



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Eva Alexandra Leal da Silva

ATIVIDADE CROMOSFÉRICA EM ESTRELAS EVOLUÍDAS

Dissertação no âmbito do Mestrado em Astrofísica e Instrumentação para o Espaço orientada pelo Doutor Ricardo Maranhães Gafeira, pela Doutora Elisa Delgado Mena e pelo Doutor João Gomes da Silva e apresentada ao Departamento da Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Eva Alexandra Leal da Silva

**ATIVIDADE CROMOSFÉRICA EM
ESTRELAS EVOLUÍDAS**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Astrofísica e Instrumentação para o Espaço orientada pelo Doutor Ricardo Maranhães Gafeira, pela Doutora Elisa Delgado Mena e pelo Doutor João Gomes da Silva e apresentada ao Departamento da Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2023

Agradecimentos

Agradeço ao meu marido pelo amor e apoio incondicional.

À minha amiga Jasmine Yin pela amizade e companheirismo.

Aos meus orientadores Dr. Ricardo Gafeira, Dra. Elisa Delgado Mena e Dr. João Gomes da Silva por todo o apoio, disponibilidade e motivação, em todas as fases deste processo.

Aos professores Dr. Ricardo Gafeira, Dr. Nuno Peixinho, Dr. João Fernandes, Dra. Margarida Camarinha e Dr. José Augusto pela inspiração e contributo para o meu crescimento académico.

Agradeço também aos meus colegas Gabriela Lapa, Estevão Silva, Felipe Demigio Pereira, Joel Filho e Ana Vasconcelos por todo o apoio e partilha.

À Dra. Ana Malho pela generosidade.

A todos os elementos do Observatório Geofísico e Astronómico de Coimbra e do Instituto de Astrofísica e Ciências para o Espaço por proporcionarem o ambiente propício para a minha pesquisa.

À Fundação da Ciência e Tecnologia (FCT) pela bolsa que tornou possível a minha investigação.

Por fim, a todos os meus alunos, família e amigos, obrigada por todo o apoio e compreensão!

Resumo

Esta tese tem como objetivo analisar a atividade cromosférica em estrelas evoluídas e investigar de que forma os processos estelares podem afetar a velocidade radial de uma estrela.

O método da velocidade radial é comumente utilizado para detetar exoplanetas. No entanto, a actividade estelar provoca alterações nas linhas espectrais, resultando em variações nos valores de velocidade radial, sendo, por isso, uma das principais limitações na deteção de exoplanetas, e pode levar à ocorrência de resultados falsos positivos. Portanto, é importante compreender os efeitos da actividade estelar nas medições da velocidade radial, de modo a interpretar adequadamente os dados de observação e garantir a deteção precisa de exoplanetas.

De modo a detetar actividade estelar é fundamental o estudo e análise do espectro da estrela, atendendo a possíveis variações e alterações nas linhas de absorção.

Esta investigação visa identificar os melhores indicadores de actividade estelar em estrelas evoluídas e aprofundar o conhecimento sobre a relação entre a actividade estelar e as propriedades físicas e evolutivas das mesmas.

A maioria dos estudos com abordagens similares são focados em estrelas anãs, ressaltando uma lacuna de conhecimento quando se trata de compreender o comportamento da actividade estelar em estrelas evoluídas, o que confere um factor motivador a esta pesquisa.

Palavras-chave: estrelas evoluídas, estrelas gigantes, velocidade radial, actividade estelar, indicadores de actividade estelar, linhas espectrais

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Velocidade Radial	2
1.2 Atividade estelar	2
1.2.1 Oscilações - tipo p	2
1.2.2 Granulação	3
1.2.3 Regiões ativas características da atividade magnética - manchas e regiões faculares	4
1.2.4 Ciclos magnéticos	4
1.3 Indicadores de atividade estelar	5
1.3.1 Indicadores de atividade espectrais	5
1.4 Indicador de atividade cromosférica R'_{HK}	7
1.4.1 Indicadores de atividade de CCF	9
1.5 Fases de evolução estelar	9
1.6 Motivação	11
2 Amostra	13
3 Comportamento geral da atividade estelar em função dos parâmetros estelares	17
3.1 Correlação entre índice R'_{HK} e parâmetros estelares	18
3.2 Índice R'_{HK} na evolução estelar	20
3.3 Índice R'_{HK} no estado evolutivo de estrelas num mesmo cluster	21
4 Correlações entre velocidade radial, indicadores de atividade, e parâmetros estelares	23
4.1 Correlações Índice - Índice	24
4.2 Correlações velocidade radial - Índice	26
4.3 Correlações vs Parâmetros estelares	28
4.4 Correlações no estado evolutivo	29

5	Análise e avaliação da evolução temporal de velocidade radial, FWHM, BIS e $H\alpha$06, $H\alpha$16 e NaI	37
5.1	IC4651 8540	39
5.2	IC4651 9122	41
5.3	NGC2287 87	43
5.4	NGC2345 50	45
5.5	NGC2423 3	47
5.6	NGC2539 246	49
5.7	NGC2539 447	51
5.8	NGC2567 37	53
5.9	NGC4349 127	55
5.10	NGC6705 1101	57
6	Conclusão	59
	Bibliografia	61
Anexo A	Dados informativos sobre as linhas espectrais	67
Anexo B	Tabela de parâmetros estelares da amostra	69
Anexo C	Tabela de parâmetros na determinação do indicador de actividade R'_{HK}	75

Lista de Figuras

1.1	Linha de H α com um filtro central de 0.6 Å (a) e de 1.6 Å (b), no espectro da estrela NGC4349 5	6
1.2	Linha de NaI, no espectro da estrela NGC4349 127	6
1.3	Diagramas HR onde está representado o processo evolutivo, para estrelas com diferentes massas e idades. Fonte: Delgado Mena et al. [17]	10
2.1	Estrelas da amostra distribuídas por cluster em diagrama Hertzsprung-Russell	14
2.2	Distribuição dos valores de temperatura efetiva, aceleração gravítica, metalicidade, massa, luminosidade e idade da amostra em estudo.	15
2.3	Linhas espectrais de estrelas evoluídas na região de HeI, para estrelas do cluster NGC6705	16
3.1	Distribuição dos valores de $\log(R'_{HK})$ em estrelas evoluídas (a preto) e em estrelas maioritariamente da sequência principal (a tracejado vermelho)	18
3.2	Gráficos de dispersão $\log(R'_{HK})$ versus parâmetros estelares	19
3.3	Relação entre atividade estelar e temperatura efetiva das estrelas, com variação de aceleração gravítica codificada por escala de cores.	20
3.4	Diagrama HR com variação de atividade estelar codificada por escala de cores.	20
3.5	Diagramas HR com escala de cor para $\log(R'_{HK})$. Estrelas distribuídas por cluster, com isócronas respetivas.	21
4.1	Gráficos de dispersão entre velocidade radial e FWHM e entre velocidade radial e FWHM, para a estrela NGC2345 50.	23
4.2	Coeficientes de correlação de Spearman entre índices de atividade, em função do indicador de atividade cromosférico R'_{HK} , para 96 estrelas. Atribuição de triângulos vermelhos para p-value <0.01, quadrados verdes para p-value $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e pontos pretos para p-value > 0.05. As linhas horizontais indicam os limites de $l_{rhol} > 0.5$, para os quais consideramos a correlação como "forte".	25
4.3	Coeficientes de correlação de Spearman entre velocidade radial e índices de atividade, em função do indicador de atividade cromosférico R'_{HK} , para 96 estrelas. Atribuição de triângulos vermelhos para p-value <0.01, quadrado verdes para p-value $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e pontos pretos para p-value > 0.05. As linhas horizontais indicam os limites de $l_{rhol} > 0.5$, para os quais consideramos a que correlação como "forte".	26

4.4	Coeficientes de correlação de Spearman entre BIS e $H\alpha 06$, em função de parâmetros estelares, para 96 estrelas. Atribuição de símbolos diferentes para $p\text{-value} > 0.05$, $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e $p\text{-value} < 0.01$	28
4.5	Coeficientes de correlação de Spearman entre BIS e NaI, em função de parâmetros estelares, para 96 estrelas. Atribuição de símbolos diferentes para $p\text{-value} > 0.05$, $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e $p\text{-value} < 0.01$	29
4.6	Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($ \rho > 0.5$) entre velocidade radial e FWHM. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$	30
4.7	Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($ \rho > 0.5$) entre velocidade radial e BIS. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$	31
4.8	Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($ \rho > 0.5$) entre velocidade radial e $H\alpha 06$. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$	32
4.9	Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($ \rho > 0.5$) entre velocidade radial e $H\alpha 16$. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$	33
4.10	Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($ \rho > 0.5$) entre $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$	34
5.1	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela IC4651 8540.	39
5.2	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela IC4651 9122.	41
5.3	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela NGC2287 87.	43
5.4	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela NGC2345 50.	45
5.5	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela NGC2423 3	47
5.6	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela NGC2539 246.	49
5.7	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, da estrela NGC2539 447.	51

5.8	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$, da estrela NGC2567 37.	53
5.9	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$, da estrela NGC4349 127.	55
5.10	Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$, da estrela NGC6705 110.	57

Lista de Tabelas

3.1	Valores de ρ e p -value na correlação de Spearman para $\log(R'_{hk})$ vs. Parâmetros Estelares	19
4.1	Correlações significativas entre velocidade radial e Índices de Atividade	27
5.1	Períodos significativos nos periodogramas	39
5.2	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela IC4651 8540.	40
5.3	Períodos significativos nos periodogramas	41
5.4	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela IC4651 9122.	42
5.5	Períodos significativos nos periodogramas	43
5.6	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2287 87.	44
5.7	Períodos significativos nos periodogramas	45
5.8	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2345 50	46
5.9	Períodos significativos nos periodogramas	47
5.10	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2423 3.	48
5.11	Períodos significativos nos periodogramas	49
5.12	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2539 246.	50
5.13	Períodos significativos nos periodogramas	51
5.14	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2539 447.	52
5.15	Períodos significativos nos periodogramas	53
5.16	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2567 37.	54
5.17	Períodos significativos nos periodogramas	55
5.18	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC4349 127.	56
5.19	Períodos significativos nos periodogramas	57

5.20	Coefficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC6705 1101.	58
A.1	Dados informativos sobre as linhas espectrais. Legenda: ind_id: índice, ind_var: variáveis identificativas (L1 e L2 para linhas centrais; R1 e R2 para linhas de referência), ln_crt: centro da linha (em Å), ln_win: largura da janela centrada em ln_crt (em Å) .	67
B.1	Parâmetros estelares da amostra	70
B.2	Parâmetros estelares da amostra	71
B.3	Parâmetros estelares da amostra	72
B.4	Parâmetros estelares da amostra	73
B.5	Parâmetros estelares da amostra	74
C.1	Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$	76
C.2	Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$	77
C.3	Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$	78
C.4	Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$	79
C.5	Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$	80

Capítulo 1

Introdução

Desde a descoberta do primeiro exoplaneta a orbitar uma estrela do tipo solar em 1995 por Mayor and Queloz [42], tem havido uma considerável dedicação por parte da comunidade científica na procura de planetas que orbitem outras estrelas que não o Sol. Até à data, foram confirmados mais de cinco mil exoplanetas.

Com este propósito, a investigação científica tem-se empenhado em encontrar os métodos mais eficazes para detetar exoplanetas, mas dada a dificuldade em fazê-lo de forma direta, recorre-se a abordagens indiretas para o efeito. Estes baseiam-se na análise de variações específicas que ocorrem na estrela, provocadas pela presença de um planeta a orbitar a mesma.

Existem vários métodos indiretos, como por exemplo a fotometria de trânsitos (ex. Charbonneau et al. [10]) e a astrometria (ex. Benedict et al. [4]). No entanto um dos que mais tem contribuído para a descoberta e confirmação de exoplanetas é o método da velocidade radial (RV). Este método consiste na medição da velocidade da estrela ao longo da linha de visão enquanto ela se move em torno do centro de massa do sistema ao qual pertence (Mayor and Queloz [42]). Este método apresenta algumas limitações, visto que as medições da velocidade radial podem ser influenciadas por sinais decorrentes da atividade estelar, manifestando-se na forma de ruído ou produzindo sinais periódicos que facilmente podem ser confundidos com a presença de planetas a orbitar a estrela em questão (Queloz et al. [53]).

Fenómenos associadas à atividade estelar, tais como oscilações, granulação superficial, manchas, regiões faculares e ciclos magnéticos, introduzem variações nas medições de velocidade radial em estrelas, podendo ser confundidas com as variações de velocidade radial inferidas, pelo efeito Doppler, na presença de um exoplaneta em órbita.

Através deste estudo, pretende-se compreender e analisar de que forma determinados sinais de atividade de estrelas evoluídas se relacionam com as variações da velocidade radial ao longo do tempo, sendo também abordada a relação entre a atividade cromosférica e os parâmetros estelares. Estudos semelhantes foram realizados em estrelas da sequência principal (por exemplo, Gomes da Silva et al. [27]), porém este é um trabalho pioneiro no âmbito das estrelas evoluídas, denotando-se a sua importância para uma maior compreensão dos efeitos estelares na procura e confirmação de exoplanetas.

1.1 Velocidade Radial

As medições da velocidade radial (RV) são obtidas a partir da análise do espectro de luz emitido pela estrela. Para efetuar estas medições, utiliza-se um espectrógrafo, um instrumento capaz de decompor a luz estelar nos vários comprimentos de onda. Ao observar as posições das linhas espectrais no espectro da estrela, e comparando com as posições que essas linhas deveriam ter no caso da estrela estar em repouso, é possível determinar com precisão a velocidade radial da estrela em relação ao observador.

O método da velocidade radial é um dos métodos mais utilizados na detecção e confirmação de exoplanetas. Este método é assim denominado porque tem por base as medições da velocidade radial da estrela ao longo do tempo. Esta abordagem permite a identificação de movimentos estelares em torno de um centro de massa diferente do próprio centro da estrela, o que sugere a possível presença de um exoplaneta a orbitar a estrela em questão.

Esta técnica também é conhecida como espectroscopia de Doppler, pois está fundamentada no fenómeno do efeito Doppler. Este ocorre quando a estrela se aproxima ou afasta do observador, resultando em deslocamentos das linhas espectrais no espectro de luz da estrela. Quando uma estrela se move em direção ao observador, as linhas espectrais são deslocadas para o lado azul do espectro (chamado de deslocamento para o azul), indicando um aumento na frequência da luz, e traduzindo-se em valores de velocidade radial negativos. Por outro lado, quando a estrela se afasta do observador, as linhas espectrais são deslocadas para o lado vermelho do espectro (chamado de deslocamento para o vermelho), indicando uma diminuição na frequência da luz, traduzindo-se em valores de velocidade radial positivos. Se ocorrerem deslocamentos periódicos para o vermelho e para o azul no espectro, temos uma variação periódica da velocidade radial, o que sugere a existência de um planeta a orbitar a estrela (Lovis and Fischer [38]).

Devido à natureza indireta deste método, fenómenos resultantes da atividade estelar podem originar distorções nas linhas espectrais, usadas para a determinação da velocidade radial, e resultar em deslocamentos Doppler artificiais, o que pode influenciar de forma significativa as medições da velocidade radial. Deste modo, o estudo da atividade das estrelas, e dos seus indicadores, bem como a sua relação com a velocidade radial, são fundamentais na procura, detecção e confirmação de exoplanetas (por ex. Saar and Donahue [56], Queloz et al. [53]).

1.2 Atividade estelar

A atividade estelar envolve fenómenos observados na superfície das estrelas, tais como oscilações, granulação superficial, regiões ativas associadas à atividade magnética estelar, como manchas frias e regiões faculares quentes, ou ciclos magnéticos de longa duração.

Segue-se uma breve explicação de cada um destes fenómenos, bem como os indicadores de atividade que são sensíveis a estes fenómenos.

1.2.1 Oscilações - tipo p

As oscilações observadas nas estrelas são movimentos periódicos na fotosfera que resultam, em parte, da convecção turbulenta que ocorre nas camadas externas. Este processo gera ondas de pressão (tipo

p) que se propagam na superfície estelar, induzindo a expansão e a contração das camadas externas da estrela.

À medida que a estrela oscila, a sua superfície aquece durante a compressão e arrefece durante a expansão. Isso resulta em variações na luminosidade e temperatura da estrela, afetando as características do espectro da estrela. Durante as fases de maior luminosidade e temperatura, as linhas espectrais podem ficar mais largas e com fluxos maiores, enquanto que durante as fases de menor luminosidade e temperatura, as linhas podem ficar mais estreitas e com fluxos menores.

Estas alterações nas linhas espectrais estão relacionadas com as variações na velocidade radial da estrela, uma vez que afetam o deslocamento Doppler das linhas. Quando a estrela expande, a luz emitida por ela sofre um deslocamento para o azul devido ao efeito Doppler, e quando ela contrai, a luz desloca-se para o vermelho. Este fenómeno resulta em variações na velocidade radial observada da estrela à medida que as oscilações ocorrem.

A duração das oscilações tipo p, em estrelas do tipo solar, é de alguns minutos, com variações na velocidade radial na ordem dos centímetros por segundo, podendo chegar a vários metros por segundo, no caso de várias oscilações ocorrerem ao mesmo tempo (Schrijver and Zwaan [58]).

Para estrelas mais quentes e em estados evoluídos, os períodos e amplitudes das oscilações tendem a ser mais longos, resultando em períodos e amplitudes de variação da velocidade radial mais elevados (Christensen-Dalsgaard [11]). No caso de estrelas gigantes, os períodos de oscilação variam entre horas e alguns dias. Num caso particular estudado, a estrela NGC2423 3, estima-se que, considerando os seus parâmetros estelares, as suas oscilações tenham uma escala de tempo de aproximadamente 20,8 horas (Delgado Mena et al. [14]).

Para estrelas da sequência principal, o efeito deste fenómeno pode ser atenuado usando estratégias de observação específicas (Santos et al. [57]; Dumusque et al. [22]).

1.2.2 Granulação

O calor proveniente das camadas mais profundas da estrela faz com que o material mais quente emerja até à superfície onde depois arrefece libertando energia por radiação. Este plasma mais frio e por consequência mais denso, afunda-se criando assim células de convecção. Estas células apresentam regiões mais brilhantes no seu centro que correspondem ao plasma emergente, e regiões mais escuras que correspondem ao plasma mais frio que se afunda.

Os fenómenos de granulação estelar influenciam as medições da velocidade radial, tendo em conta que estes provocam deslocamentos e assimetrias nas linhas espectrais (Cegla et al. [9]).

Como a área total dos grânulos mais brilhantes (e quentes, movimento de matéria na direção do observador) no disco estelar é maior que a área ocupada pelas zonas intra-granulares mais escuras (e frias, movimento de matéria na direção contrária ao do observador), o efeito total da granulação é um desvio para o azul das linhas espectrais (Dravins [20]).

A granulação ocorre em escalas de tempo que podem variar entre minutos e horas, e a sua influência na velocidade radial pode ser atenuada através do uso de estratégias de observação cuidadas (Dumusque et al. [22]).

1.2.3 Regiões ativas características da atividade magnética - manchas e regiões faculares

Campos magnéticos intensos na superfície de estrelas são responsáveis pela formação de várias estruturas na fotosfera e cromosfera estelar, nomeadamente regiões faculares e manchas estelares, para além de atenuarem localmente a convecção (por ex. Meunier et al. [48], Saar and Donahue [56]).

Essas regiões ativas podem causar várias alterações nas linhas espectrais incluindo deslocamentos em comprimento de onda e assimetrias que provocam variações na velocidade radial medida (ex. Dumusque et al. [21]; Meunier [47]).

Estes fenómenos e as suas características, que podemos observar da atividade estelar, serão influenciados pela rotação da estrela, na medida em que se as manchas e as zonas faculares se deslocam no disco da superfície estelar. Isto leva a que, dependendo do tipo de região ativa que se trata, haja alterações provocadas por estes fenómenos no espectro da estrela, provocando assim variações na velocidade radial medida, com uma periodicidade equivalente ao do período de rotação desta (Desort et al. [18]).

Devemos ainda considerar o facto de que campos magnéticos fortes, quando presentes na superfície estelar inibem a granulação localmente, diminuindo o deslocamento geral para o azul provocado pela granulação total no disco (Gray [29]), o que, modelado pela rotação da estrela, irá provocar mais uma variação periódica na velocidade radial medida.

Mesmo que haja um equilíbrio dos efeitos que as manchas solares e as plagues provocam nas linhas espectrais, deve-se considerar que a atividade magnética nestas regiões ativas inibe a convecção, aumentando o ruído no espectro, e consequentemente, nas medições da velocidade radial (Meunier et al. [48]).

Com o passar do tempo, estrelas tendem a girar mais lentamente, o que reduz a atividade do dínamo magnético e diminui a proeminência das áreas ativas (Wilson [63]; Skumanich [59]). Isso faz com que estrelas jovens e rápidas apresentem variações mais intensas nas velocidades radiais em comparação com estrelas mais velhas.

1.2.4 Ciclos magnéticos

O Sol segue um ciclo magnético de 11 anos, caracterizado por variações substanciais na quantidade de manchas solares ao longo desse período. Nas fases de mínima atividade podem não ocorrer manchas durante vários anos, e em fases de maior atividade estelar, as manchas podem preencher até, cerca de, 0.2% do disco. Estes ciclos magnéticos também são observados noutras estrelas com períodos que variam entre poucos anos e décadas (Baliunas et al. [3]; Wilson [64]).

O facto da quantidade de regiões ativas numa estrela variar consoante o seu ciclo magnético, origina ruído a longo prazo. Estes ciclos podem resultar em oscilações na velocidade radial, que podem atingir desde vários a dezenas de metros por segundo em amplitude (Lovis et al. [37], Gomes da Silva et al. [28]), assemelhando-se a sinais provenientes de exoplanetas em órbitas distantes da estrela.

1.3 Indicadores de atividade estelar

Existem várias formas de identificar e medir fenômenos de atividade estelar. Os mais usados são geralmente baseados na medição do fluxo em linhas espectrais sensíveis a variações de temperatura na cromosfera, provocadas por fortes campos magnéticos (ex. Boisse et al. [6]; Gomes da Silva et al. [27]) ou indicadores de variação na estrutura das linhas espectrais como largura, profundidade ou assimetria (ex. Queloz et al. [53]). De seguida iremos descrever alguns destes indicadores de atividade.

1.3.1 Indicadores de atividade espectrais

Estes indicadores baseiam-se na medição de características de linhas espectrais individuais, sensíveis a alterações provocadas por atividade magnética. Uma das formas mais simples e usadas de medir a variação da atividade usando estas linhas espectrais é medindo o fluxo no centro da linha, normalizando esse valor pelo fluxo obtido em zonas de referencia não sensíveis a variações de atividade (ex. Boisse et al. [6]). As linhas mais frequentemente usadas no espectro da zona do óptico são as de Ca II H&K, H α , NaI ou HeI. Estas linhas são formadas a diferentes altitudes na atmosfera estelar e seguem diferentes fenômenos de atividade. De seguida iremos falar sobre algumas destas linhas e como calcular os seus índices de atividade.

H α

A linha de H α é uma das linhas sensíveis à atividade mais usadas. Com o seu centro na zona mais vermelha do espectro óptico (6562.808 Å), tem o benefício de poder ser usada em estrelas mais frias (e vermelhas) em que a maior parte do fluxo estelar está contido nessa região espectral. Sabe-se que o fluxo no centro da linha H α segue o ciclo magnético do Sol (Livingston et al. [35]) e tem sido sistematicamente usado para a deteção de falsos positivos na procura de planetas extrasolares (ex. Faria et al. [23]). Devido à grande profundidade da linha, o uso de filtros de diferentes larguras para medir o seu fluxo produz resultados diferentes: o centro da linha é mais sensível a fenômenos a maior altitude na cromosfera (por exemplo fáculas) enquanto a sua estrutura lateral (asas) dão informação sobre zonas mais próximas da fotosfera (ex. Mauas [41]). Desta forma, o uso de bandas diferentes no cálculo do índice de H α leva a diferentes relações entre este e outros índices geralmente usados para medir atividade, como é o caso do indicador baseado nas linhas de Ca II H&K (Gomes da Silva et al. [24]).

A região H α do espectro eletromagnético de uma estrela corresponde à linha espectral de absorção do hidrogénio. Nessa região, podemos identificar o centro da linha, em que há maior absorção, aos 6562.808 Å, sendo este o valor central do comprimento de onda referente ao fluxo de H α . Esse valor é crucial para o cálculo dos índices espectrais. De referir que um índice espectral é dado pela razão entre o valor do fluxo central e os valores de fluxo das regiões contínuas adjacentes às linhas de atividade. Em H α , podemos estudar dois índices espectrais importantes: H α 06 e H α 16. H α 06 tem banda de comprimento de onda com largura de 0.6 Å, tomando valores compreendidos entre 6562.508 Å e 6563.108 Å. Já H α 16 tem banda de comprimento de onda com largura de 1.6 Å, sendo que pertence a um intervalo de valores entre 6562.008 Å e 6563.608 Å. H α 06 é um indicador de atividade em regiões

mais altas na cromosfera, enquanto $H\alpha_{16}$ é um indicador de atividade em regiões mais próximas da fotosfera.

Na Fig. 1.1, apresentam-se as diferentes bandas de comprimento de onda estudadas nesta investigação, das quais $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$.

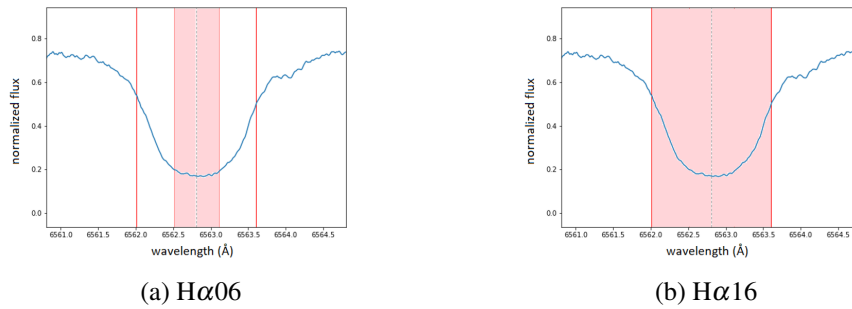


Fig. 1.1 Linha de $H\alpha$ com um filtro central de 0.6 Å (a) e de 1.6 Å (b), no espectro da estrela NGC4349 5

NaI

O índice espectral NaI é usado para estudar as características das linhas de absorção de sódio no espectro estelar, havendo duas linhas de absorção adjacentes (D1 e D2), como é possível visualizar na Fig. 1.2. O índice espectral de NaI é determinado em comprimentos de onda iguais a 5889.950Å e 5895.920Å, cujas bandas têm larguras de 0.5 Å.

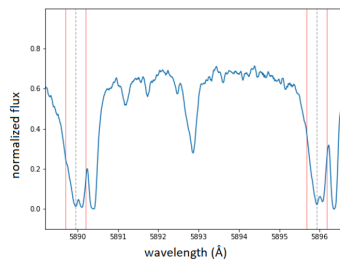


Fig. 1.2 Linha de NaI, no espectro da estrela NGC4349 127

Em estrelas mais ativas, ocorre emissão cromosférica no núcleo das linhas de absorção de sódio, o que indica processos de formação dominados por colisões entre partículas carregadas (elétrons e íons colidem e interagem energeticamente, levando à emissão de luz em vez de apenas absorção). Estes desvios na aparência das propriedades espectrais esperadas para linhas de absorção pura indicam uma atmosfera estelar mais quente e dinâmica.

De notar que em estrelas evoluídas, entre os tipos espectrais G e M, as linhas de absorção de NaI começam a desenvolver asas de absorção pronunciadas.

Segundo Worden et al. [65], observa-se emissão central nos núcleos das linhas NaI para estrelas do tipo M, estando esta fortemente correlacionada com a emissão da linha $H\alpha$. Estas linhas espectrais estudam a dinâmica das estrelas em diferentes zonas da cromosfera. As linhas de sódio fornecem

informações sobre as condições na cromosfera média e inferior, já as linhas de $H\alpha$ na cromosfera superior (ex. Mauas [41]).

Num estudo para linhas de sódio em estrelas evoluídas, foi definido o índice N (semelhante ao índice S de Mount Wilson) e o indicador de atividade R'_D (semelhante ao indicador R'_{HK}) (Díaz et al. [19]). Os autores mostraram que N e S tinham correlações variáveis, mas eram fortemente correlacionados em estrelas com emissões nas linhas de Balmer. Gomes da Silva et al. [27] mostrou que o índice baseado nas linhas de NaI se correlacionam bem com o índice S para estrelas anãs do tipo M. Devido ao maior fluxo no vermelho deste tipo de estrelas, este índice é uma boa alternativa ao uso do índice S.

