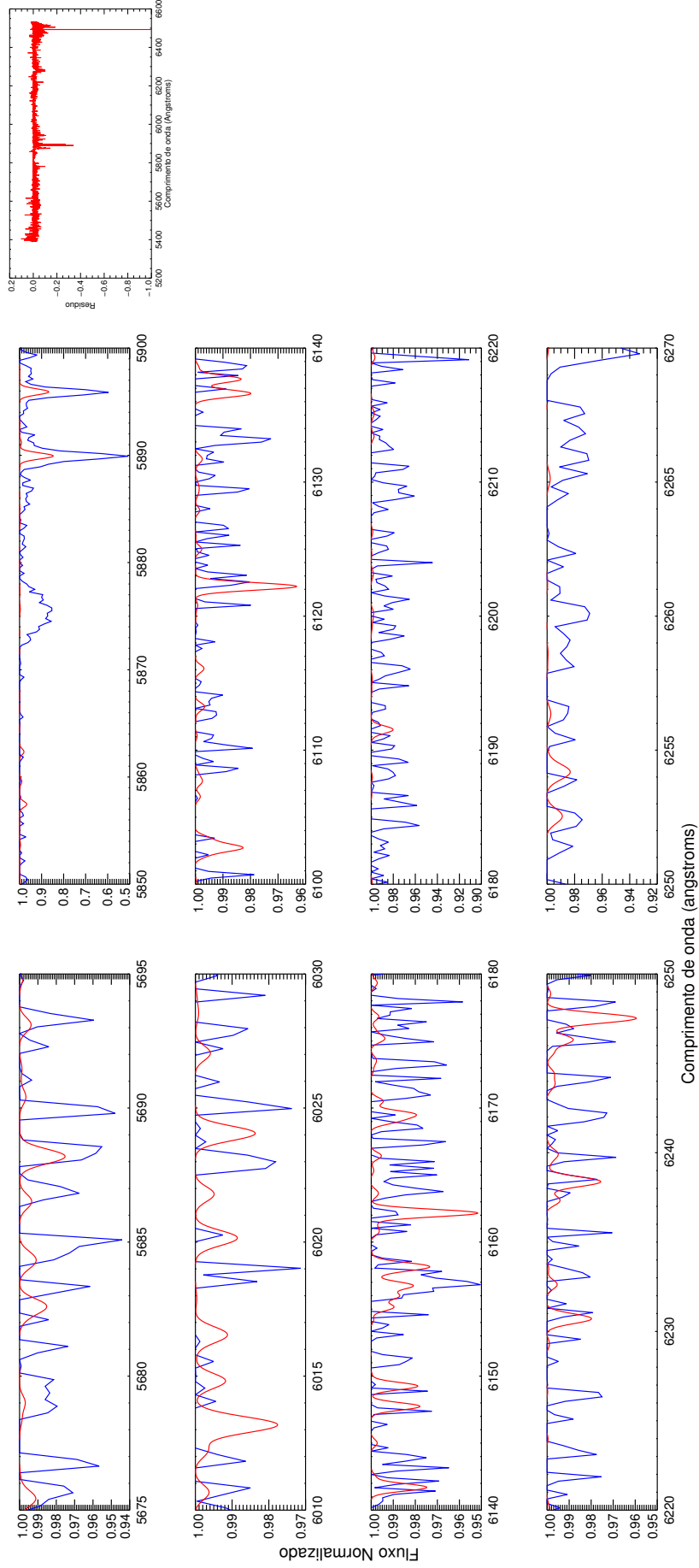


Figura A54: Melhor espectro sintético Coelho (vermelho) e espectro observado (azul) para estrela UAC4-253-028553 com seu respectivo resíduo.