HeI

O índice espectral na região de hélio (HeI) é determinado tendo em conta o seu comprimento de onda de 5875.62 Å, atendendo a uma largura de banda de 0.4 Å.

Esta linha é normalmente usada como indicador de atividade na cromosfera superior, em estrelas da sequência principal (ex. Rachford and Foight [54]; Biazzo et al. [5]).

Cálculo dos índices espectrais

O cálculo dos índices espectrais é dado pela razão entre o fluxo médio no centro das linhas sensíveis à atividade e o fluxo médio nas regiões de referência que medem o pseudo-contínuo (Gomes da Silva et al. [26]). Esta relação é expressa por:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{\sum_{j=1}^M R_j} \quad (1.1)$$

onde F_i representa o fluxo médio no centro da linha sensível à atividade, R_j é o fluxo nas regiões de referência, N denota o número de linhas de atividade consideradas e M é o número de regiões de referência utilizadas.

Ao calcular esses índices, os erros no fluxo são determinados levando em consideração apenas o ruído de fótons. O erro associado ao índice é calculado por meio de propagação de erros e é definido por:

$$\sigma_I = \frac{1}{\sum_{j=1}^M R_j} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{F_i}^2 + I^2 \sum_{j=1}^M \sigma_{R_j}^2} \quad (1.2)$$

em que σ_{F_i} é a incerteza na medição do fluxo na linha i e σ_{R_j} a incerteza na medição do fluxo na região de referência j .

1.4 Indicador de atividade cromosférica R'_{HK}

O índice de emissão cromosférica R'_{HK} é uma medida que permite avaliar a atividade na cromosfera estelar normalizada à temperatura efetiva, de modo a que se possam quantificar e comparar os níveis

de atividade cromosférica entre diferentes estrelas com diferentes temperaturas ou tipos estelares (Noyes et al. [51]).

Este indicador de atividade tem como base a emissão nas linhas espectrais de cálcio duplamente ionizado, pois o índice de CaII correlaciona-se significativamente com a quantidade de regiões ativas presentes nas estrelas, indicando a possível presença de campos magnéticos intensos na superfície das mesmas (Baliunas and Soon [2]).

De referir que a região de CaII tem duas linhas de absorção adjacentes (H e K), sendo que o índice espectral de CaII é determinado em comprimentos de onda iguais a 3968.47 Å e 3933.66 Å, ambas com filtros triangulares com FWHM de 1.09 Å.

A análise de linhas de cálcio, como índice de atividade, começa por ser usada pelo programa de Mt. Wilson, em 1966, com o propósito de realizar medições de longo prazo da atividade estelar, tendo como foco estrelas semelhantes ao Sol. Determinado por Vaughan et al. [62], o índice S é usado como proxy para a atividade do CaII.

O índice S pode ser usado para estudar as variações de atividade de uma determinada estrela. No entanto, ao comparar o índice S de estrelas de diferentes tipos espectrais, a influência da cor estelar e as contribuições da fotosfera devem ser corrigidas.

O indicador R'_{HK} é determinado em função do índice de cor B-V (diferença entre o fluxo na zona do azul e o fluxo na zona da luz visível), normalizado relativamente ao fluxo bolométrico, de modo a ter em conta os diferentes tipos espectrais. Esta abordagem mitigou as discrepâncias decorrentes das diferenças de cor e das contribuições da fotosfera nas observações das estrelas e, conseqüentemente, permitiu uma análise mais precisa da atividade estelar.

Cálculo do indicador de atividade R'_{HK}

O valor do índice de atividade estelar R'_{HK} consiste na diferença entre o fluxo cromosférico e o fluxo fotosférico, divididos pelo fluxo bolométrico. O fluxo cromosférico é medido nas linhas de CaII H&K (o S_{MW}) e é corrigido para efeitos fotosféricos. A correção bolométrica permite comparar valores de atividade entre estrelas de diferentes tipos espectrais.

A relação entre o índice espectral CaII e o índice S_{MW} , para o espectrógrafo HARPS (Gomes da Silva et al. [26]), é expressa pela equação

$$S_{MW} = 1.195 \cdot \text{CaII} + 0.008 \quad (1.3)$$

Com base nos valores de S_{MW} , é possível calcular o indicador de atividade cromosférica R'_{HK} usando a seguinte equação, proposta por Noyes et al. [51].

$$R'_{HK} = 1.34 \times 10^{-4} \cdot Ccf \cdot S_{MW} - R_{\text{phot}} \quad (1.4)$$

onde R_{phot} corresponde à contribuição da fotosfera, sendo dependente do fluxo B-V, e Ccf representa a correção bolométrica.

Segundo Hartmann et al. [30] e Noyes et al. [51], a contribuição da fotosfera é dada por

$$\log R_{\text{phot}} = -4.898 + 1.918(B - V)^2 - 2.893(B - V)^3 \quad (1.5)$$

Já a correção bolométrica, Ccf , foi inicialmente definida por Middelkoop [49] para $0.4 \leq (B - V) \leq 1.2$. Posteriormente, Rutten [55] expandiu essa correção para incluir estrelas subgigantes e gigantes com $0.3 \leq (B - V) \leq 1.7$. Dado o nosso estudo incidir em estrelas gigantes, foram usadas as correções bolométricas de Rutten, expressas pela equação:

$$\log Ccf = -0.066(B - V)^3 - 0.25(B - V)^2 - 0.49(B - V) + 0.45 \quad (1.6)$$

Todas as equações anteriormente mencionadas integram o desenvolvimento do programa `pyrhk`¹, desenvolvido por Gomes da Silva [26].

1.4.1 Indicadores de atividade de CCF

Uma das formas de determinar a velocidade radial de estrelas é usando o método da correlação cruzada (Cross Correlation Function, CCF) entre o espectro estelar e um modelo representativo das linhas espectrais. Este método gera uma curva (perfil do CCF) que representa uma média do perfil de todas as linhas espectrais (usadas na determinação da RV). Deste modo, parâmetros do perfil do CCF, como largura, profundidade ou assimetria, contém informação sobre variações do perfil das linhas espectrais provocadas por atividade estelar.

Dois parâmetros frequentemente analisados a partir do perfil de CCF são a largura a média altura (FWHM - Full Width at Half Maximum) e a inclinação inversa do bisector (BIS - Bisector Inverse Slope) (Queloz et al. [53]). O indicador FWHM mede a largura da linha espectral e a sua análise permite-nos saber se há uma compressão ou dilatação das linhas. Já o índice de atividade BIS analisa a assimetria das linhas espectrais, pois a sua medição reflete se o eixo de simetria de uma curva sofre inclinação.

1.5 Fases de evolução estelar

Este estudo passa por investigar o comportamento da atividade estelar de acordo com o estado evolutivo das estrelas gigantes evoluídas. Para uma compreensão mais clara das diferentes fases que as estrelas atravessam ao longo das suas vidas, segue-se uma descrição das mesmas, incluindo implicações na sua dinâmica e na interpretação dos dados observacionais.

Na figura 1.3, estão representados dois diagramas Hertzsprung-Russell (HR), nos quais é possível observar as linhas que delineam o trajeto de estrelas no percorrer da sua vida. Estão destacadas com diferentes cores as várias etapas evolutivas das estrelas. Estas duas isócronas representam estrelas com características específicas. No painel (a) apresenta-se o trajeto para estrelas com aproximadamente 1.8 mil milhões de anos (Ga), com metalicidade solar, que apresentam uma massa de aproximadamente $1.8 M_{\odot}$ na fase de red clump (Bressan 2012). Já no painel (b), tem-se uma isócrona com 0.2 Ga, com metalicidade solar e cuja massa aquando da sua passagem na fase red clump é de $3.7 M_{\odot}$.

¹Disponível em <https://github.com/gomesdasilva/pyrhk>

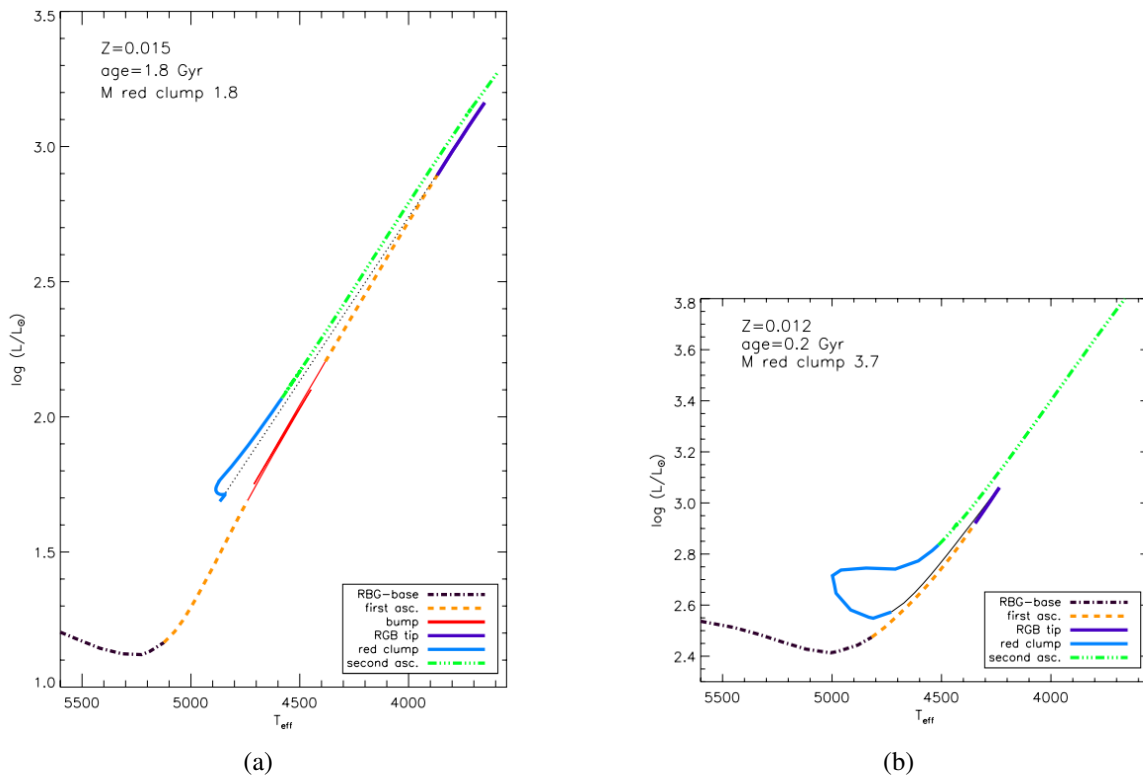


Fig. 1.3 Diagramas HR onde está representado o processo evolutivo, para estrelas com diferentes massas e idades. Fonte: Delgado Mena et al. [17]

Durante a fase da Sequência Principal, está a ocorrer a fusão do hidrogénio no núcleo, resultando na produção de hélio. Ao acabar o hidrogénio no núcleo, inicia-se a queima de hidrogénio nas camadas exteriores ao núcleo, começando a dar-se a expansão da estrela. Esta fase está representada a castanho e denomina-se base do Ramo das Gigantes Vermelhas (RGB-base).

À medida que as estrelas prosseguem na sua trajetória evolutiva, inicia-se a primeira ascensão no ramo das estrelas gigante (colorido a laranja). A determinado momento, nesta fase de ascensão, observamos a vermelho uma fase conhecida como "bump", no qual ocorre uma diminuição brusca e rápida de luminosidade. Depois as estrelas continuam a sua ascensão até atingirem a Ponta do RGB (RGB tip), sendo este o ponto de luminosidade máxima, representado a roxo.

No caso de estrelas com massas inferiores a $2 M_{\odot}$ iniciais, o núcleo de hélio torna-se degenerado, e a ignição de hélio, conhecida como "He-flash", ocorre. Este fenómeno está identificado com tracejado a preto e é caracterizado por uma redução significativa da luminosidade.

De seguida começa a combustão de hélio no núcleo, fase denominada como "red clump". No diagrama HR está colorida a azul. Este estado de evolução estelar tem uma escala de tempo mais alargada comparativamente com fases anteriores, o que faz com que se observem mais estrelas nesta fase.

Assim que se esgota o hélio no núcleo, termina a fase red clump, dando-se início à sua segunda ascensão no Ramo Gigante (colorida a verde), rumo à fase de gigante assintótica (AGB). Neste estado de evolução, ocorre uma grande expansão da estrela, o que leva a uma probabilidade significativa dela poder engolir planetas próximos que a orbitem.

No painel (b), temos uma isócrona típica de estrelas que têm 2 a 4 M_{\odot} aquando da sua fase red clump. Estas estrelas não passam pelo "bump", onde há uma descida abrupta da luminosidade, e o seu núcleo atinge temperaturas superiores, eliminando a necessidade do "flash" de hélio. Isto leva a que o raio máximo atingido na Ponta do RGB (RGB tip) seja menor, comparativamente a estrelas menos massivas, e, portanto, que a probabilidade de engolir planetas na segunda fase de ascensão seja inferior. [17]

1.6 Motivação

Ao contrário do que acontece para estrelas da sequência principal, estudos que investiguem e relacionem a influência de atividade estelar na variação da velocidade radial, especificamente, em estrelas evoluídas são escassos ou inexistentes. Além disso, tem havido controvérsia aquando da deteção de supostos exoplanetas em órbita de estrelas evoluídas, muito devido a sinais em velocidade radial que se assemelham a sinais provocados por planetas durante vários anos, mas posteriormente tem-se verificado que afinal são provocados por atividade estelar (Hatzes et al. [31]). O facto deste tipo de estrelas terem tamanhos maiores do que as da sequência principal, faz com que potenciais planetas sejam detetados em períodos mais longos. Por outro lado, estes maiores raios resultam em períodos de rotação mais longos, resultando em variações de velocidade radial com periodicidades na ordem das centenas de dias, complicando a sua interpretação (Delgado Mena et al. [15]).

Os objectivos deste trabalho são determinar de que forma é que a atividade estelar influencia a velocidade radial, qual o melhor indicador de atividade para se ter em conta, quando se procuram exoplanetas usando o método da velocidade radial, e como é que os parâmetros das estrelas e os seus estados evolutivos se relacionam com a atividade cromosférica.

Esta tese de investigação está organizada da seguinte forma. Na secção 2, é descrita a amostra em estudo, bem como os métodos utilizados na recolha da amostra e na análise dos dados. Na secção 3 é feito um estudo sobre o comportamento geral da atividade das estrelas evoluídas em função dos seus parâmetros. Na secção 4, investigamos se os índices, a velocidade radial e as características das estrelas se correlacionam. Por fim, na secção 5, são prestadas algumas considerações particulares relativas a determinadas estrelas da nossa amostra. Na secção 6 encontram-se as considerações finais.

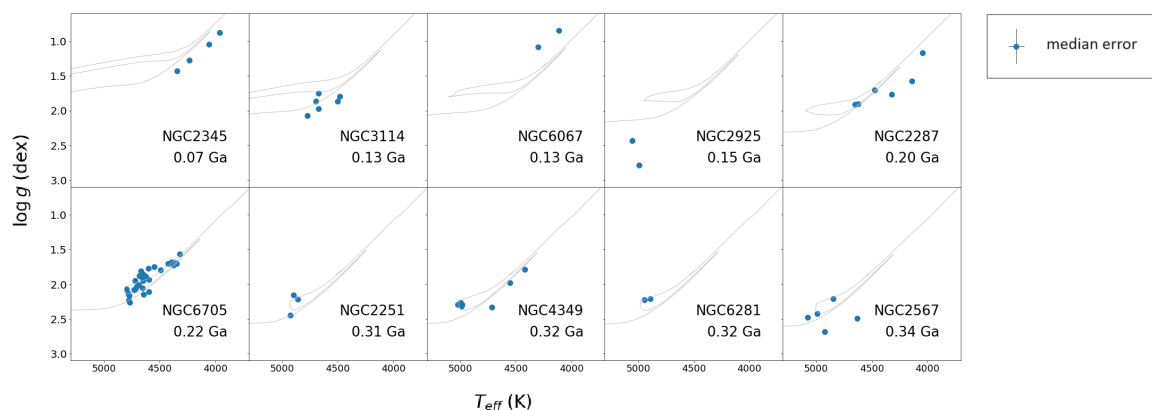
Capítulo 2

Amostra

O presente estudo tem por base a análise de 2929 espectros provenientes de uma amostra composta por 279 estrelas gigantes do tipo espectral K e M. Estes espectros foram obtidos através do espectrógrafo HARPS] que se encontra instalado no telescópio de 3,6 metros do ESO em La Silla, no Chile. A seleção da amostra teve como principal objetivo a procura de exoplanetas, considerando inicialmente estrelas gigantes em 35 aglomerados estelares abertos (open clusters).

Os espectros que constituem a amostra foram obtidos em observações realizadas ao longo de um período de 6220 dias (de março de 2005 a março de 2022), com um tempo mínimo de observação de 539 dias. Esta recolha de dados teve início sob a coordenação de Lovis and Mayor [39] entre os anos de 2005 e 2009, e a aquisição de informação prosseguiu no período entre 2017 e 2022, por Delgado Mena et al. [14].

Na Figura 2.1, são apresentadas todas as 250 estrelas, distribuídas por 35 clusters, para as quais Tsantaki et al. [61] estabelece parâmetros estelares, tendo sido determinadas idades apenas para 32 destes clusters. A cada diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) corresponde um aglomerado, contendo a respetiva isócrona representada graficamente. As isócronas utilizadas nesta investigação foram delineadas a partir do estudo e dados de Tsantaki et al. [61].



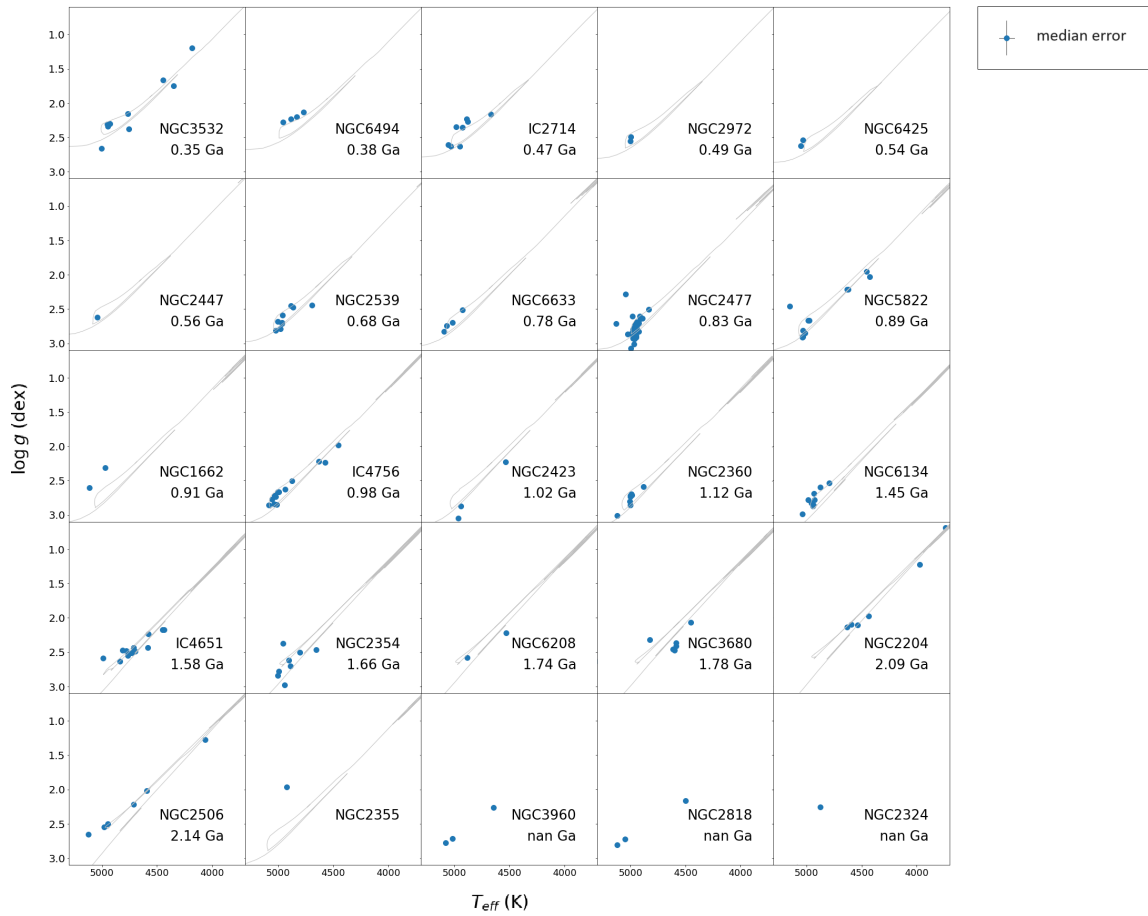


Fig. 2.1 Estrelas da amostra distribuídas por cluster em diagrama Hertzsprung-Russell

No que respeita ao estado evolutivo, trata-se de uma amostra de estrelas evoluídas, sendo que a maioria das estrelas na amostra se encontra a ascender pelo ramo das gigantes vermelhas ou encontra-se no red clump, onde as estrelas estão a queimar silenciosamente hélio no seu núcleo.

Os parâmetros estelares da amostra do presente estudo são provenientes de uma base de dados de Tsantaki et al. [61]. As estrelas da amostra apresentam idades que variam entre 0.13 e 2.14 mil milhões de anos (Ga), enquanto as suas massas variam entre 0.867 e 4.818 M_{\odot} . A temperatura efetiva das estrelas oscila entre 4347 e 5399 K e o logaritmo da aceleração gravítica varia entre 1.553 e 3.230 dex. O logaritmo da luminosidade varia entre 1.224 e 3.247 dex. A metalicidade das estrelas ($[Fe/H]$), varia entre -0.341 e 0.186 dex. Na Fig.2.2 apresentam-se os histogramas atendendo aos valores para os parâmetros das estrelas. No Anexo A está disponibilizada uma tabela com todos os valores de parâmetros estelares, anteriormente mencionados, para cada estrela da amostra em estudo.

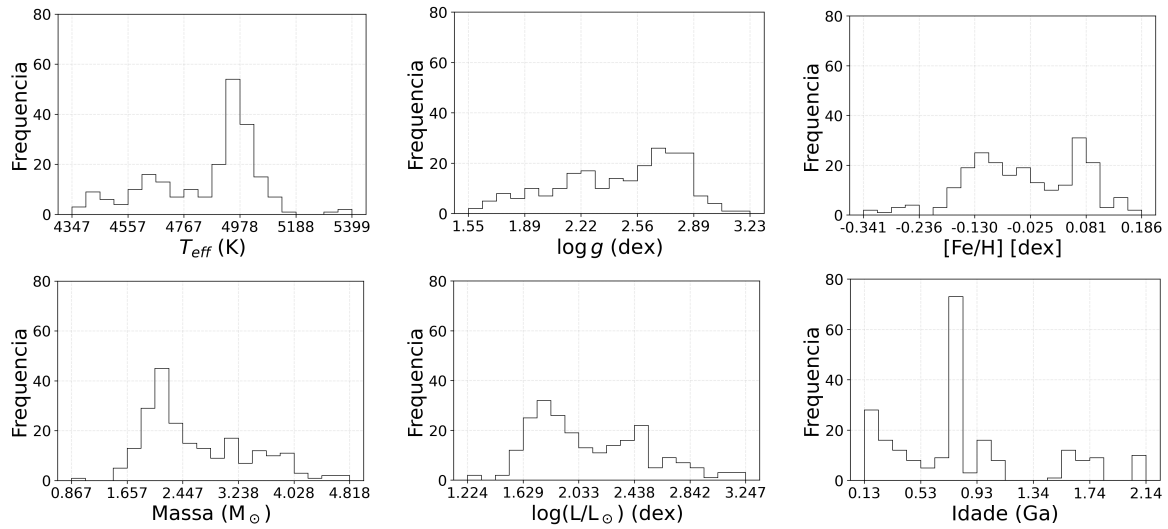


Fig. 2.2 Distribuição dos valores de temperatura efetiva, aceleração gravítica, metalicidade, massa, luminosidade e idade da amostra em estudo.

Com o intuito de garantir a qualidade dos dados, aquando da análise da atividade estelar em séries temporais, foram selecionadas apenas estrelas com pelo menos 10 observações. As observações foram também sujeitas a um processo de filtragem sigma clip ($\sigma = 3$) aos seus valores de velocidade radial e de índices de atividade, de modo a eliminar outliers. A consequente exclusão de observações resultou numa amostra reduzida a 2178 espectro de 96 estrelas, distribuídas por 17 clusters, sendo que em três deles temos apenas observações de uma única estrela (NGC2345, IC4756 e NGC6633).

As observações realizadas com o HARPS foram processadas através da pipeline de redução de dados (DRS3.5), o que resulta na obtenção de ficheiros FITS com os espetros estelares reduzidos (ficheiros s1d), bem como nos valores de velocidade radial (obtidos através do método da função de correlação cruzada - CCF), e nos valores de CCF-FWHM e CCF-BIS, os quais serão utilizados nos capítulos subsequentes.

Os valores de velocidade radial foram devidamente corrigidos aquando da existência de estrelas binárias, tendo sido eliminada a influência destes sinais nas medições de velocidade radial da estrela em estudo.

Os índices de atividade espectral (CaII, H α 06, H α 16, NaI e HeI) foram determinados usando o software ACTIN¹, desenvolvido por Gomes da Silva et al. [26] [25]. No anexo C, apresenta-se uma tabela com os devidos valores dos centros das linhas espectrais sensíveis à atividade, bem como das linhas de referência, utilizados para o cálculo dos índices espectrais.

O software também extrai informação sobre os parâmetros da CCF (velocidade radial, FWHM e BIS) dos headers dos ficheiros FITS, o que nos permite, facilmente, obter uma tabela completa com todos estes valores, bem como os índices de atividade estelar.

São tidas em conta as correções relativas à posição e movimento do observador em relação à estrela observada (correção de desvio Doppler). Os valores de FWHM e BIS determinados pela pipeline do HARPS não têm erros associados, pelo que estes foram calculados atendendo ao ruído ou interferência que afeta a medição ou a interpretação da CCF.

¹Disponível em <https://github.com/gomesdasilva/ACTIN2>

Para o cálculo do indicador de atividade R'_{HK} foi utilizado o software `pyrhk`². O processo de calibração usando o índice S para o espectrógrafo HARPS envolve a utilização do índice CaII (índice baseado nas linhas CaII H&K) proveniente do espectro combinado de cada estrela. Este software determina os valores de R'_{HK} , tendo por base o método proposto por Noyes et al. [51], e, por se tratar de uma amostra de estrelas evoluídas, este cálculo segue as correções bolométricas de Rutten [55]. São adquiridos os valores dos fluxos nas bandas de cor B e V da base de dados Simbad. Para os casos em que estes fluxos não se encontram registados na plataforma Simbad, foram atribuídos, sempre que possível, os valores de B-V determinados por Lovis (comunicação privada). No Anexo B está disponibilizada uma tabela com todos os valores de CaII, S_{MW} , B-V e de $\log(R'_{HK})$, para cada estrela da amostra em estudo.

Observando e analisando, na Fig.2.3, os espectros de estrelas deste estudo, na região de absorção de hélio, denotamos que não há uma linha que defina claramente o índice de hélio, sendo notável que este não é um indicador confiável de atividade estelar em estrelas evoluídas, pelo que os índices de hélio não serão tidos em conta nesta investigação.

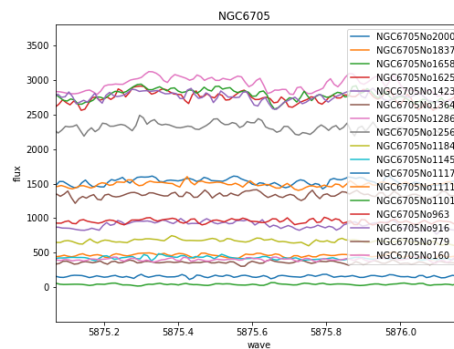


Fig. 2.3 Linhas espectrais de estrelas evoluídas na região de HeI, para estrelas do cluster NGC6705

²Disponível em <https://github.com/gomesdasilva/pyrhk>

Capítulo 3

Comportamento geral da atividade estelar em função dos parâmetros estelares

Numa primeira fase será feito um estudo abrangente sobre o comportamento da atividade estelar, usando o indicador de atividade cromosférica R'_{HK} , colocando em consideração a sua possível dependência relativamente aos parâmetros estelares: temperatura efetiva, aceleração gravítica, luminosidade, massa, metalicidade e idade.

Afim de se determinar o valor médio de R'_{HK} , foi usado um espectro combinado para cada estrela, resultante da combinação dos espectros individuais correspondentes a cada uma das observações. Deste modo, de um espectro combinado de uma estrela resulta um único índice de CaII, essencial na determinação de R'_{HK} aquando do uso do software `pyrhk`¹, desenvolvido por Gomes da Silva et al. [26].

Devemos notar que não se verificou ser viável realizar uma análise temporal do índice R'_{HK} (CaII) devido ao facto do sinal-ruído presente nos espectros individuais ser muito baixo na região azul dos espectros, decorrente da natureza intrinsecamente avermelhada dessas estrelas.

Neste capítulo também será estudado o comportamento do índice de atividade estelar R'_{HK} em relação ao estado evolutivo das estrelas. Para objecto de análise, obtiveram-se diagramas Hertzsprung-Russell (HR), nos quais serão incluídas, juntamente com as estrelas e os seus respetivos valores de $\log(R'_{HK})$, as isócronas apropriadas para a evolução de cada aglomerado estelar.

¹Disponível em <https://github.com/gomesdasilva/pyrhk>

3.1 Correlação entre índice R'_{HK} e parâmetros estelares

Estrelas mais jovens tendem a ser mais ativas do que estrelas mais velhas (Mamajek and Hillenbrand [40]). No entanto, esta relação foi observada em estrelas da sequência principal, e não há muitos estudos de evolução de atividade estelar em estrelas evoluídas, como as que formam a nossa amostra.

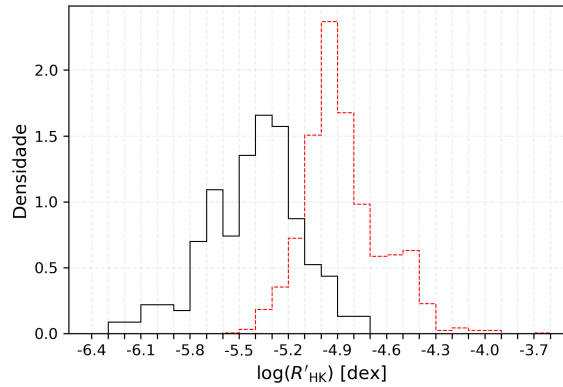


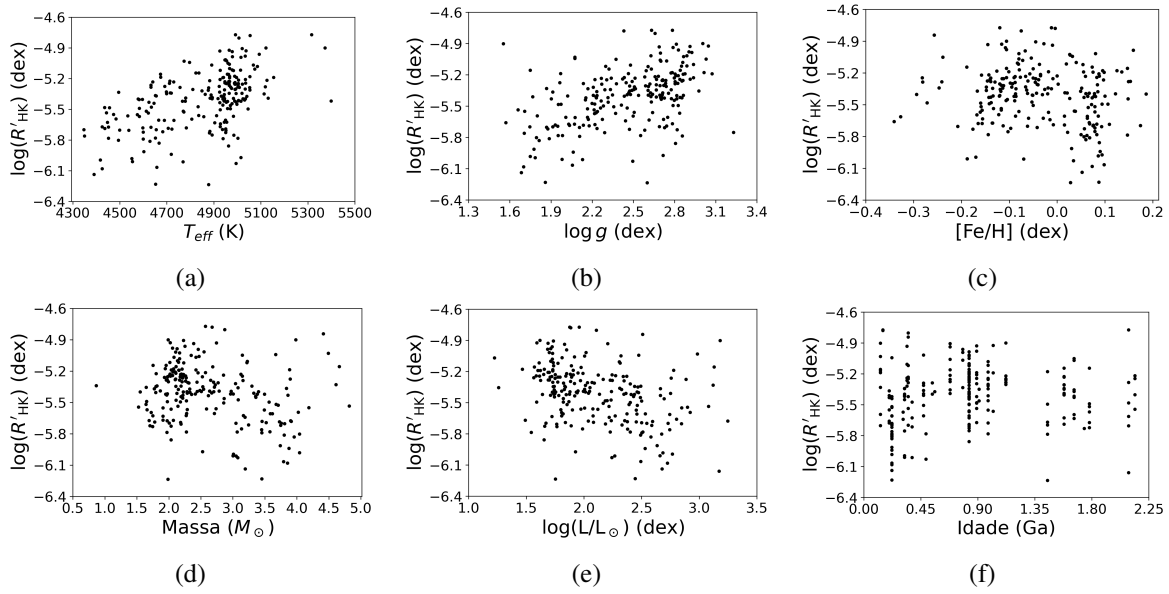
Fig. 3.1 Distribuição dos valores de $\log(R'_{HK})$ em estrelas evoluídas (a preto) e em estrelas majoritariamente da sequência principal (a tracejado vermelho)

Em tom de comparação, apresentamos na Fig.3.1 um histograma de densidades para os valores de $\log(R'_{HK})$, no qual se encontra a nossa amostra de estrelas evoluídas, a preto, e uma amostra composta por majoritariamente estrelas da sequência principal, a tracejado vermelho, utilizada no estudo de Gomes da Silva et al. [26], onde é estudada a atividade estelar em 1674 estrelas da sequência principal. Gomes da Silva et al. [26] compara várias fases da evolução das estrelas da sequência principal (anãs do tipo FGK), subgigantes e gigantes, evidenciando que, na sua amostra de estrelas da sequência principal, estrelas mais evoluídas têm menores valores de $\log(R'_{HK})$. É possível constatar no histograma que estrelas evoluídas têm um índice de atividade cromosférica inferior ao de estrelas da sequência principal.

Os valores da nossa amostra de estrelas evoluídas (gigantes) está compreendida entre -6.235 e -4.772 dex. Numa breve descrição desta distribuição, temos que o pico de maior densidade deste histograma encontra-se na região $-5.4 < \log(R'_{HK}) < -5.3$ dex, a mediana dos valores do indicador de atividade cromosférica é de -5.392 dex, e os percentis 5% e 95% são -5.959 dex e -4.947 dex, respectivamente.

Gomes da Silva et al. [26] sugere que $\log(R'_{HK}) = -5.1$ dex marca uma fase de transição da evolução da sequência principal para a fase de subgigantes, e que $\log(R'_{HK}) = -5.25$ dex pode definir uma fase de transição de subgigantes para gigantes. Analisando estatisticamente os dados da nossa amostra, temos $\log(R'_{HK}) = -5.1$ dex no percentil 88 dos nossos dados e $\log(R'_{HK}) = -5.25$ dex no percentil 72. Corroboramos claramente a informação de que estrelas evoluídas têm sistematicamente valores mais baixos de R'_{HK} em comparação com as estrelas da sequência principal.

A relação entre a idade e o índice $\log(R'_{HK})$ é mostrada no painel f da Fig. 3.2. Neste caso, não é possível tirar conclusões sobre a relação entre a idade das estrelas e o seu índice de atividade estelar, no entanto a relação entre R'_{HK} e o logaritmo da gravidade mostra um declive positivo indicando um decaimento do nível de atividade com diminuir da gravidade, implicando que estrelas mais evoluídas

Fig. 3.2 Gráficos de dispersão $\log(R'_{HK})$ versus parâmetros estelares

têm menores níveis de atividade estelar. Por outro lado, estrelas com menor metalicidade tendem a ser mais ativas do que estrelas com maiores metalicidades. A análise das propriedades físicas das estrelas, tais como a temperatura, luminosidade e gravidade superficial, permite perceber que estas estão correlacionadas com o índice de atividade estelar (Fig.3.2 (a), (b), (e)). Em particular, observa-se que as estrelas com menor $\log g$ e menor temperatura são as menos ativas (menor índice $\log(R'_{HK})$), estando em conformidade com as observações no estudo feito por Gomes da Silva et al. [26]. Isto também pode ser observado no painel (e) onde a luminosidade aumenta com a descida do indicador de atividade R'_{HK} . Com o objetivo de verificar a significância das correlações observadas, foram calculados os coeficientes de correlação de Spearman e seus respectivos valores de significância (p-value). Estes valores são mostrados na tabela 3.1. Os coeficientes ρ mostram correlação forte (i.e. $|\rho| > 0.5$) entre R'_{HK} e os parâmetros T_{eff} , $\log g$ e $\log(L)$. Os valores de p-value corroboram que estas correlações são significativas (i.e. p-value < 0.01).

	ρ	$p - \text{value}$
T_{eff} vs $\log(R'_{hk})$	0.527	< 0.001
$\log g$ vs $\log(R'_{hk})$	0.487	< 0.001
[Fe/H] vs $\log(R'_{hk})$	-0.125	0.063
Massa vs $\log(R'_{hk})$	-0.203	0.003
$\log(L)$ vs $\log(R'_{hk})$	-0.401	< 0.001
Idade vs $\log(R'_{hk})$	0.023	0.739

Tabela 3.1 Valores de ρ e $p - \text{value}$ na correlação de Spearman para $\log(R'_{hk})$ vs. Parâmetros Estelares

3.2 Índice R'_{HK} na evolução estelar

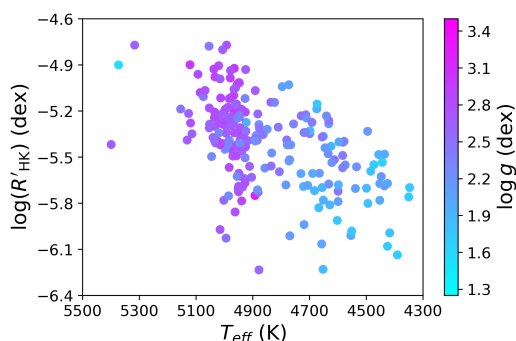


Fig. 3.3 Relação entre atividade estelar e temperatura efetiva das estrelas, com variação de aceleração gravítica codificada por escala de cores.

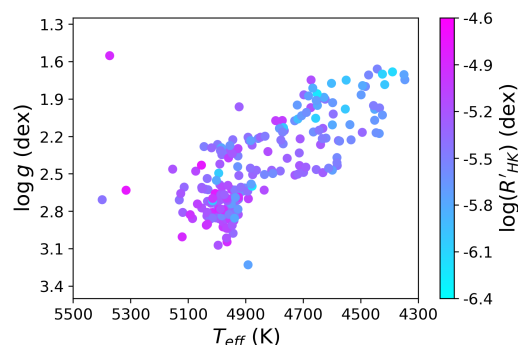


Fig. 3.4 Diagrama HR com variação de atividade estelar codificada por escala de cores.

Estrelas mais evoluídas tendem a apresentar menor aceleração gravítica, o que resulta em valores inferiores de $\log g$ ao longo do tempo. A representação gráfica da Fig.3.4 revela, como esperado pela relação atividade versus idade, que as estrelas mais evoluídas têm um índice de atividade menor.

A partir da análise da Fig.3.3, não é possível estabelecer conclusivamente a razão subjacente para a baixa atividade estelar observada, podendo esta resultar do facto das estrelas mais evoluídas nesta amostra coincidirem com serem estrelas mais frias. Esta questão será explorada na Fig.3.5, onde temos representados os diagramas HR individuais para cada cluster da nossa amostra.

3.3 Índice R'_{HK} no estado evolutivo de estrelas num mesmo cluster

Com o intuito de examinar possíveis variações na atividade estelar dentro de um mesmo aglomerado de estrelas (cluster) e identificar variações entre estrelas em estados evolutivos similares, é apresentada na Fig.3.5 a representação gráfica dos diagramas HR com escala de cores associada ao índice R'_{HK} .

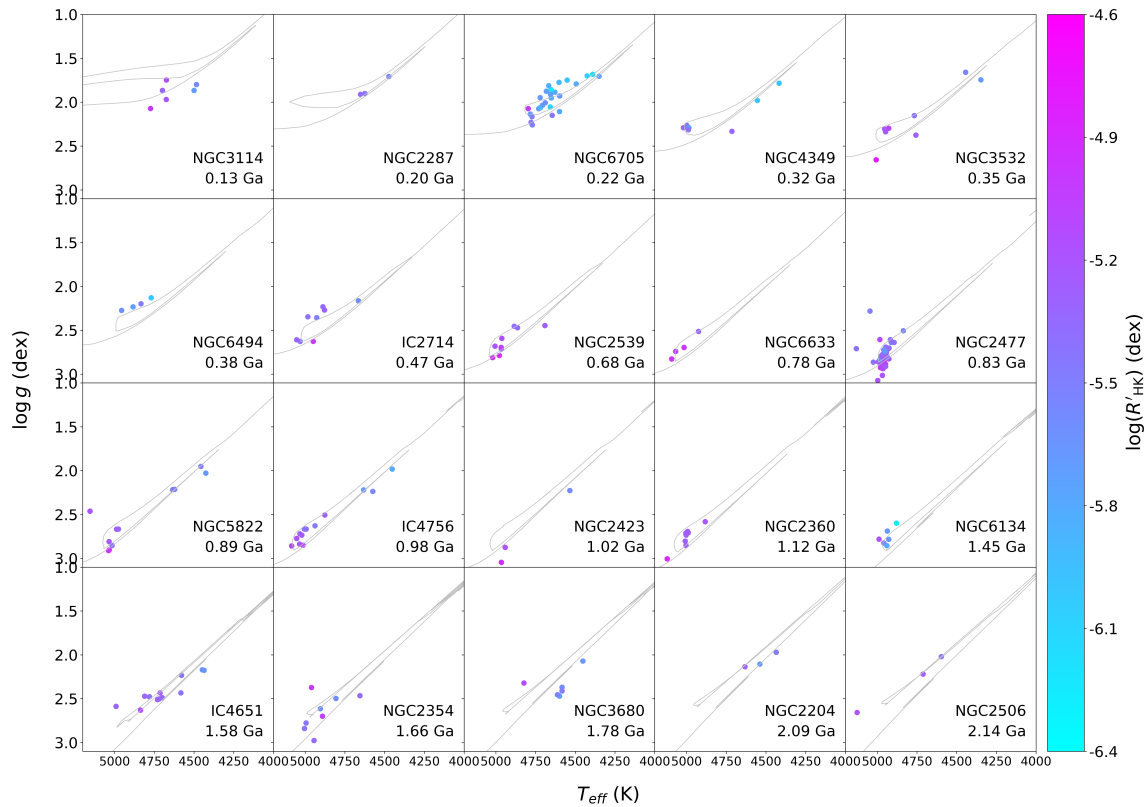


Fig. 3.5 Diagramas HR com escala de cor para $\log(R'_{HK})$. Estrelas distribuídas por cluster, com isócronas respetivas.

Estrelas mais evoluídas tendem a apresentar menor aceleração gravítica, o que resulta em valores inferiores de $\log g$ ao longo do tempo. Portanto, isto parece ser indicativo de que as estrelas mais evoluídas são menos activas (porque dentro de cada cluster as estrelas mais frias são também as mais evoluídas). A representação gráfica dos dados da amostra mostra que as estrelas mais evoluídas são mais frias e têm um índice de atividade menor, como é possível observar na Fig.3.5.

Observando as estrelas num mesmo cluster, observamos que no red clump estrelas tem maior R'_{HK} (ou seja, são mais activas) que as estrelas que estão a ascender pelo RGB, mas notamos que os erros nos parâmetros não permitem, em muitos casos, distinguir se as estrelas estão no red clump ou no primeiro ramo ascendente.

Capítulo 4

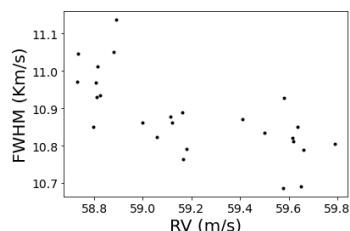
Correlações entre velocidade radial, indicadores de atividade, e parâmetros estelares

Neste capítulo, numa primeira fase, procuramos compreender se os diferentes índices de atividade estelar em análise - $H\alpha 06$, $H\alpha 16$, NaI, FWHM e BIS - medem as mesmas manifestações da atividade estelar. Para tal, é feita uma análise para verificar se esses indicadores se correlacionam e, se for o caso, qual é a natureza dessa correlação.

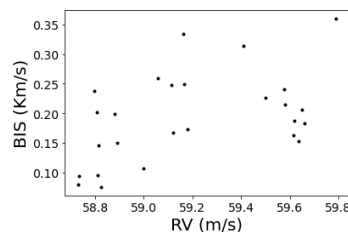
Um segundo objetivo consiste em determinar quais os índices de atividade estelar mais eficazes na identificação de variações na velocidade radial causadas pela atividade estelar, permitindo, assim, a deteção de falsos positivos na procura de exoplanetas em estrelas gigantes.

Por fim, analisaremos de que forma as correlações investigadas (índice vs. índice e velocidade radial vs. índice) são influenciadas pelas características individuais das estrelas gigantes, nomeadamente parâmetros estelares e estado evolutivo. De modo a identificar as características das estrelas nas quais certos índices medem as mesmas manifestações e, simultaneamente, para o qual um determinado índice apresenta um desempenho mais eficaz na deteção de falsos positivos ao utilizar o método da velocidade radial na pesquisa por exoplanetas.

Na Fig.4.1 apresentam-se os gráficos de dispersão da estrela NGC2345 50 para as relações entre velocidade radial e FWHM e entre velocidade radial e BIS.



(a) velocidade radial versus FWHM



(b) velocidade radial versus BIS

Fig. 4.1 Gráficos de dispersão entre velocidade radial e FWHM e entre velocidade radial e BIS, para a estrela NGC2345 50.

No painel (a) é possível observar uma forte e significativa correlação negativa entre velocidade radial e FWHM, cujo coeficiente de correlação de Spearman é igual a -0.74 e p-value inferior a 0.01 . No painel (b) é possível verifica-se uma moderada e menos significativa correlação positiva entre velocidade radial e BIS, cujo coeficiente de correlação de Spearman é igual a 0.44 e p-value igual a 0.03 . Estas correlações indicam que as velocidades radiais desta estrela estão sujeitas a interferências causadas por alterações no perfil do CCF, indicando como potencial causa manifestações de atividade estelar.

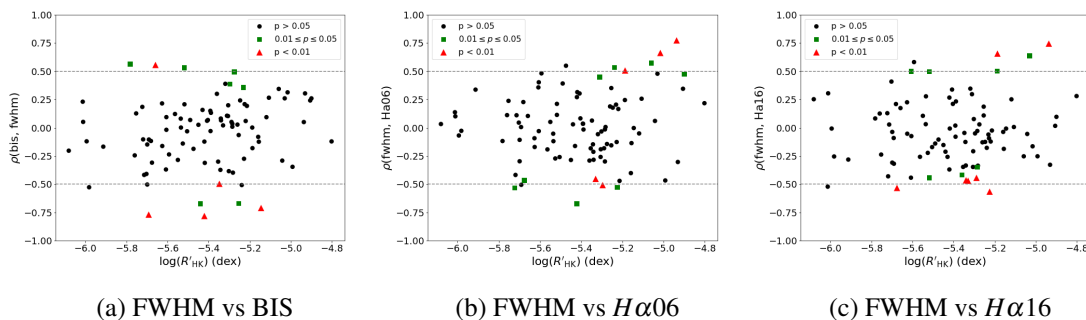
Estes são apenas dois exemplos ilustrativos do estudo realizado, que permitiu a determinação de todas as correlações de Spearman apresentadas no seguimento deste capítulo.

4.1 Correlações Índice - Índice

Procederemos à análise da inter-relação entre os índices de atividade, dois a dois para cada estrela, englobando tanto os índices espectrais ($H\alpha 06$, $H\alpha 16$ e NaI), como os índices de CCF (BIS e FWHM). Para tal, serão calculados os coeficientes de correlação de Spearman para cada um dos 10 pares de variáveis, considerando cada uma das 96 estrelas presentes na nossa amostra.

Com o intuito de destacar relações de elevada significância estatística, foram atribuídos diferentes símbolos para representar correlações de Spearman entre os índices de atividade $H\alpha 06$, $H\alpha 16$, NaI, BIS e FWHM. Especificamente, correlações que demonstram um coeficiente de correlação de Spearman $|\rho| > 0.5$ são realçadas. Os símbolos distinguem-se de acordo com o nível de significância estatística, sendo que com um quadrado verde estão representadas as estrelas cujas correlações entre as variáveis em causa são fortes, com uma p-value entre 0.01 e 0.05 , inclusive. Já se o p-value é inferior a 0.01 , é atribuído um triângulo vermelho à estrela em questão. Esta representação aplica-se a todas as secções deste capítulo.

Segue-se a Fig.4.2 na qual foram representadas todas as correlações de Spearman entre índices de atividade, em função do indicador de atividade cromosférico R'_{HK} . Cada um dos gráficos serve um par de variáveis, para os quais foram determinados os coeficientes de correlação para as 96 estrelas da nossa amostra, das quais temos pelo menos 10 observações.



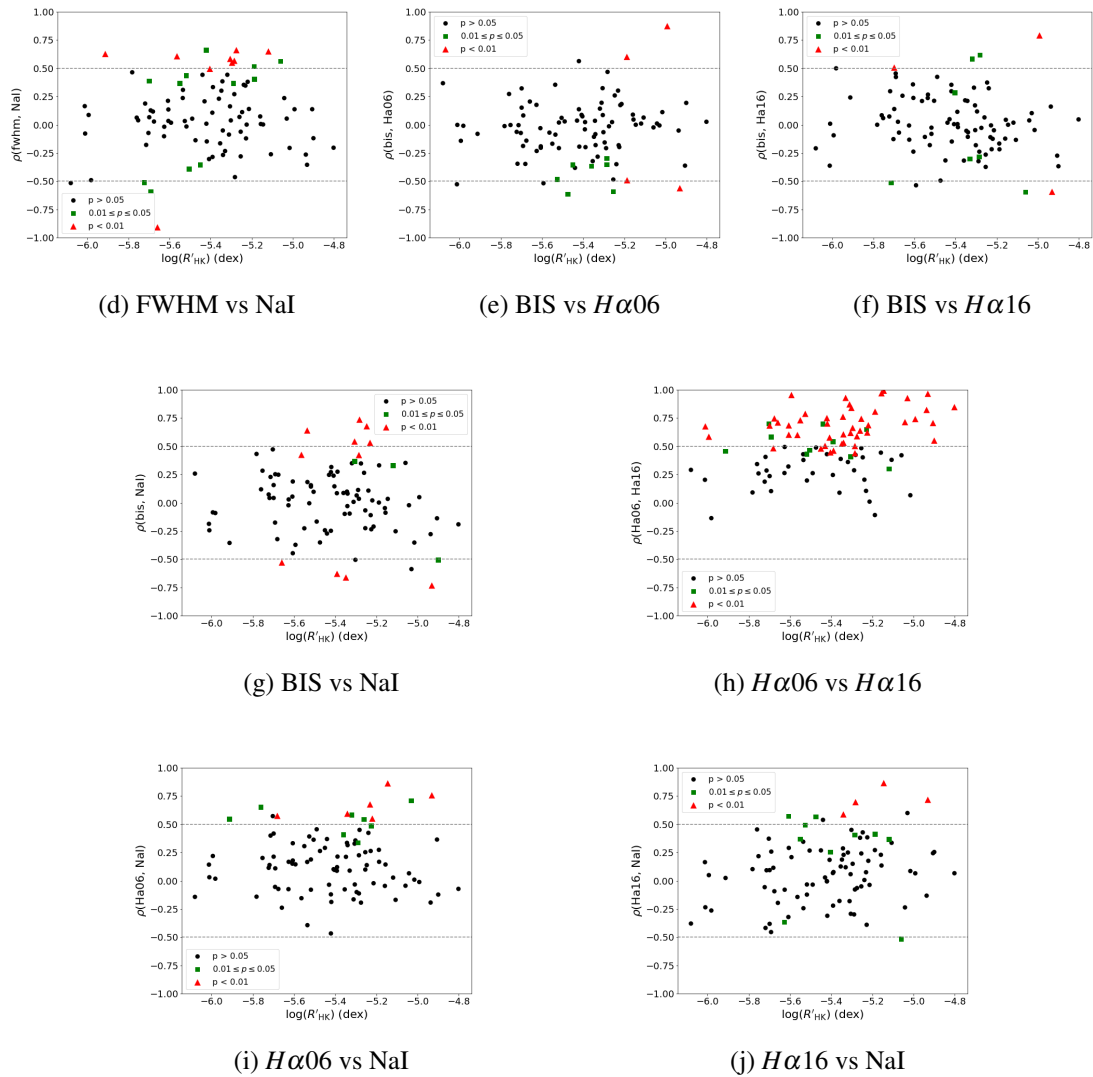


Fig. 4.2 Coeficientes de correlação de Spearman entre índices de atividade, em função do indicador de atividade cromosférico R'_{HK} , para 96 estrelas. Atribuição de triângulos vermelhos para p -value < 0.01 , quadrados verdes para p -value $0.01 \leq p \leq 0.05$ e pontos pretos para p -value > 0.05 . As linhas horizontais indicam os limites de $|r_{hol}| > 0.5$, para os quais consideramos a correlação como "forte".

Numa primeira fase, pelos gráficos apresentados na Fig. 4.2, podemos tirar algumas observações sugestivas:

- Quando há uma correlação estatisticamente significativa entre os índices de atividade FWHM e NaI, observam-se predominantemente correlações positivas. (painel d)
- Com exceção de algumas estrelas, as correlações entre $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$ demonstram predominância de valores positivos, apresentando uma notável significância estatística (painel h), o que indica que não há grande diferença entre os dois índices. Contrariamente ao que foi verificado para estrelas FGK da sequência principal, segundo o estudo de Gomes da Silva et al. [24].

- Quando ocorrem correlações estatisticamente significativas entre os índices de atividade $H\alpha 06$ e NaI (painel i), predominam as correlações positivas. O mesmo ocorre quando se trata de $H\alpha 16$ e NaI (painel j).

Nos painéis (b), (e) e (j) da Fig. 4.2, podemos observar uma tendência para que quando ocorrem correlações significativas entre as variáveis, estas ocorram para valores de R'_{HK} superiores.

4.2 Correlações velocidade radial - Índice

Segue-se a análise das correlações entre a velocidade radial e os índices de actividade $H\alpha 06$, $H\alpha 16$, NaI , FWHM e BIS.

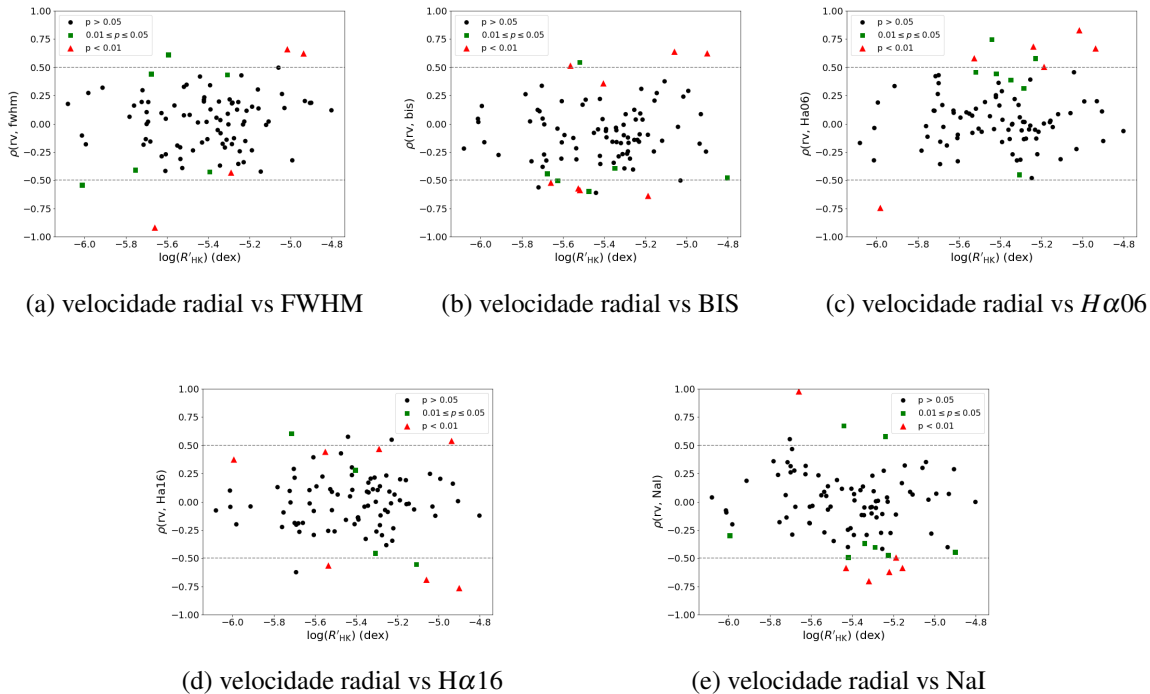


Fig. 4.3 Coeficientes de correlação de Spearman entre velocidade radial e índices de atividade, em função do indicador de atividade cromosférico R'_{HK} , para 96 estrelas. Atribuição de triângulos vermelhos para $p\text{-value} < 0.01$, quadrado verdes para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e pontos pretos para $p\text{-value} > 0.05$. As linhas horizontais indicam os limites de $|\rho| > 0.5$, para os quais consideramos a que correlação como "forte".

Da análise dos gráficos apresentados na Fig.4.3 observa-se que a velocidade radial se correlaciona significativamente com $H\alpha 06$, maioritariamente de forma positiva. Já quando se correlaciona significativamente com NaI , temos correlações negativas na sua maioria. (ver os triângulos vermelhos nos painéis c e e)

De seguida, na tabela 4.1 encontram-se o número de estrelas para as quais existem correlações fortes significativas (com 99% e 95% de significância) entre a velocidade radial e os índices de atividade. De modo a analisar mais detalhadamente, temos também a distinção no caso de haver correlação positiva ou negativa para os casos considerados.

	$\rho > 0.5$ sig. = 99%	$\rho < -0.5$ sig. = 99%	$\rho > 0.5$ sig. = 95%	$\rho < -0.5$ sig. = 95%
velocidade radial vs FWHM	2	3	3	4
velocidade radial vs BIS	3	4	4	6
velocidade radial vs $H\alpha 06$	6	1	8	1
velocidade radial vs $H\alpha 16$	2	3	3	4
velocidade radial vs NaI	1	5	3	5

Tabela 4.1 Correlações significativas entre velocidade radial e Índices de Atividade

Os indicadores de atividade estelar BIS e $H\alpha 06$ são os indicadores que mais vezes se correlacionam com a velocidade radial. No entanto nota-se uma clara homogeneidade no que concerne à quantidade de correlações de cada índice com a velocidade radial, levando a que nada se possa concluir, não sendo possível determinar qual é o indicador mais fortemente associado à velocidade radial.

Podemos no entanto corroborar, com o que foi analisado anteriormente - isto porque os valores na tabela 4.1 correspondem à quantidade de triângulos vermelhos e quadrados verdes da Fig. 4.2 -, quando se denota que existe uma relação substancialmente positiva entre o indicador $H\alpha 06$ e a variação da velocidade radial. Já quando a velocidade radial se correlaciona de forma significativamente forte com NaI, temos uma predominância de correlações negativas (painel e).

Nenhum índice se destaca particularmente na sua correlação com a velocidade radial. Deste modo, com o intuito de maximizar a precisão na deteção de potenciais falsos positivos na pesquisa de exoplanetas, deve-se adotar uma abordagem abrangente com o maior número possível de índices de atividade estelar.

4.3 Correlações vs Parâmetros estelares

Nesta secção procuramos verificar de que forma as correlações entre índices a velocidade radial variam para estrelas gigantes com diferentes características.

Segue-se a representação gráfica das correlações em função dos parâmetros estelares: temperatura efetiva, aceleração gravítica, metalicidade, massa, luminosidade e idade.

Os pares de índices de atividade apresentados são entre BIS e $H\alpha 06$ e entre BIS e NaI. Estes indicadores foram selecionados por se observar algumas particularidades que pretendemos relatar.

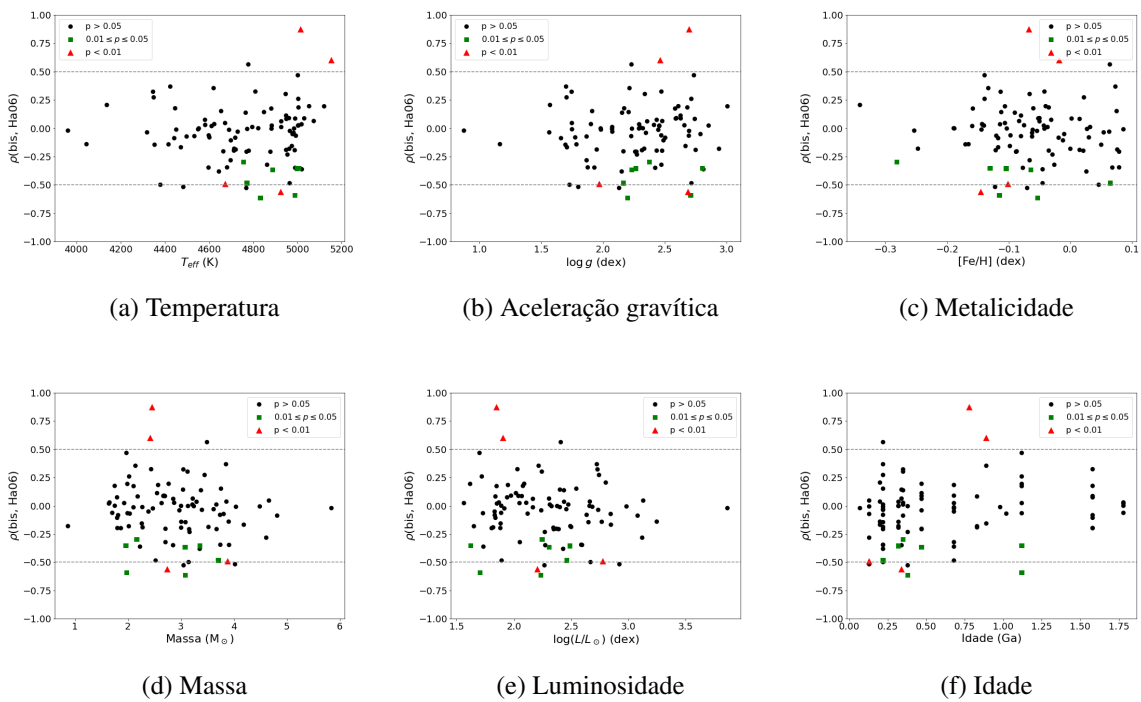


Fig. 4.4 Coeficientes de correlação de Spearman entre BIS e $H\alpha 06$, em função de parâmetros estelares, para 96 estrelas. Atribuição de símbolos diferentes para $p\text{-value} > 0.05$, $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e $p\text{-value} < 0.01$.

Na Figura 4.4, observa-se que as estrelas que exibem correlações significativas fortes entre BIS e $H\alpha 06$ estão associados a valores mais elevados de temperatura efetiva, valores superiores de aceleração gravítica, massas mais baixas e luminosidades inferiores. O mesmo ocorre quando se analisam as correlações entre BIS e NaI, na Fig. 4.5 em função dos parâmetros estelares. Sugere-se, então, que o índice BIS se correlaciona significativamente com os índices NaI e o $H\alpha 06$ em estrelas menos evoluídas.

De salientar ainda que para as correlações velocidade radial versus índices de atividade não se observam padrões relevantes, pelo que sugere-se que não haja dependência entre estas correlações e os parâmetros estelares.

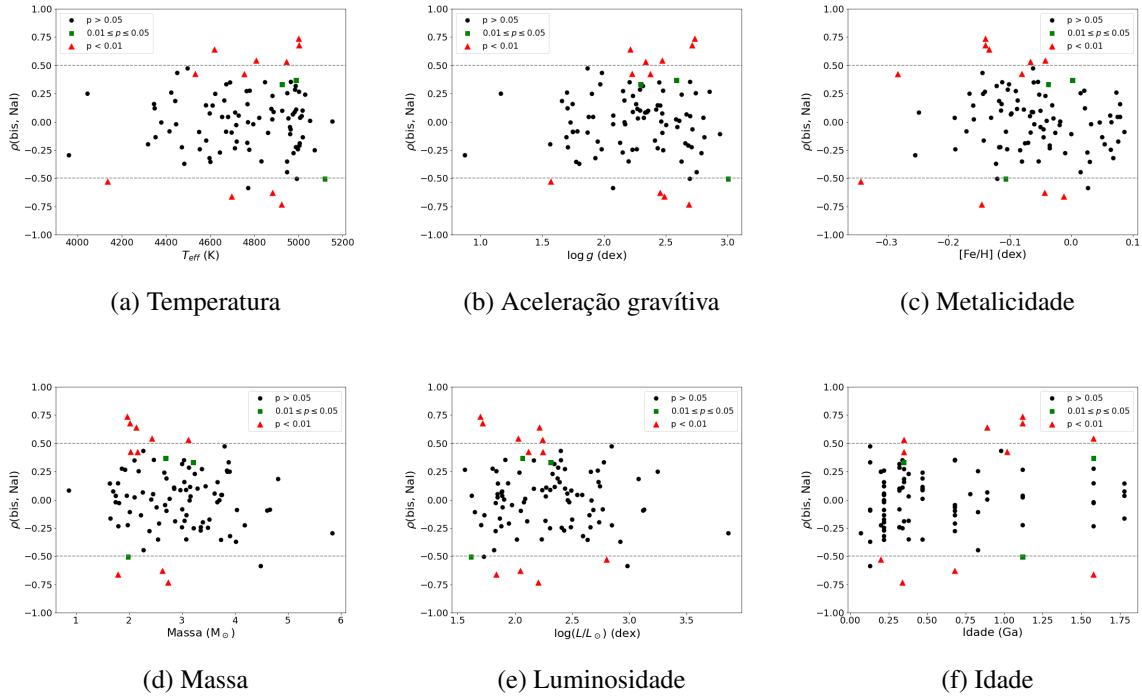


Fig. 4.5 Coeficientes de correlação de Spearman entre BIS e NaI, em função de parâmetros estelares, para 96 estrelas. Atribuição de símbolos diferentes para $p\text{-value} > 0.05$, $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$ e $p\text{-value} < 0.01$.

4.4 Correlações no estado evolutivo

Nesta secção, continuaremos a destacar as estrelas com correlações de Spearman significativamente fortes. Desta vez, verificando de que forma é que estas ocorrem de acordo com as suas fases evolutivas. Para tal, segue-se uma análise dos diagramas Hertzsprung-Russell para os aglomerados estelares, de forma individual, com as isócronas respetivas.

Esta abordagem foi feita para todas as 96 estrelas, pertencentes a 17 clusters. Como descrito no capítulo onde a amostra considerada foi descrita, três clusters apresentam apenas uma estrela com um número de observações suficientes para que seja obtido um coeficiente de correlação. A estrela NGC2345 50 é a mais massiva e evoluída da nossa amostra, tendo sido observadas variações significativas na velocidade radial correlacionadas com os indicadores de atividade, no estudo de Delgado Mena et al. [16]. Sendo NGC2345 o único dos aglomerados singulares representado nas figuras seguintes. As estrelas IC4756 52 e NGC6633 106 (também pertencentes a clusters onde somente uma estrela atende aos critérios de inclusão) estão incluídas no estudo desta secção, simplesmente não se encontram representadas no diagramas HR.

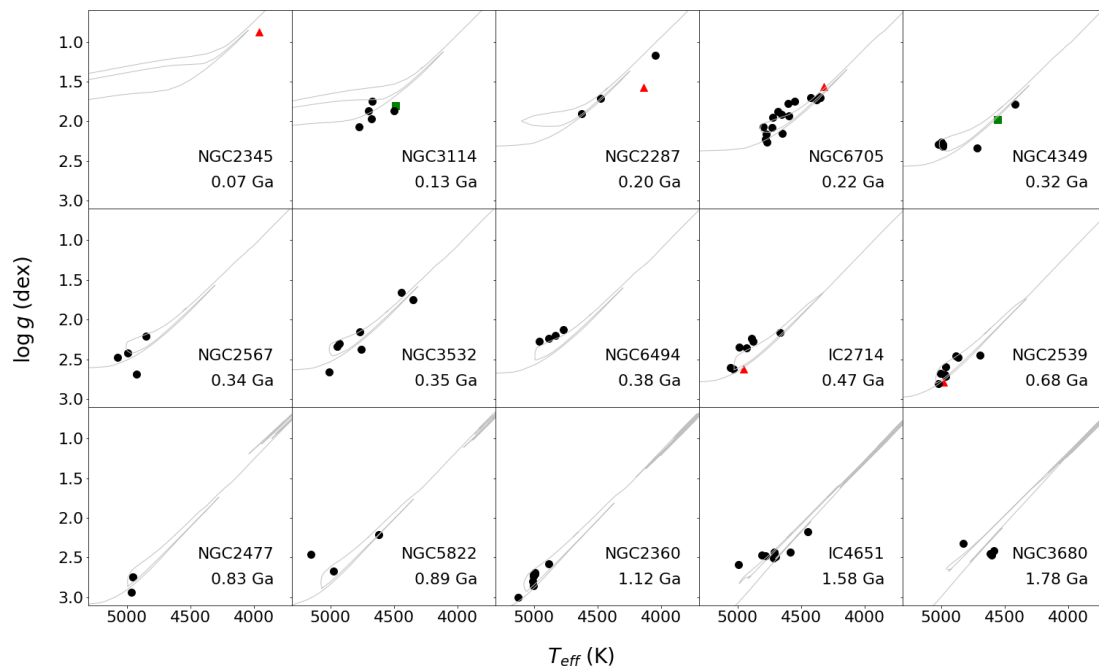


Fig. 4.6 Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($|\rho| > 0.5$) entre velocidade radial e FWHM. Atribuiu-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$.

- Triângulos vermelhos correspondem às estrelas: IC2714 110, NGC2287 87, NGC2345 50, NGC2539 246, NGC6705 779
- Quadrados verdes correspondem às estrelas: NGC3114 181, NGC4349 174

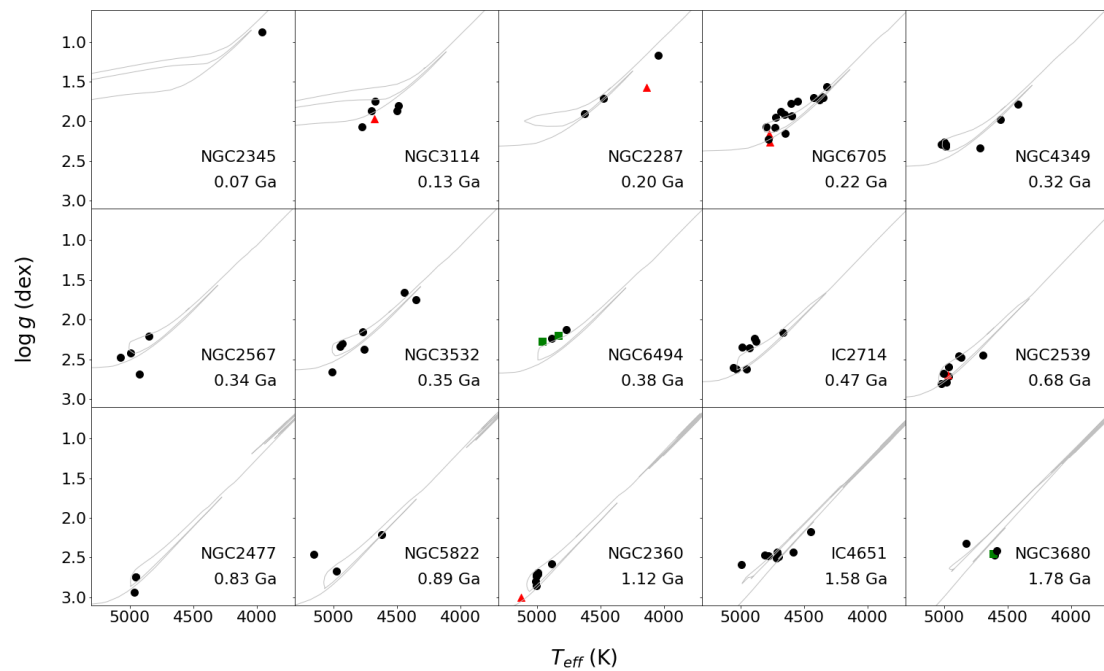


Fig. 4.7 Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($|\rho| > 0.5$) entre velocidade radial e BIS. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$.

- Triângulos vermelhos correspondem às estrelas: NGC2287 87, NGC2360 66, NGC2423 3, NGC2539 346, NGC3114 262, NGC6705 1101, NGC6705 1286
- Quadrados verdes correspondem às estrelas: NGC3680 41, NGC6494 48, NGC6494 49

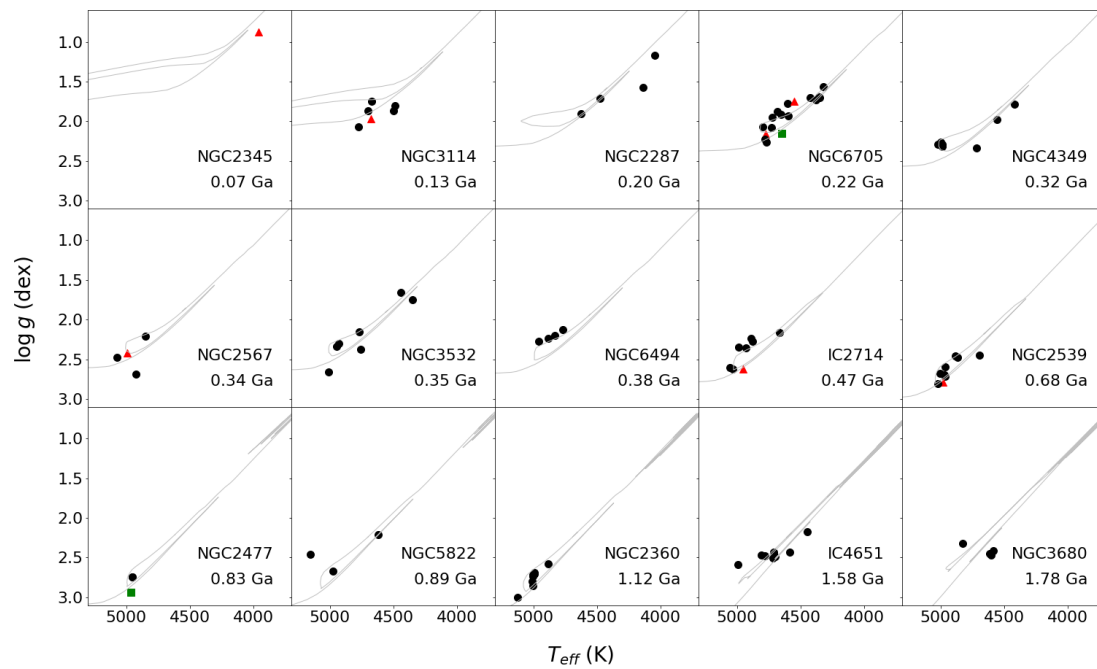


Fig. 4.8 Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($|\rho| > 0.5$) entre velocidade radial e $H\alpha 06$. Atribuiu-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$.

- Triângulos vermelhos correspondem às estrelas: IC2714 110, NGC2345 50, NGC2539 246, NGC2567 54, NGC3114 262, NGC6705 1286, NGC6705 2000
- Quadrados verdes correspondem às estrelas: NGC2477 2061, NGC6705 1145

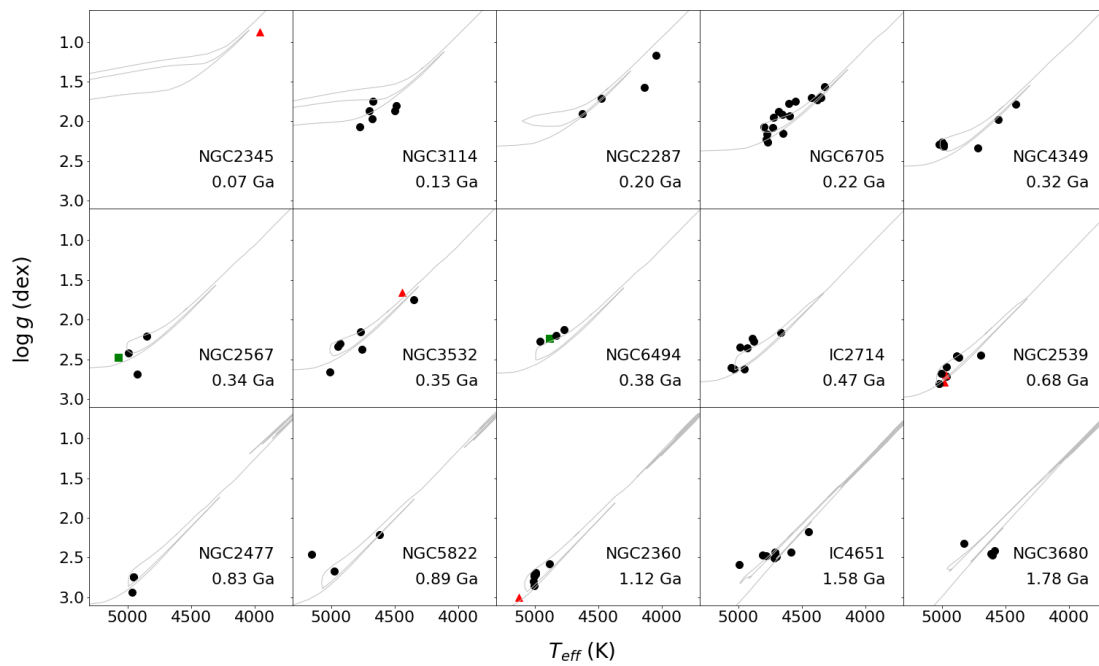


Fig. 4.9 Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($|\rho| > 0.5$) entre velocidade radial e $H\alpha 16$. Atribuiu-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$.

- Triângulos vermelhos correspondem às estrelas: NGC2345 50, NGC2360 66, NGC2539 246, NGC2539 346, NGC3532 221
- Quadrados verdes correspondem às estrelas: NGC2567 16, NGC6494 46

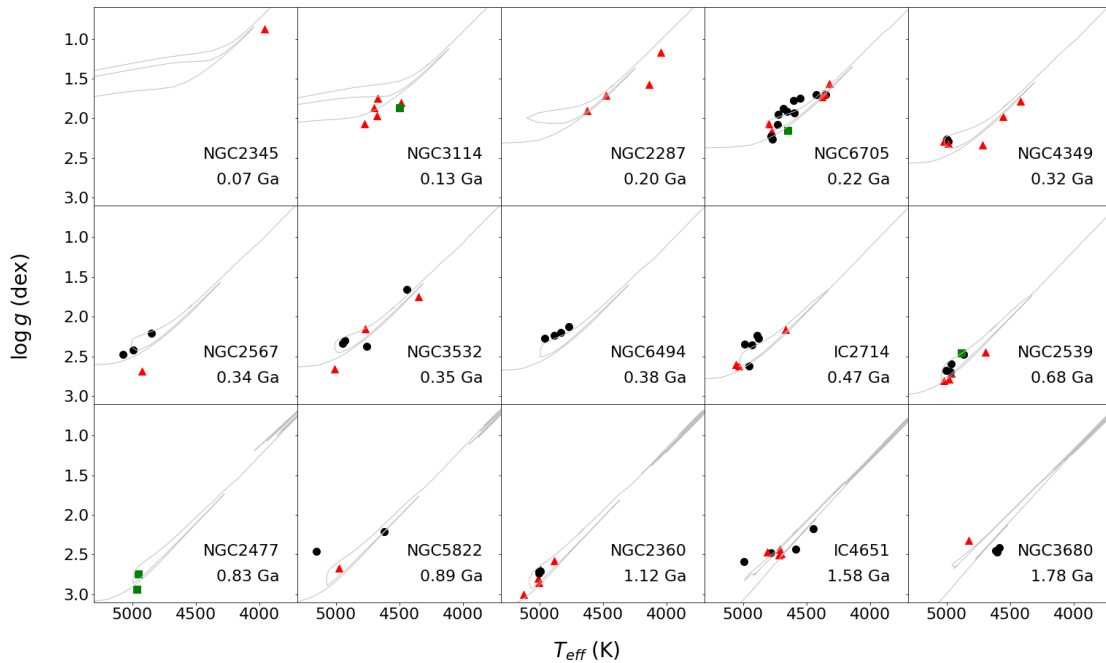


Fig. 4.10 Diagramas HR de clusters individuais com as respectivas isócronas, organizados por idade. Símbolos diferentes destacam correlações fortes ($|\rho| > 0.5$) entre $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$. Atribui-se um quadrado verde para $0.01 \leq p\text{-value} \leq 0.05$, e triângulo vermelho para $p\text{-value} < 0.01$.

- Triângulos vermelhos correspondem às estrelas: IC2714 121, IC2714 53, IC2714 87, IC4651 10393, IC4651 7646, IC4651 8540, IC4651 9025, NGC2287 21, NGC2287 75, NGC2287 87, NGC2287 97, NGC2345 50, NGC2360 119, NGC2360 66, NGC2360 79, NGC2360 85, NGC2360 86, NGC2423 3, NGC2477 5035, NGC2539 229, NGC2539 246, NGC2539 251, NGC2539 652, NGC2567 37, NGC3114 150, NGC3114 181, NGC3114 262, NGC3114 283, NGC3114 6, NGC3532 100, NGC3532 122, NGC3532 670, NGC3680 34, NGC4349 127, NGC4349 174, NGC4349 203, NGC4349 53, NGC4349 9, NGC5822 8, NGC6633 106, NGC6705 1256, NGC6705 1286, NGC6705 1364, NGC6705 1625, NGC6705 779
- Quadrados verdes correspondem às estrelas: NGC2477 2061, NGC2477 8216, NGC2539 463, NGC3114 238, NGC6705 1145

Observamos que algumas estrelas exibem correlações significativas em diferentes estados evolutivos, tanto no red clump como em estados mais evolutivos, verificando-se no aglomerado NGC6705 (ver Fig.4.8 e Fig.4.10). No entanto, devido à limitada quantidade de estrelas observadas e à falta de correlações consistentes nos mesmos estados evolutivos, não podemos tirar conclusões definitivas sobre essas relações.

Algumas estrelas mostram correlações fortes e significativas para vários pares de parâmetros, como exemplificado pela estrela NGC2345 50. Mas a maioria das estrelas apresentam correlações significativas apenas para um par específico, sem nenhuma tendência clara em relação ao estado evolutivo.

De salientar que as correlações entre $H\alpha_{06}$ e $H\alpha_{16}$, na Fig.4.10, destacam-se nos aglomerados mais jovens, aqueles que também possuem as estrelas mais massivas. Contudo, à medida que vamos observando as estrelas mais velhas, nem todas elas exibem uma correlação satisfatória. Isso, provavelmente, deve-se ao facto destes indicadores de atividade não refletirem o mesmo tipo de atividade.

No capítulo 2, onde é apresentada a amostra, temos a Fig.2.1 que nos indica um erro mediano suficientemente grande para que não seja possível identificarmos a fase evolutiva onde se encontram as estrelas. Para que se faça um estudo com conclusões mais concretas, seria necessário sabermos com maior precisão as fases evolutivas das estrelas da amostra. Assim sendo, seria interessante um estudo de asterosismologia, onde, a partir das densidades das estrelas se estipula de forma precisa o local da fase evolutiva onde as estrelas se encontram.

Capítulo 5

Análise e avaliação da evolução temporal de velocidade radial, FWHM, BIS e $H\alpha 06$, $H\alpha 16$ e NaI

Neste capítulo, pretende-se detetar periodicidades nas variações da velocidade radial que coincidam com as periodicidades observadas nos indicadores de atividade estelar. Essas coincidências indicariam que fenómenos atmosféricos na estrela (atividade) provocam variações na RV. Geralmente, as variações periódicas na atividade estelar são causadas pela rotação da estrela, podendo-se refletir em manchas escuras ou brilhantes a atravessarem o disco da estrela periodicamente. É por isso habitual que os indicadores de atividade tenham uma periodicidade próxima da rotação estelar. Ao calcularmos o período de rotação de uma forma que não dependa dos índices de atividade, testamos de forma independente se os períodos detetados na velocidade radial ou nos índices podem ser devido à rotação da estrela ou se podem ter outra origem, como por exemplo planetas em órbita ou outros mecanismos estelares.

Temos em análise os valores de velocidade radial e os índices dos parâmetros indicadores de atividade CCF (FWHM, BIS), bem como os índices de atividade espectrais ($H\alpha 06$, $H\alpha 16$ e NaI). Após a análise dos valores obtidos nas observações das 96 estrelas selecionadas na amostra, destacam-se algumas considerações sobre dez dessas estrelas, as quais receberão a devida atenção seguidamente, nas secções respetivas.

Foram produzidas as séries temporais da velocidade radial e dos índices de atividade, tendo em conta os erros respetivos. O tempo é dado na forma de data juliana, em notação científica. Em cada um desses gráficos apresentados, identifica-se no canto superior esquerdo o número de observações consideradas para a estrela em questão. No canto superior direito, temos o registo da média, amplitude e desvio padrão para cada parâmetro em estudo. Quando relevante, é apresentada a curva sinusoidal que melhor se ajusta aos dados.

A cada série temporal faz-se corresponder, à sua direita, um periodograma GLS (Generalized Lomb-Scargle), que analisa exatamente os mesmos dados (Zechmeister and Kürster [67]).

Nos periodogramas, as linhas verticais vermelhas assinalam os 3 períodos com maior significância. Os valores destes períodos são apresentados no canto superior esquerdo. De referir que nos casos em que é apresentada uma linha sinusoidal na série temporal, esta senoide teria o período mais

significativo apresentado pelo periodograma correspondente. Em casos particulares, usaremos o segundo ou o terceiro período mais significativo, consoante a pertinência para a análise gráfica geral da estrela em questão.

As linhas horizontais marcam o FAP (false alarm probability) para probabilidades iguais a 0.1, 0.5 e 1%. Sendo que, a dada periodicidade, um pico acima da linha horizontal superior representa especificamente uma probabilidade menor que 0.1% de uma distribuição aleatória dos dados gerar um tal pico a essa periodicidade. Isso significa que há uma probabilidade menor que 0.1% de que este período se deva ao acaso (>99.9% probabilidade de ser real), e portanto, identificamos esse período como significativo. As linhas verticais cinzentas estão a referenciar os períodos de um ano (p) e as suas primeiras harmónicas, metade ($p/2$) e um terço de um ano ($p/3$).

Destaca-se também a identificação do período de rotação máxima da estrela, representado graficamente por uma linha vertical verde. A mesma marca o período no qual ocorre a rotação máxima da estrela em estudo. A determinação desse período é um dado adicional importante, pois permite-nos compreender se é a dinâmica rotacional da estrela juntamente com variações nos indicadores de atividade identificadas que estão na base de oscilações na RV. O período de rotação máxima de uma estrela, dado em dias, é determinado pela seguinte expressão:

$$P_{rotmax} = \frac{2\pi \cdot \text{raio} \cdot 6.9340 \times 10^8}{v \sin i \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot 24} \quad (5.1)$$

De referir que, nesta expressão, a constante 6.9340×10^8 é usada para converter o raio da estrela de unidades solares para centímetros, para desta forma todos os termos da fórmula serem compatíveis em unidades de comprimento. O mesmo acontece com as restantes constantes numéricas.

A equação 5.1 tem em consideração propriedades físicas e características observacionais da estrela, atendendo ao facto de que depende das variáveis raio da estrela e $v \sin i$. Denomina-se $v \sin i$ a velocidade de rotação projetada, ou seja a velocidade de rotação aparente de uma determinada estrela, quando observada na Terra, sendo tida em consideração a inclinação do eixo de rotação da estrela em relação à linha de visão do observador na Terra.

No caso de $v \sin i$ ser nula, ou aproximadamente nula, não é possível determinar o período de rotação máxima. Isto ocorre em duas situações possíveis: no caso da inclinação ser zero, estando a linha de visão alinhada com um dos polos da estrela; ou no caso da inclinação ser 90° , estando a linha de visão do observador alinhada com o equador, e a velocidade ser tão reduzida que a precisão da técnica de medida de $v \sin i$ não consegue detetar. E, um destes casos pode ser a razão pela qual, nas estrelas IC4651 8540 e NGC2287 87 não foi possível determinarmos o período de rotação máxima, e daí não estar representada a linha vertical verde nos periodogramas respetivos.

Adicionalmente, foram calculados os três períodos de maior percentagem de significância, para as distribuições das seis variáveis em estudo. Os que considerámos relevantes para a análise em estudo de cada estrela em particular encontram-se destacados a negrito.

Segue-se uma abordagem que visa identificar correlações de Spearman entre os parâmetros aqui investigados (velocidade radial e indicadores de atividade). Nesse sentido apresentamos os devidos valores de coeficiente de correlação e p-value correspondente a cada par de parâmetros a relacionar numa tabela, identificando a negrito correlações fortes e significativas, ou relevantes no contexto da análise.

5.1 IC4651 8540

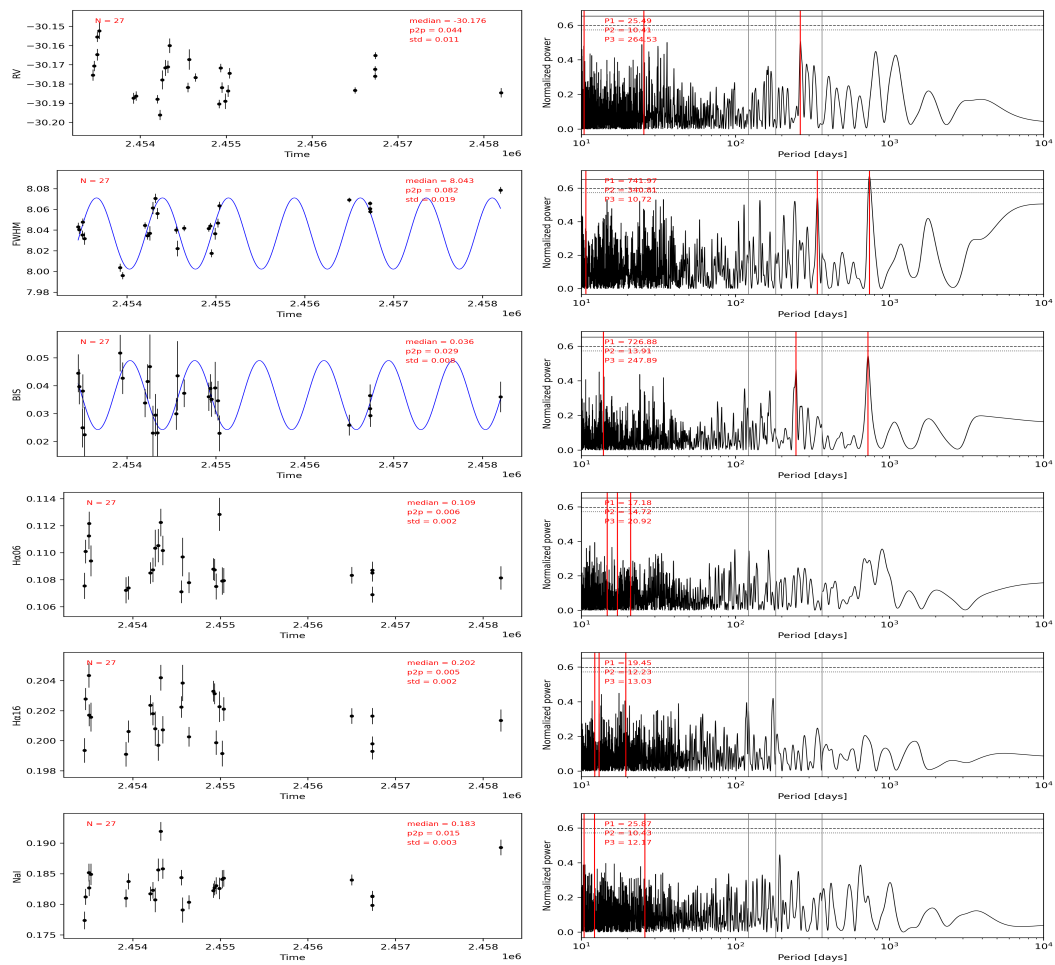


Fig. 5.1 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela IC4651 8540.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
25.49	741.97	726.88	17.18	19.45	25.87
10.41	340.81	13.91	14.72	12.23	10.43
264.53	10.72	247.89	20.02	13.03	12.17

Tabela 5.1 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	0.197	0.326								
BIS	-0.396	0.041	-0.496	0.008						
H α 06	0.386	0.046	0.063	0.753	-0.107	0.596				
H α 16	0.090	0.656	-0.046	0.821	-0.054	0.790	0.523	0.005		
NaI	0.135	0.502	0.302	0.126	-0.662	<0.001	0.212	0.289	0.187	0.349

Tabela 5.2 Coeficientes de correlação de Spearman, e respetivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela IC4651 8540.

Atendendo aos valores de períodos significativos que constam na tabela 5.1, verificamos que todos os períodos em velocidade radial parecem ter equivalência pelo menos com um dos índices, sendo sugestivo de que as variações de velocidade radial tenham origem estelar. Destaca-se um período de 25 dias em NaI, potencialmente em H α 16 e H α 06; um período de 10 dias, que aparece em NaI, em FWHM e potencialmente em H α 16; e por fim, um período de aproximadamente 260 dias, que é identificado também no indicador de atividade BIS.

Na presente análise, identificamos um período muito significativo (FAP < 1%) na variação do FWHM das linhas espectrais da estrela de 741,99 dias. Verifica-se proximidade do período mais significativo identificado para a variável BIS, sendo este período de 726,88 dias. Notavelmente, identificamos uma correlação de Spearman negativa forte e significativa entre FWHM e BIS, tabela 5.2, no entanto essa variação não é detetada na velocidade radial nem em outros indicadores de atividade. Os índices BIS e FWHM estão provavelmente a medir o mesmo fenómeno. Podemos suspeitar que seja a rotação da estrela, porém o facto de não ter sido possível determinar o período de rotação máxima impossibilita-nos de confirmar esse resultado.

No periodograma relativo à velocidade radial, verificamos um pico coincidente a estes dois períodos, anteriormente mencionados, de FWHM e BIS, revelando que estes dois parâmetros indicativos de atividade estelar podem ser motivo das variações da velocidade radial nesta estrela. O período significativo da velocidade radial em 264 dias parece ser um harmónico (P/3) do período observado em BIS e FWHM.

É ainda de realçar que observamos uma anti-correlação significativamente forte entre BIS e o índice de atividade NaI, sugerindo que as variações na atividade cromosférica podem estar de alguma forma relacionadas com as alterações na assimetria das linhas espectrais.

Variações periódicas com cerca de 700 dias foram identificadas em várias gigantes estelares em estudos anteriores (por ex. Delgado Mena et al. [15]; Hatzes et al. [31]; Delgado Mena et al. [16]). Em muitos desses casos, sinais de atividade estelar com esse período podem reproduzir sinais que se assemelham à presença de planetas. Essa observação sugere que, para estrelas em estados evoluídos, os fenómenos de atividade estelar tendem a manifestar-se em períodos mais longos.

No que concerne aos parâmetros H α 06 e H α 16, encontramos uma correlação forte significativa destacando a relação entre as variações na atividade cromosférica em diferentes camadas da atmosfera estelar.

5.2 IC4651 9122

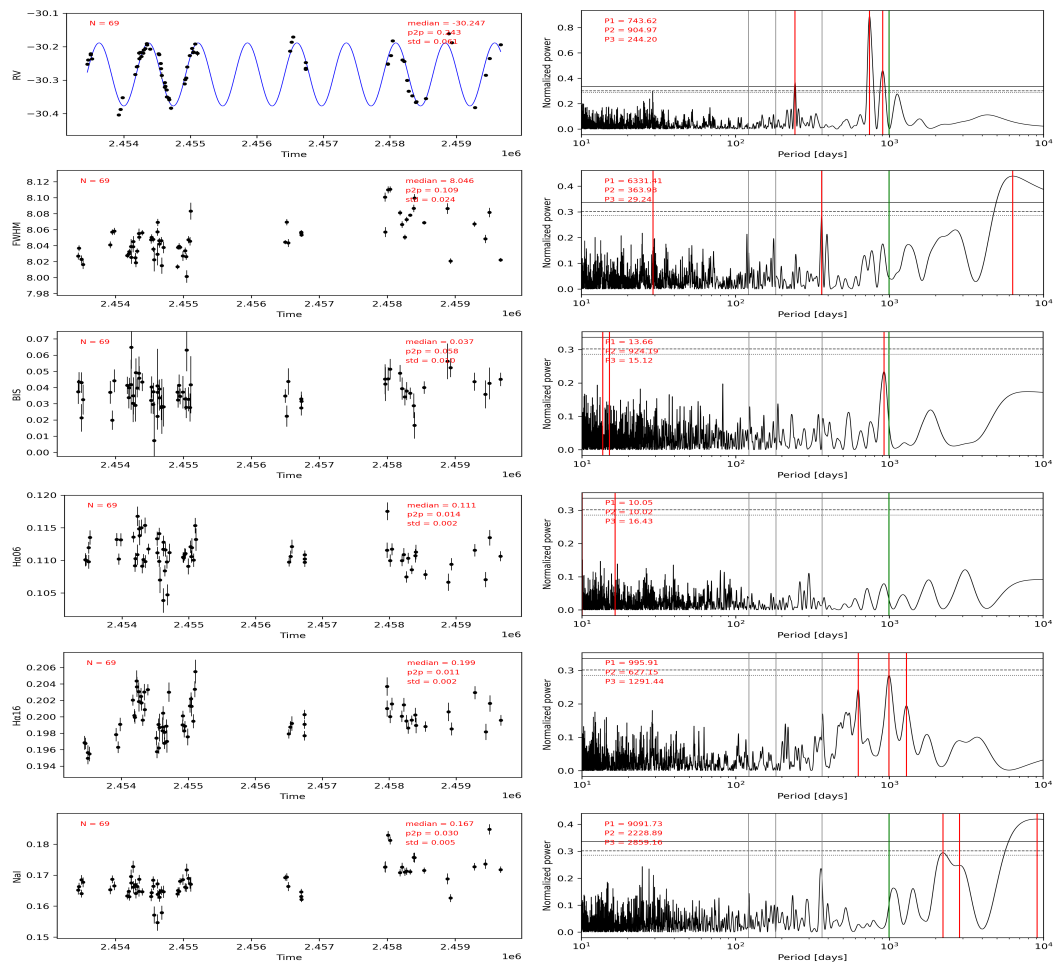


Fig. 5.2 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela IC4651 9122.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
743.62	6331.41	13.66	10.05	995.91	9091.73
904.97	363.98	924.19	10.02	627.15	2228.89
244.20	29.24	15.12	16.43	1291.44	2859.16

Tabela 5.3 Períodos significativos nos periodogramas

42 Análise e avaliação da evolução temporal de velocidade radial, FWHM, BIS e H α 06, H α 16 e NaI

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	-0.137	0.263								
BIS	0.358	0.003	0.068	0.576						
H α 06	0.162	0.184	0.083	0.497	0.074	0.543				
H α 16	0.278	0.021	0.211	0.081	0.282	0.019	0.446	<0.001		
NaI	0.115	0.345	0.495	<0.001	0.145	0.233	0.096	0.432	0.253	0.036

Tabela 5.4 Coeficientes de correlação de Spearman, e respetivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela IC4651 9122.

Observando o painel superior esquerdo da Fig. 5.2, verifica-se claramente a oscilação dos valores da velocidade radial referentes à estrela IC4651 9122, sendo que estes dados se ajustam quase perfeitamente à curva sinusoidal apresentada, tendo esta um período de 743.62 dias.

Na tabela 5.4, verificamos que os indicadores de atividade que melhor se correlacionam com a velocidade radial são BIS e H α 16, de forma significativa, o que vem corroborar a análise dos periodogramas, que têm claramente picos coincidentes, que são referentes a períodos significativos entre 900 e 1000 dias, como se pode comprovar na tabela 5.3.

De salientar que o período de rotação máxima identificado foi de 995,21 dias, com uma incerteza de 53,99 dias. Isto indica um intervalo de possíveis valores para o período de rotação máxima desta estrela, compreendido entre 941,22 e 1049,20 dias. Este é coincidente com o período mais significativo de H α 16, e próximo dos períodos anteriormente mencionados de velocidade radial e BIS.

Fica evidente que a variação periódica na velocidade radial, cujo período de 743,62 dias se ajusta perfeitamente aos dados, deve-se à presença de um exoplaneta a orbitar esta estrela com um período de translação próximo. No entanto não se pode depreender que o período orbital deste planeta seja exatamente este, pois a velocidade radial sofre alguma influencia por parte da atividade estelar. É de salientar ainda que, em 2018, foi detetado um exoplaneta (IC4651N09122b) a orbitar esta estrela, através do método da velocidade radial, o qual nos proporcina parte destas conclusões.

Consegue-se observar na velocidade radial o período do planeta (Leão et al. [34]) e o possível período de rotação a cerca de 900 dias (que aparece nos índices BIS e H α 16, tendo também sido calculado de forma independente). Isto parece indicar que a estrela é observada perto do equador ($i \approx 90^\circ$).

Ainda se deve referir correlações significas entre os indicadores FWHM e NaI, bem como entre H α 06 e H α 16.

5.3 NGC2287 87

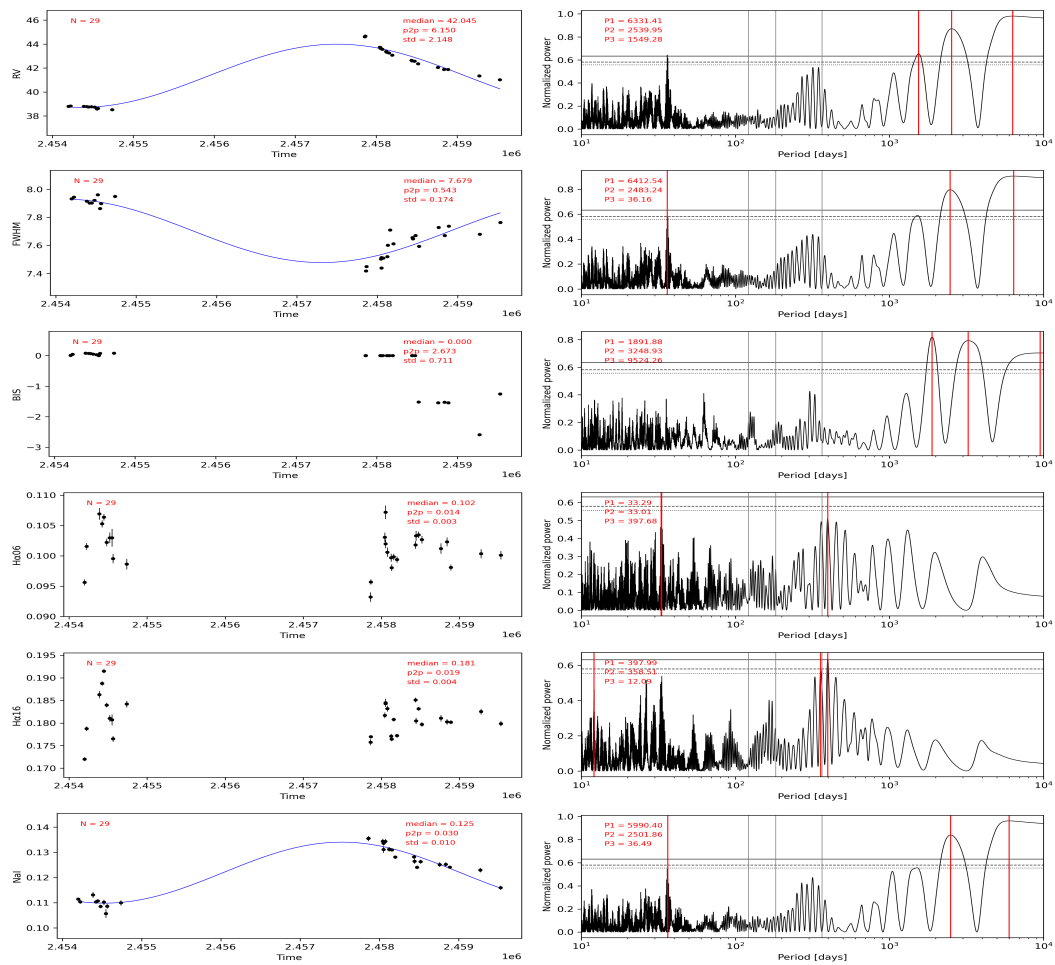


Fig. 5.3 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2287 87.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
6331.41	6412.54	1891.88	33.29	397.99	5990.40
2539.95	2483.24	3248.93	33.01	358.51	2501.86
1549.28	36.16	9524.26	397.68	12.09	36.49

Tabela 5.5 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	-0.920	<0.001								
BIS	-0.522	0.004	0.557	0.002						
H α 06	-0.193	0.317	0.104	0.590	0.205	0.285				
H α 16	-0.187	0.331	0.174	0.366	0.257	0.178	0.711	<0.001		
NaI	0.977	<0.001	-0.909	<0.001	-0.530	0.003	-0.239	0.212	-0.196	0.308

Tabela 5.6 Coeficientes de correlação de Spearman, e respetivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2287 87.

Começamos por referir que o ajuste sinusoidal para velocidade radial, FWHM e NaI está de acordo com os períodos identificados como mais significativos destes parâmetros, rondando os 6000 dias. O que não corresponde a um período realista, pois deve-se simplesmente ao facto de termos uma grande janela temporal na qual não foram feitas observações.

Analisando a Fig.5.3 e a tabela 5.5 evidenciam-se períodos significativos de velocidade radial, FWHM, e NaI próximos (2539.95, 2483.24 e 2501.86 dias, respetivamente). A tabela 5.6 atesta esta análise, sendo que os dados estabelecem uma correlação significativa e muito forte entre a velocidade radial e os indicadores de atividade FWHM, BIS e NaI, usando o teste de correlação de Spearman.

Observa-se ainda um período significativo no periodograma da velocidade radial, menor de 100 dias, sendo que este também aparece em FWHM e NaI. Na tabela 5.5 verificamos que este período é de 36 dias.

A velocidade radial apresenta um período significativo de 1549.28 dias.

Já o indicador de atividade BIS exhibe períodos significativos de 1891.88 e 3248.93 dias.

Ainda se pode verificar que os índices H α 06 e H α 16 revelam períodos significativos de aproximadamente 398 dias, que são perto do sinal de 1 ano, provavelmente provocados pela cadência das observações. Além disso, revela-se uma correlação significativa entre estes índices.

5.4 NGC2345 50

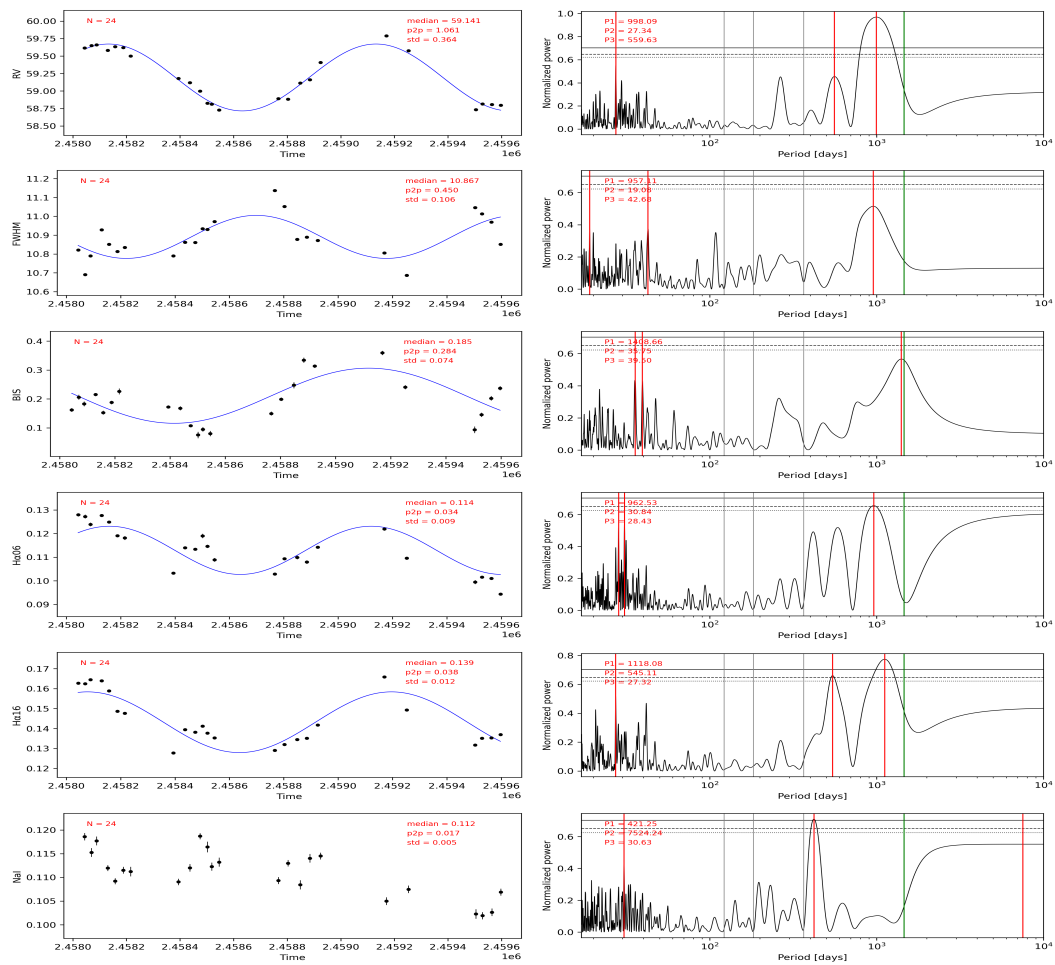


Fig. 5.4 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2345 50.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
998.09	957.11	1408.66	962.53	1118.08	421.25
27.34	19.08	35.75	30.84	545.11	7524.24
559.63	42.68	39.50	28.43	27.32	30.63

Tabela 5.7 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	-0.740	<0.001								
BIS	0.435	0.026	-0.456	0.019						
H α 06	0.723	<0.001	-0.350	0.080	-0.021	0.919				
H α 16	0.670	<0.001	-0.412	0.037	0.079	0.701	0.852	<0.001		
NaI	0.213	0.296	0.009	0.964	-0.297	0.141	0.611	0.001	0.465	0.017

Tabela 5.8 Coeficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2345 50

O período de rotação máxima da estrela NGC2345 50 é estimado em 1463.31 dias, com intervalo de confiança [1442.96 ; 1471.57]. Destaca-se uma notável proximidade entre o período mais significativo de BIS e o período máximo de rotação, tendo o primeiro um valor de 1408.66 dias.

Foi identificado um período significativo de velocidade radial de 998.09 dias, evidenciando-se uma associação com o período mais significativo de FWHM (957.11 dias), bem como com os períodos relevantes de H α 06 e H α 16, com durações de 962.53 e 1118.08 dias, respectivamente.

Também é apresentado um período significativo, aquando da análise gráfica, para o índice de sódio, sendo este de 421.25 dias. Adicionalmente, destacam-se os períodos significativos próximos de velocidade radial e H α 16, 559.63 e 545.11 dias, respectivamente.

Atendendo aos valores da tabela que estuda as correlações de Spearman para as variáveis nesta estrela, verifica-se que a velocidade radial e os indicadores de atividade estelar FWHM, H α 06 e H α 16 denotam uma forte e significativa correlação. Constata-se ainda uma forte correlação entre H α 06 e H α 16, bem como entre NaI e H α 06.

Dos resultados desta análise, pode-se concluir que há uma evidente influência da atividade estelar nas variações da velocidade radial, perante os dados das observações da estrela NGC2345 50. Facilmente, se suspeitaria da existência de um planeta a orbitar esta estrela perante a análise à velocidade radial, podendo ser claro um ajuste dos dados à curva sinusóide, no painel superior esquerdo da Fig.5.4, ressaltando a importância da análise e compreensão dos efeitos da atividade estelar nas flutuações dos valores da velocidade radial de uma estrela.

Este é um bom exemplo de como correlações fortes podem surgir entre indicadores quando as variações periódicas estão quase perfeitamente sincronizadas em fase. Observamos a sinusóide muito semelhante nas curvas de velocidade radial, H α 06 e H α 16, o que nos remete para uma correlação positiva entre esses parâmetros, devidamente confirmada. Além disso, notamos uma clara 'sinusóide inversa' nas curvas de velocidade radial e FWHM, indicando que as suas variações estão em oposição de fase. Este padrão resulta numa correlação negativa entre esses indicadores. Essas observações destacam a importância de considerar não apenas a presença de correlações, mas também a concordância de fase ao interpretar as relações entre diferentes parâmetros estelares.

5.5 NGC2423 3

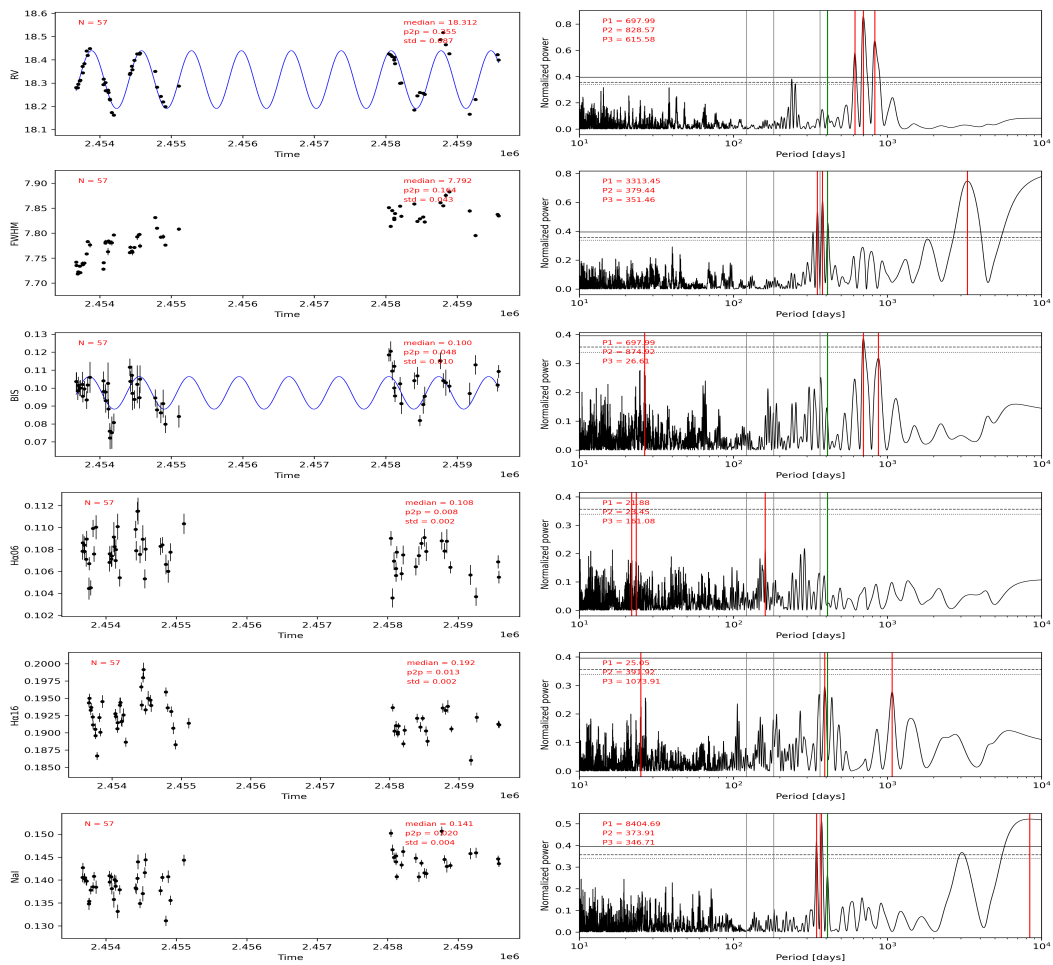


Fig. 5.5 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2423 3

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
697.99	3313.45	697.99	21.88	25.05	8404.69
828.57	379.44	874.92	23.44	391.92	373.91
615.58	351.46	26.61	161.08	1073.91	346.71

Tabela 5.9 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	0.162	0.229								
BIS	0.515	<0.001	0.122	0.366						
H α 06	0.101	0.454	-0.192	0.153	-0.070	0.607				
H α 16	0.223	0.095	-0.258	0.053	0.210	0.116	0.601	<0.001		
NaI	0.234	0.080	0.607	<0.001	0.424	0.001	-0.155	0.251	-0.144	0.287

Tabela 5.10 Coeficientes de correlação de Spearman, e respetivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2423 3.

Começamos por evidenciar o perfeito ajuste sinusoidal aos dados da velocidade radial, como mostra o painel superior esquerdo da Fig 5.5. O período desta função senoide, de 697.99 dias, é muito significativo, igualando o período mais significativo de BIS, também com probabilidade de falso alarme inferior a 0.1%. A inter-relação entre a velocidade radial e BIS é demarcada ainda por uma correlação de Spearman significativamente forte.

Nesta análise identificam-se também outros períodos significativos de velocidade radial (828.57 e 615.58 dias), bem como para BIS (874.92 dias). Observando os periodogramas verifica-se um padrão nas oscilações destas variáveis semelhantes. É de notar que este padrão se repete com menos significância tanto nos periodogramas de velocidade radial e BIS, bem como nos periodogramas dos restantes indicadores de atividade estelar em análise, indicando que estas podem indicar períodos de funções harmónicas.

Identificaram-se períodos significativos para FWHM, de 379.44 e 351.46 dias. Próximos a estes, da análise do periodograma de NaI, temos períodos significativos de 373.91 e 346.71 dias, tendo os indicadores de atividade FWHM e NaI uma correlação de Spearman forte e significativa. O período significativo identificado em H α 16 (391.92 dias) também apresenta alguma proximidade, no entanto este só revela correlação significativamente forte com o indicador de atividade H α 06.

Por um lado, podemos considerar que estes são períodos de oscilações harmónicas, e numa outra possibilidade temos o facto destes valores estarem próximos de um ano, o que nos leva a crer que podem dever-se à cadência dos dados, não representando um sinal verdadeiramente significativo nesta análise. Ainda acresce o facto do intervalo de confiança calculado para o período de rotação máxima ser [385.44 ; 433.90] dias, apontando para a relação entre a rotação da estrela e a identificação de atividade na mesma.

Quanto à relação aqui estabelecida entre a velocidade radial e o indicador de atividade BIS sugere-nos que as oscilações da velocidade radial na estrela NGC2423 3 são resultado de variações da simetria do CCF, provavelmente causadas por alterações na atividade estelar.

5.6 NGC2539 246

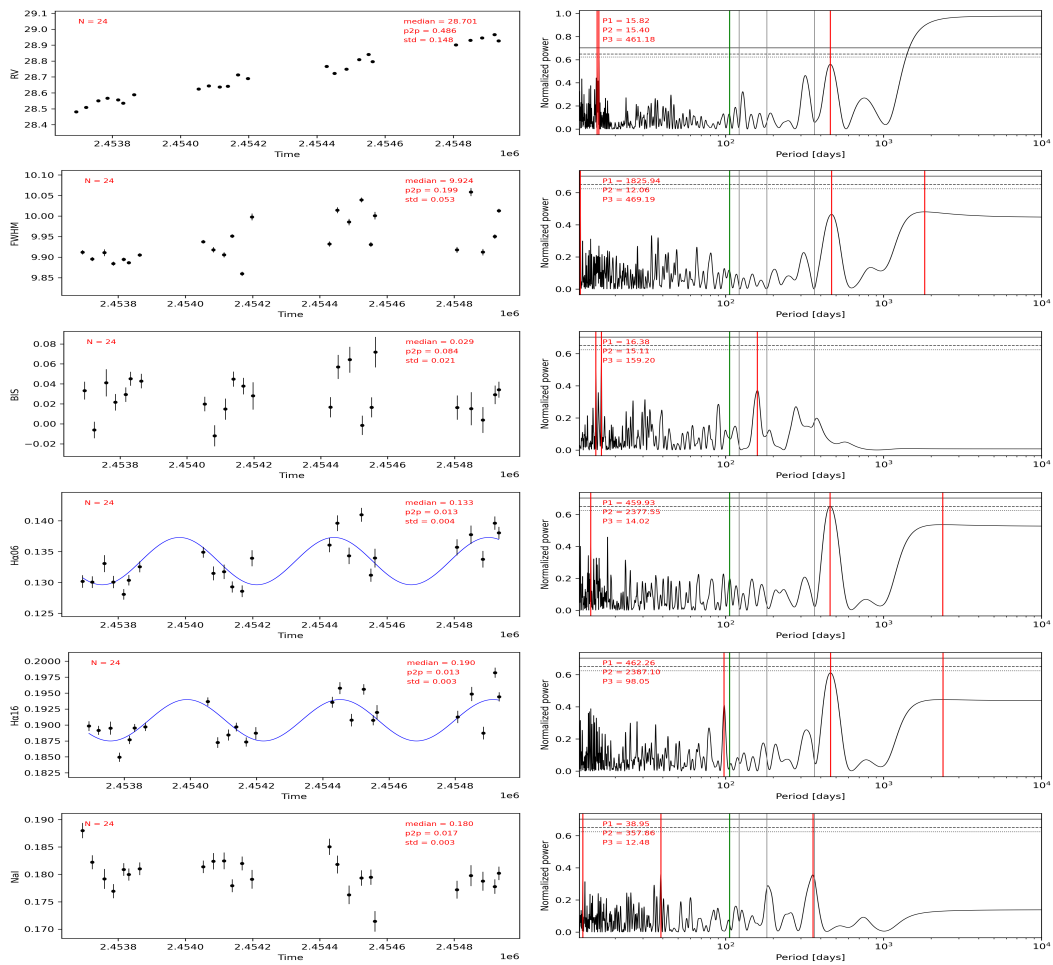


Fig. 5.6 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2539 246.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
15.82	1825.94	16.38	459.93	462.26	38.95
15.40	12.06	15.11	2377.55	2387.10	357.86
461.18	469.19	159.20	14.02	98.05	12.48

Tabela 5.11 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	0.623	0.001								
BIS	-0.177	0.409	0.050	0.815						
H α 06	0.667	<0.001	0.774	<0.001	-0.051	0.812				
H α 16	0.539	0.007	0.745	<0.001	0.161	0.453	0.823	<0.001		
NaI	-0.403	0.051	-0.264	0.212	-0.278	0.188	-0.193	0.366	-0.132	0.538

Tabela 5.12 Coeficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2539 246.

No estudo desta estrela, começamos por destacar um período de considerável significância no periodograma referente à velocidade radial, tendo este um valor igual a 461.18 dias. Notavelmente, períodos similares são identificados nos periodogramas de alguns indicadores de atividade, como é o caso do índice FWHM, com duração de 469.19 dias, bem como H α 06 e H α 16 com períodos de 459.93 e 462.26 dias, respetivamente. A semelhança nestes períodos significativos, visualmente observáveis na Fig. 5.11, bem como a correlação de Spearman, que concerne correlações significativamente fortes entre todas estas variáveis (velocidade radial, FWHM, H α 06 e H α 16), indicam a influência da atividade estelar na velocidade radial da estrela NGC2539 246.

De salientar que no painel superior esquerdo da Fig. 5.11, onde se encontra a série temporal referente à velocidade radial, observa-se uma tendência de variação de longa duração nas velocidades radiais, visível. É provável que isto se deva a uma estrela companheira de longo período (provavelmente uma anã castanha ou uma estrela de baixa massa). Todavia, aqui focamos-nos nas variações a curto prazo. De referir que, para uma melhor compreensão na análise desta estrela, seria importante efetuar uma correção dos valores da velocidade radial, afim de ser removido o efeito da binária na estrela NGC2539 246. Adicionalmente, foi feita esta correção, que nos mostrou um periodograma para velocidade radial sem os períodos significativos em torno dos 460 dias. Pelo que as conclusões sobre a influência da atividade estelar na velocidade radial deixa de fazer sentido, no estudo desta estrela. No entanto, há ainda um aspecto a considerar. Aquando da determinação do período de rotação máxima desta estrela, aferiu-se um valor de 106.02 dias, com uma incerteza calculada de 3.4 dias. Devido à consistente correlação entre os índices de atividade H α 06, H α 16 e FWHM, estima-se que o período de rotação da estrela possa ser próxima dos 460 dias.

5.7 NGC2539 447

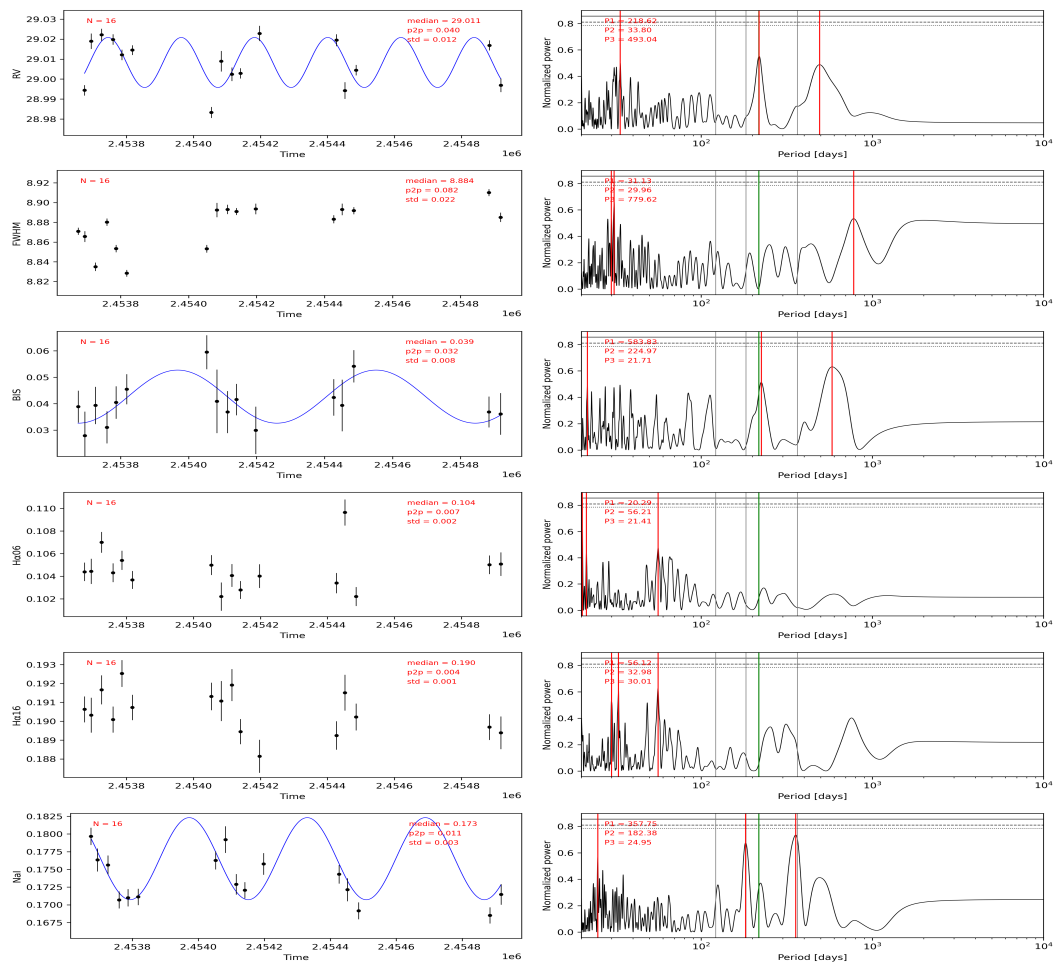


Fig. 5.7 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2539 447.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
218.62	31.13	583.83	20.29	56.12	357.75
33.80	29.96	224.97	56.21	32.98	182.38
493.04	779.62	21.71	21.41	30.01	24.95

Tabela 5.13 Períodos significativos nos periodogramas

52 Análise e avaliação da evolução temporal de velocidade radial, FWHM, BIS e H α 06, H α 16 e NaI

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	-0.056	0.837								
BIS	-0.346	0.189	-0.300	0.259						
H α 06	-0.135	0.617	-0.182	0.499	-0.322	0.223				
H α 16	-0.329	0.213	-0.347	0.188	0.216	0.421	0.388	0.137		
NaI	-0.118	0.664	-0.165	0.542	-0.099	0.716	-0.076	0.778	0.126	0.641

Tabela 5.14 Coeficientes de correlação de Spearman, e respetivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2539 447.

Embora, segundo os periodogramas não hajam períodos significativos, observa-se uma proximidade notável entre períodos associados à velocidade radial, de 218.62 dias, e o indicador de atividade estelar BIS, de 224.97 dias. Estes também se apresentam próximos do período de rotação máxima determinado, sendo este último igual a 217.42 dias, com intervalo de confiança de [209.20 ; 225.65] dias.

Entretanto, cabe mencionar que a sobreposição visual das linhas verde e vermelha apresenta uma limitação na análise do periodograma da velocidade radial, uma vez que a linha verde, indicadora do período de rotação máxima, não é visualmente perceptível devido à coincidência com uma das linhas vermelhas identificadas no periodograma.

Relativamente à tabela com as correlações de Spearman, não foram identificados resultados de destaque, sugerindo que não há associações significativas entre os parâmetros investigados, no âmbito das correlações analisadas. Pode isto dever-se simplesmente ao facto de termos um número reduzido de observações da estrela NGC2539 447.

5.8 NGC2567 37

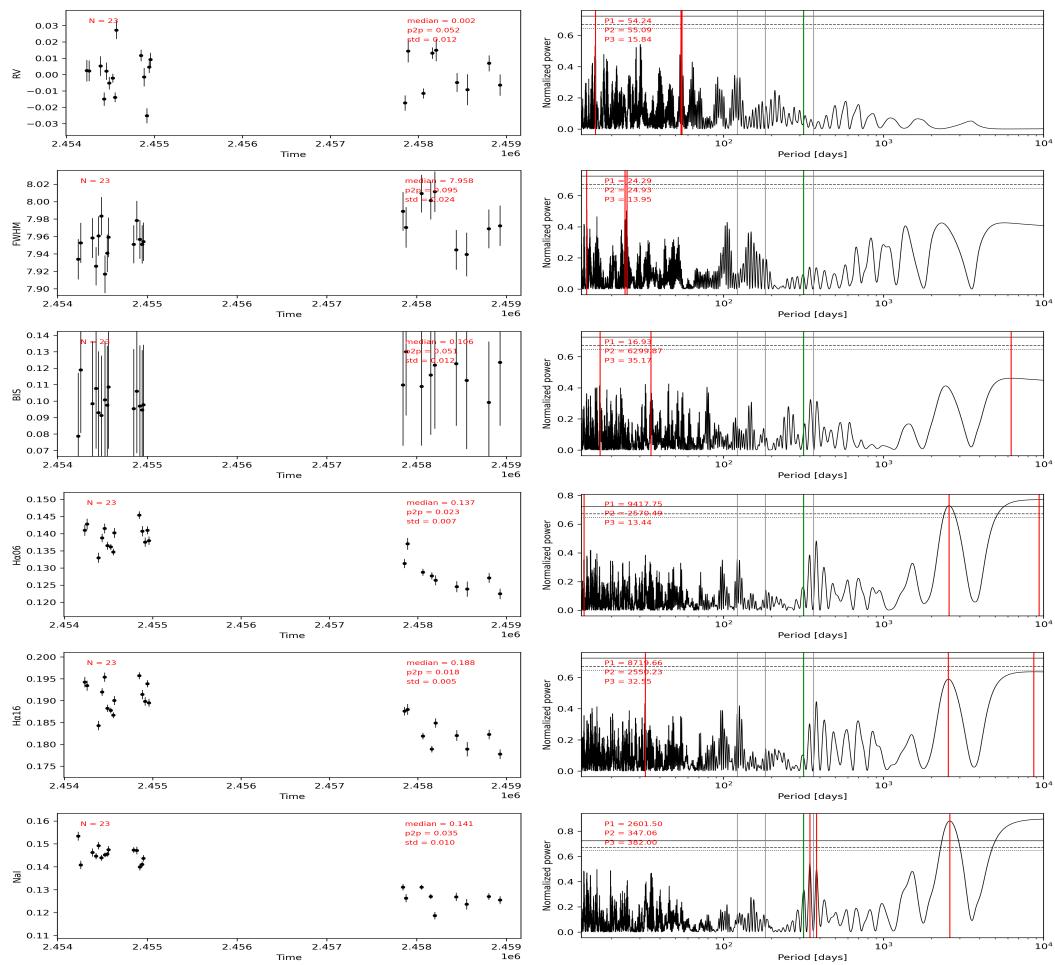


Fig. 5.8 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC2567 37.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
54.24	24.29	16.93	9417.75	8719.66	2601.50
55.09	24.93	6299.87	2550.23	2550.23	347.06
15.84	13.95	35.17	13.44	32.55	382.00

Tabela 5.15 Períodos significativos nos periodogramas

54 Análise e avaliação da evolução temporal de velocidade radial, FWHM, BIS e H α 06, H α 16 e NaI

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	0.202	0.356								
BIS	0.085	0.700	0.304	0.158						
H α 06	0.200	0.361	-0.303	0.159	-0.562	0.005				
H α 16	0.160	0.466	-0.328	0.126	-0.594	0.003	0.965	<0.001		
NaI	0.069	0.754	-0.355	0.097	-0.733	<0.001	0.757	<0.001	0.717	<0.001

Tabela 5.16 Coeficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC2567 37.

Na estrela NGC2567 37 não se verificam períodos significativos na análise das variações da RV.

Na análise, em particular da estrela NGC2567 37, destacam-se períodos significativos nos periodogramas referentes aos índices de atividade H α 06 e NaI, de 2550.23 e 2601.50, respetivamente. Destaca-se um período em H α 16 igual ao período significativo de H α 06. Observando os periodogramas de FWHM e BIS, nota-se um pico com período coincidente com os anteriormente referidos. No entanto, tendo em consideração a tabela 5.16, verifica-se uma correlação forte e significativa apenas entre os indicadores H α 06, H α 16, NaI e BIS.

O período de rotação máxima da estrela calculado é de 317.02 dias, tendo um intervalo de confiança de [302.65 ; 331.40].

Observa-se que NaI possui dois períodos evidenciados de 347.06 e 382 dias, próximos do período de rotação máxima (317.02 dias, com incerteza de 14.37 dias), embora estejam ainda mais próximos do período de um ano, pelo que esses períodos podem estar relacionados com a cadência dos dados. Pode-se ainda denotar que se verifica um padrão de semelhança nos periodogramas dos índices H α 06, H α 16, NaI e BIS, aquando períodos de aproximadamente um ano, o que pode revelar interferência do período de um ano nos dados.

5.9 NGC4349 127

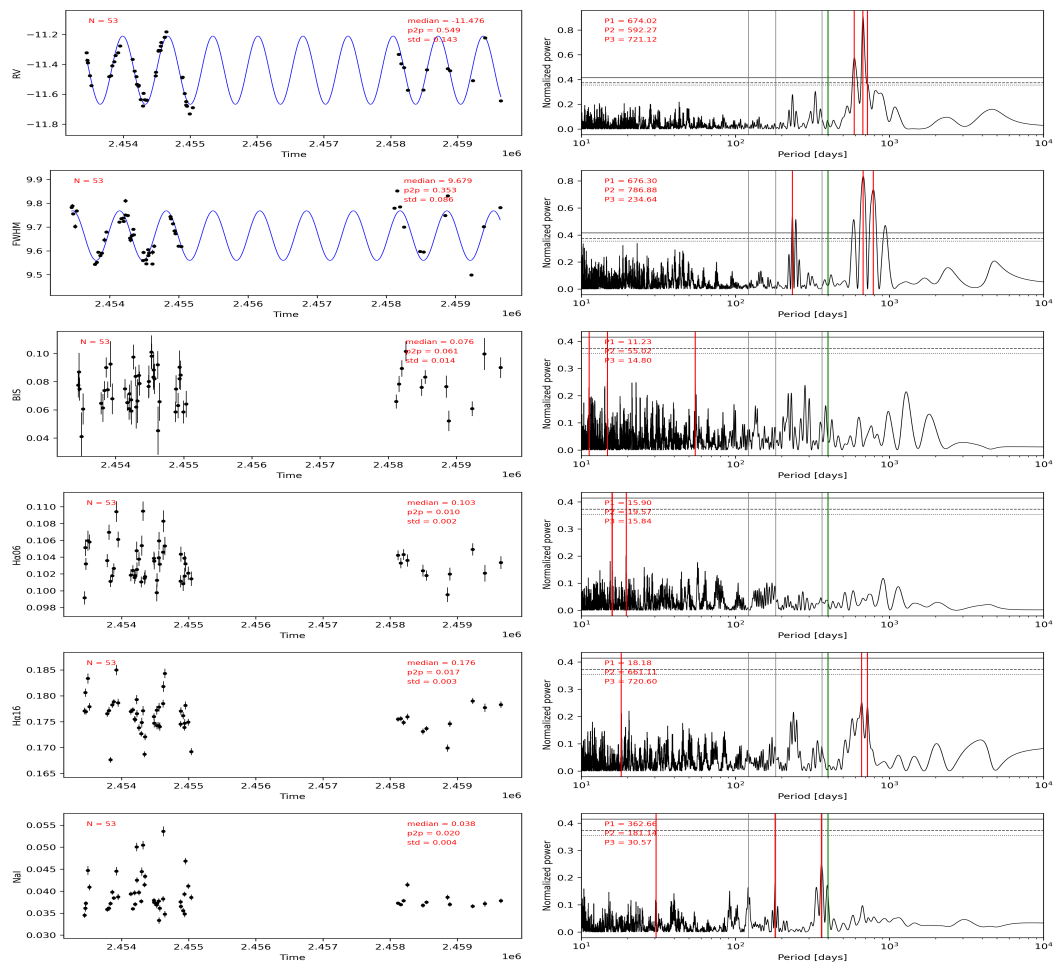


Fig. 5.9 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC4349 127.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
674.02	676.30	11.23	15.90	18.18	362.66
592.27	786.88	55.02	19.57	661.11	181.14
721.12	234.64	14.80	15.84	720.60	30.57

Tabela 5.17 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	-0.182	0.192								
BIS	0.157	0.260	-0.120	0.391						
H α 06	0.188	0.178	-0.069	0.625	-0.142	0.309				
H α 16	0.374	0.006	-0.007	0.960	-0.094	0.505	0.585	<0.001		
NaI	-0.301	0.028	0.087	0.537	-0.085	0.544	0.219	0.114	0.050	0.724

Tabela 5.18 Coeficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC4349 127.

Ao analisarmos a série temporal da velocidade radial, podemos observar um ajuste bastante preciso da curva aos dados observacionais (de período próximo a 670 dias). Ao considerarmos também as séries temporais de FWHM e do indicador H α 16, é evidente que os dados também se alinham de maneira bastante satisfatória com as curvas sinusoidais apresentadas.

Nota-se que, apesar de períodos muito próximos nas velocidades radiais e no índice FWHM, estes não estão correlacionadas, pois verifica-se um baixo valor no coeficiente de correlação de Spearman. Isto ocorre porque as órbitas estão um pouco deslocadas em fase uma com a outra, ao contrário do que observamos noutros casos, onde elas variam com uma fase semelhante ou muito próxima em fase inversa.

No periodograma referente ao índice de sódio, apresenta-se um período mais significativo, de 362.66 dias, que poderá dever-se a um de três fatores: pode estar relacionada com a cadência dos dados, por proximidade a um ano; por ser próximo do período de rotação máxima da estrela (399.78 dias); ou ainda pode representar um valor harmónico de outros períodos significativos observados na velocidade radial e nos indicadores FWHM e H α 16, sendo possível visualizar um padrão semelhante nos periodogramas, com menor significância, mas que se repete praticamente em todos os periodogramas.

Com base nesta análise, podemos concluir que as variações observadas na velocidade radial desta estrela NGC4349 127 estão relacionadas com a sua atividade cromosférica.

5.10 NGC6705 1101

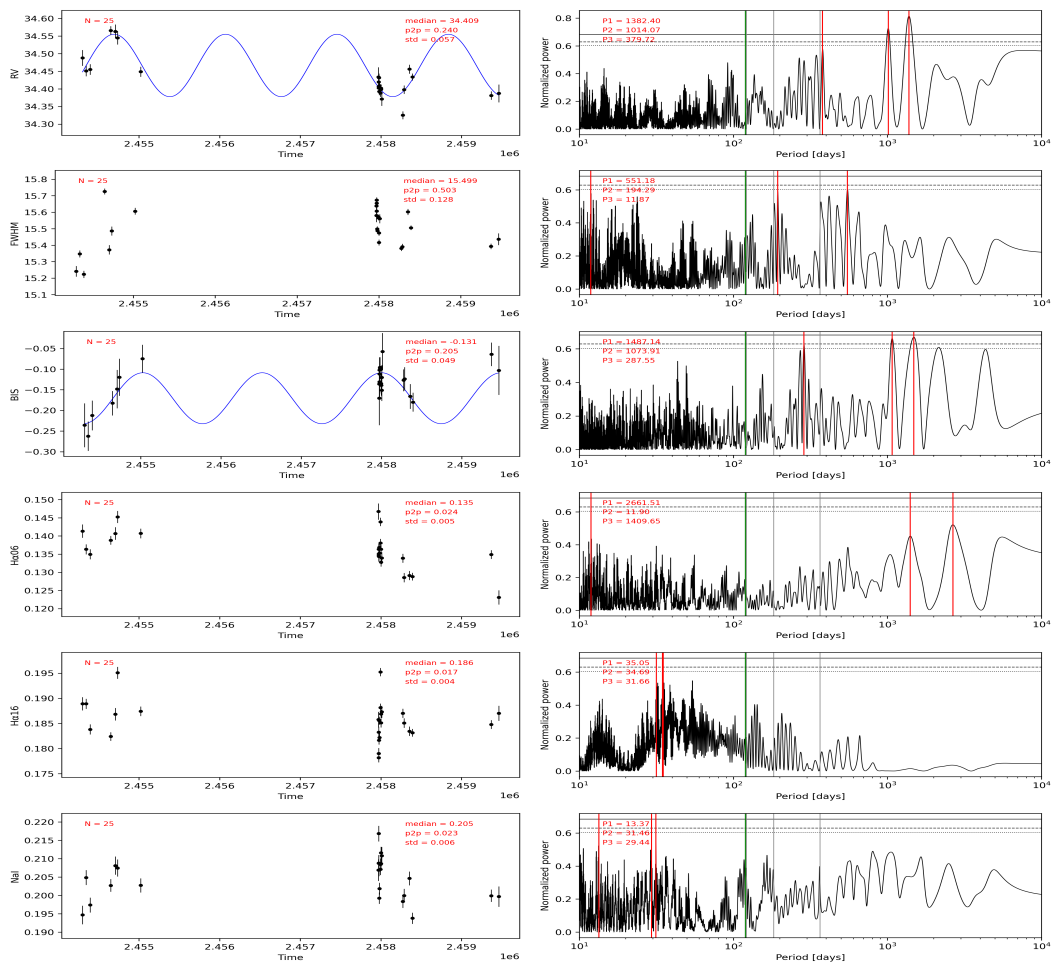


Fig. 5.10 Séries temporais (à esquerda) e periodogramas (à direita), para valores de velocidade radial, FWHM, BIS, H α 06 e H α 16, da estrela NGC6705 110.

RV	FWHM	BIS	H α 06	H α 16	NaI
1382.40	551.18	1487.14	2661.51	35.05	13.37
1014.07	194.29	1073.91	11.90	34.69	31.46
379.72	11.87	287.55	1409.65	31.66	29.44

Tabela 5.19 Períodos significativos nos periodogramas

	VR		FWHM		BIS		H α 06		H α 16	
	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value	ρ	p-value
FWHM	0.075	0.723								
BIS	-0.588	0.002	0.208	0.319						
H α 06	0.456	0.022	0.114	0.588	-0.207	0.321				
H α 16	-0.075	0.723	-0.445	0.026	-0.081	0.701	0.431	0.032		
NaI	-0.070	0.740	0.435	0.030	0.155	0.458	0.188	0.367	-0.033	0.875

Tabela 5.20 Coeficientes de correlação de Spearman, e respectivos p-values, entre velocidade radial e indicadores de atividade, para a estrela NGC6705 1101.

A análise do periodograma da velocidade radial da estrela NGC6705 1101, permite-nos observar a existência de dois períodos significativos, com FAP inferior a 0.1%, sendo estes períodos de 1382.40 e 1014.07 dias. Próximos a estes, temos dois períodos também muito significativos no periodograma do indicador BIS (1487.14 e 1073.91 dias). Deteta-se que um dos períodos mais significativos para o índice H α 06 é de 1409.65 dias, havendo uma semelhança clara no registo dos periodogramas da velocidade radial, de BIS e de H α 06. As séries temporais destas variáveis permitem-nos verificar algum ajuste aos dados para períodos que rondem os 1400 dias, no entanto para conclusões mais precisas seria importante um número maior de observações efetuadas a esta estrela.

A análise estatística, realizada segundo o coeficiente de correlação de Spearman, revela uma correlação forte e significativa entre a velocidade radial e os indicadores de atividade BIS e H α 06, confirmando as suposições de que as variações da velocidade radial observadas na estrela NGC6705 1101 são devidas à atividade estelar.

Capítulo 6

Conclusão

Os resultados desta investigação revelam algumas considerações importantes.

Inicialmente, verificou-se, na Fig.2.3 que quando analisamos com maior detalhe o espectro das estrelas, consideradas neste estudo, na região da risca de absorção do hélio, estas não apresentam uma linha que defina claramente o chamado índice de hélio, pelo que se sugere que este não é um indicador confiável de atividade estelar em estrelas evoluídas.

Sendo a nossa amostra, composta exclusivamente por estrelas gigantes evoluídas, este estudo reforça a tendência observada anteriormente por Gomes da Silva et al. [26], indicando que estrelas mais evoluídas tendem a ter uma atividade estelar mais baixa, refletida em valores mais baixos de R'_{HK} . De facto, numa comparação direta, as estrelas evoluídas mostraram ser menos ativas do que as estrelas na sequência principal.

Quando analisadas as correlações entre os índices de atividade FWHM e NaI, observamos que predominam as correlações positivas quando existe uma correlação estatisticamente significativa. O mesmo padrão ocorre nas correlações entre $H\alpha 06$ e $H\alpha 16$, sugerindo que não existe uma grande diferença entre esses dois índices em estrelas evoluídas. Este resultado é contrário ao comportamento observado em estrelas FGK da sequência principal, de acordo com o estudo de Gomes da Silva et al. [24].

Relativamente à correlação com a velocidade radial, observámos um maior número de correlações positivas entre a velocidade radial e o índice $H\alpha 06$ do que correlações negativas. Por outro lado, o indicador NaI correlaciona-se mais frequentemente de forma negativa com a velocidade radial. No entanto, nenhum dos índices de atividade estudados se destacou particularmente na sua correlação com a velocidade radial. Neste sentido, durante a pesquisa de exoplanetas, o ideal é usar o maior número possível de índices de atividade estelar de modo a maximizar a precisão na deteção de potenciais falsos positivos.

Sugere-se, ainda, que o índice BIS se correlaciona significativamente com os índices NaI e o $H\alpha 06$ em estrelas menos evoluídas.

De salientar ainda que as correlações entre velocidade radial e os índices de atividade em função dos parâmetros estelares não se observam padrões relevantes, o que sugere que não haja dependência entre as correlações determinadas e os parâmetros estelares.

Estrelas com correlações fortes significativas entre índices e atividade, bem como entre índices dois a dois, foram observadas em diferentes fases evolutivas. Porém devido ao facto de termos erros

na determinação da temperatura efetiva e valores de aceleração gravítica muito elevados (como se verificou na Fig.2.1), não nos é permitido tirar qualquer conclusão sobre como se correlacionam os índices entre si, bem como os índices com a velocidade radial, de acordo com a fase evolutiva da estrela.

Da análise geral e individual às estrelas evoluídas da nossa amostra, podemos destacar que as variações na velocidade radial estão intrinsecamente associadas à atividade estelar, sendo de extrema importância na deteção de falsos positivos, aquando da procura de exoplanetas.

Bibliografia

- [1] Alcaïno, G. (1965). A photoelectric investigation of the galactic clusters IC 4665 and IC 4756. *Lowell Observatory Bulletin*, 6(126):167–172.
- [2] Baliunas, S. and Soon, W. (1995). Are Variations in the Length of the Activity Cycle Related to Changes in Brightness in Solar-Type Stars? *ApJ*, 450:896.
- [3] Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H., Horne, J. H., Frazer, J., Woodard-Eklund, L., Bradford, M., Rao, L. M., Wilson, O. C., Zhang, Q., Bennett, W., Briggs, J., Carroll, S. M., Duncan, D. K., Figueroa, D., Lanning, H. H., Misch, T., Mueller, J., Noyes, R. W., Poppe, D., Porter, A. C., Robinson, C. R., Russell, J., Shelton, J. C., Soyumer, T., Vaughan, A. H., and Whitney, J. H. (1995). Chromospheric Variations in Main-Sequence Stars. II. *ApJ*, 438:269.
- [4] Benedict, G. F., McArthur, B. E., Forveille, T., Delfosse, X., Nelan, E., Butler, R. P., Spiesman, W., Marcy, G., Goldman, B., Perrier, C., Jefferys, W. H., and Mayor, M. (2002). A Mass for the Extrasolar Planet Gliese 876b Determined from Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor 3 Astrometry and High-Precision Radial Velocities. *ApJL*, 581(2):L115–L118.
- [5] Biazzo, K., Pasquini, L., Girardi, L., Frasca, A., da Silva, L., Setiawan, J., Marilli, E., Hatzes, A. P., and Catalano, S. (2007). Deriving temperature, mass, and age of evolved stars from high-resolution spectra. Application to field stars and the open cluster IC 4651. *A&A*, 475(3):981–989.
- [6] Boisse, I., Moutou, C., Vidal-Madjar, A., Bouchy, F., Pont, F., Hébrard, G., Bonfils, X., Croll, B., Delfosse, X., Desort, M., Forveille, T., Lagrange, A. M., Loeillet, B., Lovis, C., Matthews, J. M., Mayor, M., Pepe, F., Perrier, C., Queloz, D., Rowe, J. F., Santos, N. C., Ségransan, D., and Udry, S. (2009). Stellar activity of planetary host star HD 189 733. *A&A*, 495(3):959–966.
- [7] Bragaglia, A., Sestito, P., Villanova, S., Carretta, E., Randich, S., and Tosi, M. (2008). Old open clusters as key tracers of Galactic chemical evolution. II. Iron and elemental abundances in NGC 2324, NGC 2477 NGC 2660, NGC 3960, and Berkeley 32. *A&A*, 480(1):79–90.
- [8] Carlberg, J. K. (2014). Rotational and Radial Velocities of 1.3-2.2 M_☉ Red Giants in Open Clusters. *ApJ*, 147(6):138.
- [9] Cegla, H. M., Watson, C. A., Shelyag, S., Chaplin, W. J., Davies, G. R., Mathioudakis, M., Palumbo, M. L., I., Saar, S. H., and Haywood, R. D. (2018). Stellar Surface Magneto-convection as a Source of Astrophysical Noise. II. Center-to-limb Parameterization of Absorption Line Profiles and Comparison to Observations. *ApJ*, 866(1):55.
- [10] Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., and Mayor, M. (2000). Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. *ApJL*, 529(1):L45–L48.
- [11] Christensen-Dalsgaard, J. (2004). Physics of solar-like oscillations. *Sol. Phys.*, 220(2):137–168.
- [12] Clariá, J. J., Piatti, A. E., Mermilliod, J. C., and Palma, T. (2008). Photometric membership and metallicities of red giant candidates in selected open clusters. *Astronomische Nachrichten*, 329(6):609.

- [13] Clem, J. L., Landolt, A. U., Hoard, D. W., and Wachter, S. (2011). Deep, Wide-field CCD Photometry for the Open Cluster NGC 3532. *ApJ*, 141(4):115.
- [14] Delgado Mena, E., Lovis, C., Santos, N. C., Gomes da Silva, J., Mortier, A., Tsantaki, M., Sousa, S. G., Figueira, P., Cunha, M. S., Campante, T. L., Adibekyan, V., Faria, J. P., and Montalto, M. (2018a). Planets around evolved intermediate-mass stars. II. Are there really planets around IC 4651 No. 9122, NGC 2423 No. 3, and NGC 4349 No. 127? *A&A*, 619:A2.
- [15] Delgado Mena, E., Lovis, C., Santos, N. C., Gomes da Silva, J., Mortier, A., Tsantaki, M., Sousa, S. G., Figueira, P., Cunha, M. S., Campante, T. L., Adibekyan, V., Faria, J. P., and Montalto, M. (2018b). Planets around evolved intermediate-mass stars. II. Are there really planets around IC 4651 No. 9122, NGC 2423 No. 3, and NGC 4349 No. 127? *A&A*, 619:A2.
- [16] Delgado Mena, E., Santos, N. C., Gomes da Silva, J., Mortier, A., Tsantaki, M., Sousa, S. G., Faria, J. P., and Martins, J. H. (2023). Planets around evolved intermediate-mass stars III. Planet candidates and long term activity signals in six open clusters. Accepted paper. *A&A*.
- [17] Delgado Mena, E., Tsantaki, M., Sousa, S. G., Kunitomo, M., Adibekyan, V., Zaworska, P., Santos, N. C., Israelian, G., and Lovis, C. (2016). Searching for Li-rich giants in a sample of 12 open clusters. Li enhancement in two stars with substellar companions. *A&A*, 587:A66.
- [18] Desort, M., Lagrange, A. M., Galland, F., Udry, S., and Mayor, M. (2007). Search for exoplanets with the radial-velocity technique: quantitative diagnostics of stellar activity. *A&A*, 473(3):983–993.
- [19] Díaz, R. F., Cincunegui, C., and Mauas, P. J. D. (2007). The NaI D resonance lines in main-sequence late-type stars. *MNRAS*, 378(3):1007–1018.
- [20] Dravins, D. (1982). Photospheric spectrum line asymmetries and wavelength shifts. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 20:61–89.
- [21] Dumusque, X., Santos, N. C., Udry, S., Lovis, C., and Bonfils, X. (2011a). Planetary detection limits taking into account stellar noise. II. Effect of stellar spot groups on radial-velocities. *A&A*, 527:A82.
- [22] Dumusque, X., Udry, S., Lovis, C., Santos, N. C., and Monteiro, M. J. P. F. G. (2011b). Planetary detection limits taking into account stellar noise. I. Observational strategies to reduce stellar oscillation and granulation effects. *A&A*, 525:A140.
- [23] Faria, J. P., Suárez Mascareño, A., Figueira, P., Silva, A. M., Damasso, M., Demangeon, O., Pepe, F., Santos, N. C., Rebolo, R., Cristiani, S., Adibekyan, V., Alibert, Y., Allart, R., Barros, S. C. C., Cabral, A., D’Odorico, V., Di Marcantonio, P., Dumusque, X., Ehrenreich, D., González Hernández, J. I., Hara, N., Lillo-Box, J., Lo Curto, G., Lovis, C., Martins, C. J. A. P., Mégevand, D., Mehner, A., Micela, G., Molaro, P., Nunes, N. J., Pallé, E., Poretti, E., Sousa, S. G., Sozzetti, A., Taberner, H., Udry, S., and Zapatero Osorio, M. R. (2022). A candidate short-period sub-Earth orbiting Proxima Centauri. *A&A*, 658:A115.
- [24] Gomes da Silva, J., Bensabat, A., Monteiro, T., and Santos, N. C. (2022). Optimising the H α index for the identification of activity signals in FGK stars. Improvement of the correlation between H α and Ca II H&K. *A&A*, 668:A174.
- [25] Gomes da Silva, J., Figueira, P., Santos, N., and Faria, J. (2018). ACTIN: A tool to calculate stellar activity indices. *The Journal of Open Source Software*, 3(31):667.
- [26] Gomes da Silva, J., Santos, N. C., Adibekyan, V., Sousa, S. G., Campante, T. L., Figueira, P., Bossini, D., Delgado-Mena, E., Monteiro, M. J. P. F. G., de Laverny, P., Recio-Blanco, A., and Lovis, C. (2021). Stellar chromospheric activity of 1674 FGK stars from the AMBRE-HARPS sample. I. A catalogue of homogeneous chromospheric activity. *A&A*, 646:A77.

- [27] Gomes da Silva, J., Santos, N. C., Bonfils, X., Delfosse, X., Forveille, T., and Udry, S. (2011). Long-term magnetic activity of a sample of M-dwarf stars from the HARPS program. I. Comparison of activity indices. *A&A*, 534:A30.
- [28] Gomes da Silva, J., Santos, N. C., Bonfils, X., Delfosse, X., Forveille, T., Udry, S., Dumusque, X., and Lovis, C. (2012). Long-term magnetic activity of a sample of M-dwarf stars from the HARPS program . II. Activity and radial velocity. *A&A*, 541:A9.
- [29] Gray, D. F. (2009). The Third Signature of Stellar Granulation. *ApJ*, 697(2):1032–1043.
- [30] Hartmann, L. W., Noyes, R. W., Baliunas, S. L., Duncan, D. K., and Vaughan, A. H. (1984). Rotation, convection, and magnetic activity in lower main-sequence stars. *ApJ*, 279:763–777.
- [31] Hatzes, A. P., Endl, M., Cochran, W. D., MacQueen, P. J., Han, I., Lee, B. C., Kim, K. M., Mkrtichian, D., Dollinger, M., Hartmann, M., Karjalainen, M., and Dreizler, S. (2018). VizieR Online Data Catalog: RV variability of the K-giant γ Draconis (Hatzes+, 2018). *VizieR Online Data Catalog*, page J/AJ/155/120.
- [32] Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P., and Wicenec, A. (2000). The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *A&A*, 355:L27–L30.
- [33] Krone-Martins, A., Soubiran, C., Ducourant, C., Teixeira, R., and Le Campion, J. F. (2010). Kinematic parameters and membership probabilities of open clusters in the Bordeaux PM2000 catalogue. *A&A*, 516:A3.
- [34] Leão, I. C., Canto Martins, B. L., Alves, S., Pereira de Oliveira, G., Cortés, C., Brucalassi, A., Melo, C. H. F., de Freitas, D. B., Pasquini, L., and de Medeiros, J. R. (2018). Incidence of planet candidates in open clusters and a planet confirmation. *A&A*, 620:A139.
- [35] Livingston, W., Wallace, L., White, O. R., and Giampapa, M. S. (2007). Sun-as-a-Star Spectrum Variations 1974-2006. *ApJ*, 657(2):1137–1149.
- [36] Loden, L. O. (1979). Continued studies of loose clusterings in the Southern Milky Way. *A&AS*, 38:355.
- [37] Lovis, C., Dumusque, X., Santos, N. C., Bouchy, F., Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Ségransan, D., and Udry, S. (2011). The HARPS search for southern extra-solar planets. XXXI. Magnetic activity cycles in solar-type stars: statistics and impact on precise radial velocities. *arXiv e-prints*, page arXiv:1107.5325.
- [38] Lovis, C. and Fischer, D. (2010). Radial Velocity Techniques for Exoplanets. In Seager, S., editor, *Exoplanets*, pages 27–53.
- [39] Lovis, C. and Mayor, M. (2007). Planets around evolved intermediate-mass stars. I. Two substellar companions in the open clusters NGC 2423 and NGC 4349. *A&A*, 472(2):657–664.
- [40] Mamajek, E. E. and Hillenbrand, L. A. (2008). Improved Age Estimation for Solar-Type Dwarfs Using Activity-Rotation Diagnostics. *ApJ*, 687(2):1264–1293.
- [41] Mauas, P. J. D. (2000). Building Reliable Models of M Dwarf Chromospheres: The Spectral Diagnostics. *ApJ*, 539(2):858–864.
- [42] Mayor, M. and Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555):355–359.
- [43] McClure, R. D. (1972). The color excesses and metallicities of the open clusters NGC 2360 and 3680. *ApJ*, 172:615.

- [44] Mermilliod, J. C. (1986). Compilation of Eggen's UBV data, transformed to UBV (unpublished). *Catalogue of Eggen's UBV data*, page 0.
- [45] Mermilliod, J. C. and Mayor, M. (2007). Red giants in open clusters. XII. Six old open clusters NGC 2112, 2204, 2243, 2420, 2506, 2682. *A&A*, 470(3):919–926.
- [46] Mermilliod, J. C., Mayor, M., and Udry, S. (2008). Red giants in open clusters. XIV. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters. *A&A*, 485(1):303–314.
- [47] Meunier, N. (2009). Dynamo of the Sun and Solar-Type Stars. In Neiner, C. and Zahn, J. P., editors, *EAS Publications Series*, volume 39 of *EAS Publications Series*, pages 83–120.
- [48] Meunier, N., Desort, M., and Lagrange, A. M. (2010). Using the Sun to estimate Earth-like planets detection capabilities . II. Impact of plagues. *A&A*, 512:A39.
- [49] Middelkoop, F. (1982). Magnetic structure in cool stars. IV - Rotation and CA II H and K emission of main-sequence stars. *A&A*, 107(1):31–35.
- [50] Munari, U., Henden, A., Frigo, A., Zwitter, T., Bienaymé, O., Bland-Hawthorn, J., Boeche, C., Freeman, K. C., Gibson, B. K., Gilmore, G., Grebel, E. K., Helmi, A., Kordopatis, G., Levine, S. E., Navarro, J. F., Parker, Q. A., Reid, W., Seabroke, G. M., Siebert, A., Siviero, A., Smith, T. C., Steinmetz, M., Templeton, M., Terrell, D., Welch, D. L., Williams, M., and Wyse, R. F. G. (2014). APASS Landolt-Sloan BVgri Photometry of RAVE Stars. I. Data, Effective Temperatures, and Reddenings. *ApJ*, 148(5):81.
- [51] Noyes, R. W., Hartmann, L. W., Baliunas, S. L., Duncan, D. K., and Vaughan, A. H. (1984). Rotation, convection, and magnetic activity in lower main-sequence stars. *ApJ*, 279:763–777.
- [52] Purgathofer, A. (1964). Dreifarbenphotometrie in offenen Sternhaufen sowie in zwei Sternfeldern im Cyg. *Annalen der K.K. Sternwarte Wien*, 26:37–73.
- [53] Queloz, D., Henry, G. W., Sivan, J. P., Baliunas, S. L., Beuzit, J. L., Donahue, R. A., Mayor, M., Naef, D., Perrier, C., and Udry, S. (2001). No planet for HD 166435. *A&A*, 379:279–287.
- [54] Rachford, B. L. and Foight, D. R. (2009). Chromospheric Variability in Early F-Type Stars. *ApJ*, 698(1):786–802.
- [55] Rutten, R. G. M. (1984). Magnetic structure in cool stars. VII. Absolute surface flux in CA IIIH and K line cores. *A&A*, 130:353–360.
- [56] Saar, S. H. and Donahue, R. A. (1997). Activity-Related Radial Velocity Variation in Cool Stars. *ApJ*, 485(1):319–327.
- [57] Santos, N. C., Bouchy, F., Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Udry, S., Lovis, C., Bazot, M., Benz, W., Bertaux, J. L., Lo Curto, G., Delfosse, X., Mordasini, C., Naef, D., Sivan, J. P., and Vauclair, S. (2004). The HARPS survey for southern extra-solar planets. II. A 14 Earth-masses exoplanet around μ Arae. *A&A*, 426:L19–L23.
- [58] Schrijver, C. and Zwaan, C. (2008). *Solar and Stellar Magnetic Activity*. Cambridge Astrophysics. Cambridge University Press.
- [59] Skumanich, A. (1972). Time Scales for Ca II Emission Decay, Rotational Braking, and Lithium Depletion. *ApJ*, 171:565.
- [60] Tautvaišienė, G., Drazdauskas, A., Mikolaitis, Š., Barisevičius, G., Puzeras, E., Stonkutė, E., Chorniy, Y., Magrini, L., Romano, D., Smiljanic, R., Bragaglia, A., Carraro, G., Friel, E., Morel, T., Pancino, E., Donati, P., Jiménez-Esteban, F., Gilmore, G., Randich, S., Jeffries, R. D., Vallenari, A., Bensby, T., Flaccomio, E., Recio-Blanco, A., Costado, M. T., Hill, V., Jofré, P., Lardo, C.,

- de Laverny, P., Masseron, T., Moribelli, L., Sousa, S. G., and Zaggia, S. (2015). The Gaia-ESO Survey: CNO abundances in the open clusters Trumpler 20, NGC 4815, and NGC 6705. *A&A*, 573:A55.
- [61] Tsantaki, M., Delgado-Mena, E., Bossini, D., Sousa, S. G., Pancino, E., and Martins, J. H. C. (2023). Search for lithium-rich giants in 32 open clusters with high-resolution spectroscopy. *A&A*, 674:A157.
- [62] Vaughan, A. H., Preston, G. W., and Wilson, O. C. (1978). Flux measurements of Ca II and K emission. *Ast. Soc. Pacific*, 90:267–274.
- [63] Wilson, O. C. (1963). A Probable Correlation Between Chromospheric Activity and Age in Main-Sequence Stars. *ApJ*, 138:832.
- [64] Wilson, O. C. (1968). Flux Measurements at the Centers of Stellar H- and K-Lines. *ApJ*, 153:221.
- [65] Worden, S. P., Schneeberger, T. J., and Giampapa, M. S. (1981). High-resolution profiles of chromospheric lines in M dwarf stars. *ApJS*, 46:159–175.
- [66] Zacharias, N., Finch, C. T., Girard, T. M., Henden, A., Bartlett, J. L., Monet, D. G., and Zacharias, M. I. (2012). VizieR Online Data Catalog: UCAC4 Catalogue (Zacharias+, 2012). *VizieR Online Data Catalog*, page I/322A.
- [67] Zechmeister, M. and Kürster, M. (2009). The generalised Lomb-Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms. *A&A*, 496(2):577–584.

Anexo A

Dados informativos sobre as linhas espectrais

ind_id	ind_var	ln_crt	ln_win
CaII	L1	3933.664	1.09
CaII	L2	3968.47	1.09
CaII	R1	3901.07	20.0
CaII	R2	4001.07	20.0
NaI	L1	5895.92	0.5
NaI	L2	5889.95	0.5
NaI	R1	5805.0	10.0
NaI	R2	6097.0	20.0
Ha16	L1	6562.808	1.6
Ha16	R1	6550.87	10.75
Ha16	R2	6580.31	8.75
Ha06	L1	6562.808	0.6
Ha06	R1	6550.87	10.75
Ha06	R2	6580.31	8.75
HeI	L1	5875.62	0.4
HeI	R1	5869.0	5.0
HeI	R2	5881.0	5.0

Tabela A.1 Dados informativos sobre as linhas espectrais. Legenda: ind_id: índice, ind_var: variáveis identificativas (L1 e L2 para linhas centrais; R1 e R2 para linhas de referência), ln_crt: centro da linha (em Å), ln_win: largura da janela centrada em ln_crt (em Å)

Anexo B

Tabela de parâmetros estelares da amostra

Tabela B.1 Parâmetros estelares da amostra

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	[Fe/H] (dex)	Mass (M_{\odot})	$\log(L/L_{\odot})$	Age (Ga)
IC2714No110	4949 ± 70.8	2.627 ± 0.253	-0.080 ± 0.015	2.550 ± 0.098	2.018	0.47
IC2714No121	4665 ± 70.4	2.165 ± 0.254	-0.087 ± 0.016	2.709 ± 0.223	2.373	0.47
IC2714No126	4888 ± 70.8	2.233 ± 0.255	-0.064 ± 0.016	3.080 ± 0.083	2.309	0.47
IC2714No190	4927 ± 71.1	2.357 ± 0.254	-0.050 ± 0.017	2.856 ± 0.087	2.166	0.47
IC2714No220	4878 ± 70.8	2.270 ± 0.255	-0.088 ± 0.016	3.156 ± 0.082	2.348	0.47
IC2714No5	4983 ± 71.1	2.347 ± 0.254	-0.062 ± 0.017	2.972 ± 0.077	2.239	0.47
IC2714No53	5031 ± 71.1	2.628 ± 0.254	-0.052 ± 0.016	2.669 ± 0.086	2.040	0.47
IC2714No87	5053 ± 71.1	2.609 ± 0.253	-0.040 ± 0.016	2.769 ± 0.081	2.090	0.47
IC4651No10393	4713 ± 70.2	2.434 ± 0.253	-0.035 ± 0.015	1.801 ± 0.103	1.882	1.58
IC4651No11218	4836 ± 70.8	2.631 ± 0.253	0.073 ± 0.015	1.956 ± 0.172	1.736	1.58
IC4651No11453	4990 ± 71.3	2.588 ± 0.254	0.002 ± 0.017	2.699 ± 0.086	2.069	1.58
IC4651No12935	4765 ± 70.6	2.547 ± 0.253	-0.046 ± 0.016	1.800 ± 0.099	1.784	1.58
IC4651No14527	4780 ± 70.6	2.478 ± 0.254	0.021 ± 0.017	1.867 ± 0.152	1.806	1.58
IC4651No17646	4729 ± 70.8	2.511 ± 0.254	0.059 ± 0.017	2.228 ± 0.194	1.907	1.58
IC4651No17647	4578 ± 70.2	2.234 ± 0.253	-0.453 ± 0.015	1.552 ± 0.011	1.934	1.58
IC4651No6333	4436 ± 70.0	2.177 ± 0.254	-0.008 ± 0.015	1.779 ± 0.080	2.082	1.58
IC4651No7646	4810 ± 70.8	2.472 ± 0.254	-0.042 ± 0.016	2.438 ± 0.194	2.031	1.58
IC4651No8540	4699 ± 70.2	2.489 ± 0.253	-0.012 ± 0.015	1.797 ± 0.096	1.839	1.58
IC4651No9025	4719 ± 70.4	2.503 ± 0.253	-0.019 ± 0.015	1.815 ± 0.115	1.833	1.58
IC4651No9122	4582 ± 70.0	2.434 ± 0.253	-0.031 ± 0.014	1.795 ± 0.091	1.941	1.58
IC4651No9791	4447 ± 70.0	2.171 ± 0.254	-0.060 ± 0.015	1.750 ± 0.076	2.079	1.58
IC4756No101	5033 ± 71.1	2.721 ± 0.253	-0.093 ± 0.015	2.206 ± 0.109	1.772	0.98
IC4756No109	4876 ± 70.8	2.507 ± 0.254	-0.117 ± 0.016	2.312 ± 0.130	1.918	0.98
IC4756No12	4994 ± 71.1	2.667 ± 0.254	-0.135 ± 0.016	2.108 ± 0.103	1.733	0.98
IC4756No125	5021 ± 70.8	2.736 ± 0.253	-0.112 ± 0.015	2.175 ± 0.110	1.774	0.98
IC4756No14	4632 ± 70.2	2.220 ± 0.254	-0.157 ± 0.015	1.973 ± 0.134	2.038	0.98
IC4756No164	4938 ± 70.8	2.630 ± 0.253	-0.107 ± 0.015	2.215 ± 0.122	1.821	0.98
IC4756No28	4574 ± 70.0	2.238 ± 0.253	-0.157 ± 0.014	1.907 ± 0.097	2.006	0.98
IC4756No38	5035 ± 70.6	2.838 ± 0.253	-0.106 ± 0.015	2.005 ± 0.061	1.614	0.98
IC4756No42	5085 ± 70.8	2.859 ± 0.253	-0.072 ± 0.016	2.166 ± 0.099	1.726	0.98
IC4756No44	5013 ± 70.6	2.851 ± 0.253	-0.081 ± 0.015	2.016 ± 0.059	1.611	0.98
IC4756No49	5005 ± 71.1	2.666 ± 0.254	-0.120 ± 0.016	2.125 ± 0.103	1.748	0.98
IC4756No52	4452 ± 70.0	1.983 ± 0.254	-0.144 ± 0.015	2.272 ± 0.191	2.401	0.98
IC4756No81	5053 ± 70.8	2.774 ± 0.253	-0.126 ± 0.015	2.207 ± 0.161	1.730	0.98
NGC1662No1	4970 ± 71.3	2.316 ± 0.255	-0.089 ± 0.018	2.862 ± 0.080	2.696	0.91
NGC1662No2	5114 ± 71.1	2.607 ± 0.254	-0.086 ± 0.015	2.529 ± 0.084	2.467	0.91
NGC2204No1320	4632 ± 70.4	2.136 ± 0.254	-0.241 ± 0.016		2.227	2.09
NGC2204No2136	4593 ± 70.4	2.097 ± 0.254	-0.268 ± 0.016		2.029	2.09
NGC2204No2211	5316 ± 74.1	2.632 ± 0.258	-0.120 ± 0.021		1.958	2.09
NGC2204No2212	4538 ± 70.4	2.106 ± 0.254	-0.208 ± 0.016		2.187	2.09
NGC2204No3324	4435 ± 70.0	1.972 ± 0.254	-0.272 ± 0.015		2.185	2.09
NGC2204No3325	3740 ± 69.7	0.687 ± 0.258	-0.408 ± 0.017		3.171	2.09
NGC2204No4137	3971 ± 69.7	1.226 ± 0.256	-0.327 ± 0.015		2.744	2.09
NGC2251No3	4857 ± 70.8	2.217 ± 0.255	-0.018 ± 0.017	3.491 ± 0.079	2.453	0.31
NGC2251No33	4900 ± 71.1	2.155 ± 0.255	0.001 ± 0.016	3.498 ± 0.078	2.458	0.31
NGC2251No35	4928 ± 71.1	2.443 ± 0.254	-0.015 ± 0.017	3.189 ± 0.080	2.218	0.31
NGC2287No107	4651 ± 70.4	1.912 ± 0.256	-0.148 ± 0.018	3.836 ± 0.149	2.662	0.20
NGC2287No204	4319 ± 69.7	1.766 ± 0.254	-0.396 ± 0.014	2.286 ± 0.015	2.750	0.20
NGC2287No21	4046 ± 70.2	1.166 ± 0.258	-0.165 ± 0.017	3.903 ± 0.375	3.247	0.20
NGC2287No75	4473 ± 70.4	1.708 ± 0.256	-0.117 ± 0.018	4.188 ± 0.220	2.847	0.20

Tabela B.2 Parâmetros estelares da amostra

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	[Fe/H] (dex)	Mass (M_{\odot})	$\log(L/L_{\odot})$	Age (Ga)
NGC2287No87	4138 ± 69.9	1.571 ± 0.254	-0.341 ± 0.014		2.802	0.20
NGC2287No97	4624 ± 70.4	1.902 ± 0.256	-0.143 ± 0.018	3.86 ± 0.151	2.663	0.20
NGC2324No1992	4876 ± 72.4	2.259 ± 0.258	0.043 ± 0.022			
NGC2345No14	4058 ± 69.9	1.047 ± 0.258	-0.237 ± 0.017	4.97 ± 0.730	3.666	0.07
NGC2345No43	4342 ± 69.9	1.432 ± 0.256	-0.207 ± 0.017	5.753 ± 0.307	3.550	0.07
NGC2345No50	3962 ± 69.7	0.875 ± 0.258	-0.253 ± 0.017	5.843 ± 0.610	3.864	0.07
NGC2345No60	4235 ± 70.0	1.273 ± 0.257	-0.210 ± 0.017	6.423 ± 0.375	3.678	0.07
NGC2354No125	4994 ± 70.8	2.777 ± 0.253	-0.139 ± 0.015	1.966 ± 0.103	1.710	1.66
NGC2354No152	4944 ± 70.8	2.977 ± 0.253	-0.119 ± 0.016	1.644 ± 0.028	1.260	1.66
NGC2354No183	4806 ± 70.8	2.498 ± 0.253	-0.168 ± 0.016	1.723 ± 0.091	1.807	1.66
NGC2354No205	4655 ± 70.2	2.466 ± 0.253	-0.167 ± 0.014	1.772 ± 0.122	2.005	1.66
NGC2354No219	4960 ± 71.1	2.373 ± 0.253	-0.239 ± 0.016	2.347 ± 0.399	2.006	1.66
NGC2354No59	4891 ± 72.4	2.700 ± 0.256	0.339 ± 0.021	2.079 ± 0.114	1.224	1.66
NGC2354No66	4904 ± 70.8	2.614 ± 0.253	-0.156 ± 0.015	1.909 ± 0.108	1.722	1.66
NGC2354No91	5004 ± 70.6	2.840 ± 0.253	-0.134 ± 0.015	1.975 ± 0.142	1.738	1.66
NGC2355No398	4923 ± 70.8	1.963 ± 0.256	-0.146 ± 0.018	3.894 ± 0.094	2.885	nan
NGC2360No119	4993 ± 71.1	2.694 ± 0.253	-0.120 ± 0.016	1.992 ± 0.122	1.730	1.12
NGC2360No50	4989 ± 70.8	2.709 ± 0.253	-0.115 ± 0.015	1.978 ± 0.110	1.706	1.12
NGC2360No66	5121 ± 71.1	3.006 ± 0.252	-0.106 ± 0.015	1.989 ± 0.081	1.618	1.12
NGC2360No7	5002 ± 71.1	2.735 ± 0.253	-0.139 ± 0.015	1.972 ± 0.103	1.700	1.12
NGC2360No79	5008 ± 70.6	2.804 ± 0.253	-0.130 ± 0.015	1.96 ± 0.076	1.624	1.12
NGC2360No85	5003 ± 70.6	2.854 ± 0.253	-0.140 ± 0.015	1.929 ± 0.054	1.564	1.12
NGC2360No86	4882 ± 70.8	2.583 ± 0.253	-0.158 ± 0.015	2.107 ± 0.145	1.849	1.12
NGC2360No89	5004 ± 71.1	2.714 ± 0.253	-0.139 ± 0.015	2.023 ± 0.130	1.720	1.12
NGC2423No20	4941 ± 70.8	2.876 ± 0.253	0.055 ± 0.016	2.037 ± 0.071	1.621	1.02
NGC2423No3	4534 ± 70.0	2.228 ± 0.253	-0.080 ± 0.014	2.035 ± 0.136	2.120	1.02
NGC2423No56	4965 ± 70.6	3.046 ± 0.252	-0.028 ± 0.015		1.591	1.02
NGC2447No41	5040 ± 72.1	2.624 ± 0.255	-0.118 ± 0.019	2.543 ± 0.094	2.326	0.56
NGC2477No1014	4992 ± 70.8	2.861 ± 0.253	-0.009 ± 0.016	2.215 ± 0.092	1.792	0.83
NGC2477No1272	4983 ± 71.6	2.607 ± 0.254	0.054 ± 0.017	2.231 ± 0.090	1.774	0.83
NGC2477No1388	4977 ± 71.1	2.797 ± 0.254	0.148 ± 0.018	2.188 ± 0.071	1.743	0.83
NGC2477No2036	4943 ± 71.1	2.699 ± 0.254	0.077 ± 0.017	2.414 ± 0.107	1.875	0.83
NGC2477No2061	4963 ± 70.6	2.938 ± 0.252	-0.000 ± 0.015	2.017 ± 0.042	1.651	0.83
NGC2477No2359	4962 ± 71.1	2.806 ± 0.254	0.088 ± 0.017	2.033 ± 0.042	1.654	0.83
NGC2477No3072	4925 ± 71.1	2.703 ± 0.254	0.073 ± 0.016	2.618 ± 0.186	1.920	0.83
NGC2477No3181	4911 ± 71.1	2.640 ± 0.254	0.038 ± 0.016	2.586 ± 0.100	1.973	0.83
NGC2477No3206	4944 ± 71.1	2.719 ± 0.254	0.063 ± 0.017	2.271 ± 0.101	1.807	0.83
NGC2477No4004	5045 ± 71.6	2.282 ± 0.255	0.072 ± 0.017	3.565 ± 0.095	2.402	0.83
NGC2477No4027	4945 ± 71.3	2.693 ± 0.254	0.078 ± 0.017	2.443 ± 0.103	1.878	0.83
NGC2477No4037	4893 ± 71.1	2.639 ± 0.253	0.016 ± 0.016	2.485 ± 0.113	1.947	0.83
NGC2477No4064	4947 ± 70.8	2.889 ± 0.253	0.080 ± 0.016	2.104 ± 0.052	1.699	0.83
NGC2477No4221	4958 ± 71.3	2.726 ± 0.254	0.080 ± 0.017	2.356 ± 0.103	1.845	0.83
NGC2477No4248	4979 ± 71.1	2.926 ± 0.253	0.159 ± 0.018	2.128 ± 0.058	1.684	0.83
NGC2477No4301	4957 ± 71.1	2.842 ± 0.254	0.147 ± 0.018	2.111 ± 0.072	1.570	0.83
NGC2477No4327	4950 ± 71.1	2.819 ± 0.254	0.057 ± 0.017	2.034 ± 0.040	1.659	0.83
NGC2477No5035	4949 ± 71.1	2.749 ± 0.253	0.015 ± 0.016	2.277 ± 0.104	1.819	0.83
NGC2477No5047	4835 ± 71.1	2.506 ± 0.254	0.036 ± 0.017	2.735 ± 0.103	2.076	0.83
NGC2477No5074	4967 ± 71.1	2.797 ± 0.254	0.088 ± 0.017	2.197 ± 0.077	1.750	0.83
NGC2477No5076	4953 ± 71.1	2.816 ± 0.253	0.056 ± 0.017	2.218 ± 0.085	1.782	0.83
NGC2477No5094	4978 ± 70.8	2.889 ± 0.253	0.019 ± 0.016	2.151 ± 0.070	1.732	0.83

Tabela B.3 Parâmetros estelares da amostra

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	[Fe/H] (dex)	Mass (M_{\odot})	$\log(L/L_{\odot})$	Age (Ga)
NGC2477No5317	4926 ± 70.8	2.827 ± 0.253	0.087 ± 0.017	2.099 ± 0.050	1.698	0.83
NGC2477No5338	4942 ± 71.1	2.755 ± 0.254	0.085 ± 0.017	2.147 ± 0.065	1.741	0.83
NGC2477No5345	4967 ± 71.1	2.863 ± 0.254	0.098 ± 0.017	2.156 ± 0.066	1.729	0.83
NGC2477No6005	4938 ± 70.8	2.803 ± 0.253	0.075 ± 0.017	2.154 ± 0.067	1.729	0.83
NGC2477No6040	4892 ± 70.8	3.230 ± 0.253	0.079 ± 0.016		1.987	0.83
NGC2477No6058	4967 ± 70.8	2.937 ± 0.253	0.040 ± 0.016	2.133 ± 0.064	1.712	0.83
NGC2477No6088	5024 ± 71.1	2.864 ± 0.254	0.122 ± 0.017	2.282 ± 0.092	1.754	0.83
NGC2477No6254	5814 ± 85.8	3.030 ± 0.252	0.360 ± 0.012	3.147 ± 0.036	2.320	0.83
NGC2477No6288	5399 ± 72.1	2.708 ± 0.254	0.100 ± 0.016	2.963 ± 0.063	2.134	0.83
NGC2477No7012	4954 ± 70.8	2.866 ± 0.253	0.026 ± 0.016	2.167 ± 0.075	1.727	0.83
NGC2477No7203	4971 ± 71.1	2.824 ± 0.254	0.149 ± 0.017	2.098 ± 0.050	1.689	0.83
NGC2477No7206	4996 ± 71.3	3.073 ± 0.253	0.135 ± 0.017	2.062 ± 0.098	1.601	0.83
NGC2477No7242	4967 ± 71.1	3.015 ± 0.253	0.125 ± 0.017	2.074 ± 0.046	1.656	0.83
NGC2477No7266	4970 ± 71.1	2.788 ± 0.254	0.106 ± 0.017	2.179 ± 0.092	1.820	0.83
NGC2477No7273	4983 ± 71.1	2.837 ± 0.254	0.079 ± 0.017	2.288 ± 0.098	1.799	0.83
NGC2477No7310	4951 ± 71.3	2.727 ± 0.254	0.093 ± 0.017	2.189 ± 0.074	1.763	0.83
NGC2477No7334	4947 ± 70.8	2.913 ± 0.253	0.083 ± 0.016	2.057 ± 0.076	1.586	0.83
NGC2477No7349	4938 ± 71.1	2.815 ± 0.254	0.186 ± 0.018	2.225 ± 0.078	1.726	0.83
NGC2477No7367	5131 ± 71.6	2.710 ± 0.254	0.067 ± 0.016	2.784 ± 0.101	1.995	0.83
NGC2477No7503	4965 ± 71.1	2.804 ± 0.254	0.097 ± 0.017	2.213 ± 0.080	1.749	0.83
NGC2477No8028	4945 ± 71.1	2.739 ± 0.254	0.084 ± 0.017	2.296 ± 0.102	1.823	0.83
NGC2477No8033	4965 ± 71.1	2.775 ± 0.254	0.051 ± 0.017	2.188 ± 0.077	1.741	0.83
NGC2477No8039	4931 ± 71.1	2.714 ± 0.254	0.049 ± 0.017	2.326 ± 0.109	1.829	0.83
NGC2477No8216	4950 ± 71.1	2.742 ± 0.253	0.015 ± 0.016	2.184 ± 0.092	1.839	0.83
NGC2477No8256	4917 ± 71.1	2.608 ± 0.254	0.060 ± 0.016	2.506 ± 0.154	1.942	0.83
NGC2506No1112	4981 ± 72.4	2.545 ± 0.256	-0.107 ± 0.021	2.054 ± 0.228	1.888	2.14
NGC2506No2122	4596 ± 70.4	2.021 ± 0.254	-0.294 ± 0.017	2.33 ± 0.311	2.473	2.14
NGC2506No2212	4711 ± 70.8	2.220 ± 0.254	-0.282 ± 0.016	2.261 ± 0.254	2.370	2.14
NGC2506No2309	4947 ± 72.1	2.498 ± 0.255	-0.152 ± 0.020	1.874 ± 0.202	1.864	2.14
NGC2506No3204	5126 ± 72.7	2.658 ± 0.256	-0.143 ± 0.019	2.454 ± 0.115	1.990	2.14
NGC2506No3254	4064 ± 69.9	1.273 ± 0.255	-0.426 ± 0.014	1.525 ± 0.092	2.897	2.14
NGC2539No229	4965 ± 71.1	2.715 ± 0.253	-0.045 ± 0.016	2.523 ± 0.103	1.893	0.68
NGC2539No246	4978 ± 70.8	2.788 ± 0.253	-0.010 ± 0.015	2.388 ± 0.102	1.832	0.68
NGC2539No251	5020 ± 70.6	2.812 ± 0.253	-0.045 ± 0.015	2.228 ± 0.072	1.734	0.68
NGC2539No317	4962 ± 71.1	2.593 ± 0.254	-0.050 ± 0.016	2.683 ± 0.095	1.975	0.68
NGC2539No346	4966 ± 71.1	2.696 ± 0.253	-0.054 ± 0.016	2.471 ± 0.103	1.917	0.68
NGC2539No447	4863 ± 70.8	2.472 ± 0.254	-0.026 ± 0.017	2.709 ± 0.104	2.052	0.68
NGC2539No463	4884 ± 71.1	2.455 ± 0.254	-0.043 ± 0.017	2.636 ± 0.105	2.049	0.68
NGC2539No502	5005 ± 71.1	2.682 ± 0.254	-0.035 ± 0.016	2.57 ± 0.097	1.948	0.68
NGC2539No652	4691 ± 70.2	2.447 ± 0.253	-0.061 ± 0.015	2.105 ± 0.085	2.166	0.68
NGC2567No114	4849 ± 70.6	2.207 ± 0.254	-0.112 ± 0.015	3.041 ± 0.100	2.402	0.34
NGC2567No16	5074 ± 71.1	2.479 ± 0.254	-0.083 ± 0.017	3.224 ± 0.309	2.307	0.34
NGC2567No37	4925 ± 70.8	2.688 ± 0.253	-0.145 ± 0.015	2.744 ± 0.102	2.206	0.34
NGC2567No54	4990 ± 71.1	2.422 ± 0.254	-0.077 ± 0.017	2.853 ± 0.084	2.274	0.34
NGC2567No61	4632 ± 70.2	2.491 ± 0.253	-0.039 ± 0.015	2.27 ± 0.027	2.756	0.34
NGC2818No2130	4495 ± 70.4	2.168 ± 0.254	-0.148 ± 0.016			
NGC2818No297	5119 ± 73.1	2.810 ± 0.256	0.153 ± 0.023			
NGC2818No3035	5049 ± 72.1	2.723 ± 0.255	0.020 ± 0.019			
NGC2925No108	5054 ± 71.3	2.431 ± 0.253	-0.004 ± 0.017	2.676 ± 0.115	1.886	0.15
NGC2925No95	4992 ± 70.6	2.784 ± 0.253	-0.012 ± 0.015	2.572 ± 0.030	1.877	0.15

Tabela B.4 Parâmetros estelares da amostra

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	[Fe/H] (dex)	Mass (M_{\odot})	$\log(L/L_{\odot})$	Age (Ga)
NGC2972No11	4994 ± 71.3	2.495 ± 0.254	0.034 ± 0.017	3.075 ± 0.079	2.241	0.49
NGC2972No3	5002 ± 71.6	2.553 ± 0.255	0.050 ± 0.018	3.067 ± 0.080	2.228	0.49
NGC3114No150	4773 ± 69.9	2.073 ± 0.252	0.027 ± 0.012	4.49 ± 0.077	2.983	0.13
NGC3114No170	5373 ± 70.4	1.553 ± 0.253	-0.659 ± 0.012	3.981 ± 0.125	3.181	0.13
NGC3114No181	4484 ± 70.2	1.800 ± 0.256	-0.122 ± 0.017	4.022 ± 0.230	2.921	0.13
NGC3114No238	4499 ± 70.0	1.867 ± 0.255	-0.062 ± 0.017	3.807 ± 0.237	2.845	0.13
NGC3114No262	4674 ± 70.2	1.970 ± 0.255	-0.101 ± 0.017	3.884 ± 0.120	2.777	0.13
NGC3114No283	4673 ± 70.6	1.748 ± 0.256	-0.106 ± 0.017	4.663 ± 0.160	3.129	0.13
NGC3114No6	4698 ± 70.4	1.867 ± 0.257	-0.066 ± 0.018	4.612 ± 0.131	3.120	0.13
NGC3532No100	4766 ± 70.8	2.154 ± 0.255	-0.090 ± 0.017	3.379 ± 0.094	2.437	0.35
NGC3532No122	5006 ± 70.8	2.658 ± 0.253	-0.075 ± 0.015	2.873 ± 0.076	2.108	0.35
NGC3532No160	4953 ± 71.3	2.306 ± 0.255	-0.050 ± 0.018	3.149 ± 0.074	2.341	0.35
NGC3532No19	4927 ± 71.3	2.298 ± 0.255	-0.037 ± 0.018	3.218 ± 0.088	2.314	0.35
NGC3532No221	4443 ± 70.4	1.660 ± 0.256	-0.117 ± 0.017	4.818 ± 0.180	3.080	0.35
NGC3532No522	4184 ± 70.0	1.193 ± 0.256	-0.257 ± 0.016	4.412 ± 0.344	2.509	0.35
NGC3532No596	4947 ± 71.1	2.338 ± 0.254	-0.066 ± 0.017	3.126 ± 0.071	2.244	0.35
NGC3532No649	4756 ± 70.4	2.376 ± 0.253	-0.281 ± 0.015	2.167 ± 0.026	2.246	0.35
NGC3532No670	4347 ± 69.9	1.746 ± 0.255	-0.113 ± 0.015	3.047 ± 0.233	2.730	0.35
NGC3680No13	4583 ± 70.0	2.370 ± 0.253	-0.161 ± 0.014	1.659 ± 0.072	1.900	1.78
NGC3680No26	4599 ± 70.0	2.471 ± 0.253	-0.097 ± 0.014	1.704 ± 0.084	1.889	1.78
NGC3680No34	4823 ± 70.4	2.322 ± 0.253	-0.189 ± 0.015	1.752 ± 0.148	1.890	1.78
NGC3680No41	4612 ± 70.0	2.455 ± 0.253	-0.159 ± 0.014	1.641 ± 0.058	1.852	1.78
NGC3680No44	4452 ± 70.0	2.071 ± 0.254	-0.136 ± 0.015	1.69 ± 0.077	2.237	1.78
NGC3680No53	4583 ± 70.0	2.412 ± 0.253	-0.142 ± 0.014	1.652 ± 0.065	1.869	1.78
NGC3960No28	5015 ± 71.6	2.717 ± 0.254	0.094 ± 0.018	2.527 ± 0.101	1.927	
NGC3960No286	5076 ± 72.7	2.779 ± 0.256	0.279 ± 0.021	2.729 ± 0.065	1.855	
NGC3960No44	4640 ± 70.4	2.266 ± 0.253	-0.088 ± 0.015	2.183 ± 0.130	2.124	
NGC4349No127	4417 ± 70.0	1.785 ± 0.255	-0.170 ± 0.016	3.007 ± 0.243	2.767	0.32
NGC4349No168	4998 ± 71.6	2.265 ± 0.255	-0.104 ± 0.017	3.358 ± 0.080	2.489	0.32
NGC4349No174	4554 ± 70.4	1.981 ± 0.255	-0.188 ± 0.017	3.003 ± 0.247	2.660	0.32
NGC4349No203	5019 ± 71.3	2.292 ± 0.255	-0.114 ± 0.017	3.296 ± 0.093	2.438	0.32
NGC4349No5	4985 ± 71.3	2.291 ± 0.255	-0.103 ± 0.017	3.134 ± 0.082	2.378	0.32
NGC4349No53	4714 ± 70.4	2.333 ± 0.253	-0.247 ± 0.015	0.867 ± 0.440	2.493	0.32
NGC4349No9	4988 ± 70.8	2.315 ± 0.254	-0.121 ± 0.016	3.005 ± 0.085	2.345	0.32
NGC5822No1	4456 ± 70.0	1.953 ± 0.254	-0.160 ± 0.015	2.274 ± 0.223	2.500	0.89
NGC5822No102	5037 ± 70.6	2.912 ± 0.252	-0.116 ± 0.015	2.02 ± 0.059	1.688	0.89
NGC5822No201	5154 ± 71.6	2.463 ± 0.255	-0.018 ± 0.018	2.422 ± 0.091	1.906	0.89
NGC5822No224	5034 ± 70.83	2.810 ± 0.253	-0.057 ± 0.015	2.062 ± 0.066	1.688	0.89
NGC5822No240	4425 ± 70.04	2.029 ± 0.254	-0.135 ± 0.015	2.071 ± 0.142	2.353	0.89
NGC5822No316	4987 ± 71.06	2.668 ± 0.254	-0.090 ± 0.016	2.205 ± 0.110	1.842	0.89
NGC5822No348	5015 ± 70.61	2.854 ± 0.253	-0.086 ± 0.015	1.95 ± 0.042	1.639	0.89
NGC5822No375	4621 ± 70.21	2.214 ± 0.254	-0.133 ± 0.015	2.142 ± 0.124	2.216	0.89
NGC5822No443	4634 ± 70.21	2.218 ± 0.254	-0.138 ± 0.015	2.111 ± 0.132	2.201	0.89
NGC5822No6	5033 ± 70.61	2.904 ± 0.252	-0.106 ± 0.015	2.057 ± 0.068	1.712	0.89
NGC5822No8	4975 ± 71.06	2.667 ± 0.253	-0.098 ± 0.016	2.262 ± 0.118	1.884	0.89
NGC6067No261	4299 ± 70.21	1.085 ± 0.260	0.022 ± 0.021	6.731 ± 0.348	3.741	0.13
NGC6067No298	5773 ± 72.42	4.535 ± 0.252	0.430 ± 0.015	11.648 ± 0.186	7.020	0.13
NGC6067No316	4114 ± 69.87	0.843 ± 0.260	-0.079 ± 0.020			0.13
NGC6134No114	4936 ± 71.57	2.690 ± 0.255	0.174 ± 0.018	2.006 ± 0.078	1.670	1.45
NGC6134No129	4927 ± 70.83	2.784 ± 0.253	0.067 ± 0.017	1.908 ± 0.104	1.490	1.45

Tabela B.5 Parâmetros estelares da amostra

Star	T_{eff} (K)	$\log g$ (dex)	[Fe/H] (dex)	Mass (M_{\odot})	$\log(L/L_{\odot})$	Age (Ga)
NGC6134No151	4943 ± 71.31	2.876 ± 0.254	0.205 ± 0.019	1.974 ± 0.081	1.580	1.45
NGC6134No157	4958 ± 71.06	2.826 ± 0.254	0.094 ± 0.017	1.977 ± 0.059	1.589	1.45
NGC6134No39	5040 ± 72.42	2.987 ± 0.255	0.331 ± 0.021	2.314 ± 0.048	1.606	1.45
NGC6134No62	4878 ± 70.83	2.600 ± 0.253	0.028 ± 0.016	1.987 ± 0.115	1.753	1.45
NGC6134No75	4939 ± 71.06	2.856 ± 0.254	0.147 ± 0.018	1.969 ± 0.070	1.543	1.45
NGC6134No79	4988 ± 71.31	2.782 ± 0.254	0.095 ± 0.017	1.942 ± 0.095	1.466	1.45
NGC6134No99	4793 ± 71.31	2.536 ± 0.255	0.108 ± 0.019	1.957 ± 0.147	1.791	1.45
NGC6208No19	4527 ± 70.21	2.216 ± 0.253	-0.228 ± 0.014	1.64 ± 0.066	1.985	1.74
NGC6208No31	4881 ± 70.83	2.583 ± 0.253	-0.176 ± 0.015	1.747 ± 0.144	1.765	1.74
NGC6281No3	4892 ± 70.83	2.207 ± 0.255	-0.087 ± 0.016	3.399 ± 0.074	2.460	0.32
NGC6281No4	4945 ± 71.31	2.227 ± 0.255	-0.051 ± 0.017	3.325 ± 0.070	2.364	0.32
NGC6425No46	5052 ± 71.31	2.620 ± 0.254	-0.046 ± 0.016	2.652 ± 0.088	1.970	0.54
NGC6425No61	5034 ± 71.31	2.538 ± 0.254	-0.020 ± 0.017	2.702 ± 0.085	2.012	0.54
NGC6494No46	4883 ± 71.06	2.234 ± 0.255	-0.042 ± 0.016	3.244 ± 0.078	2.329	0.38
NGC6494No48	4955 ± 71.57	2.274 ± 0.255	-0.029 ± 0.017	3.164 ± 0.071	2.270	0.38
NGC6494No49	4833 ± 70.61	2.199 ± 0.254	-0.053 ± 0.015	3.083 ± 0.089	2.235	0.38
NGC6494No6	4769 ± 70.83	2.130 ± 0.255	-0.070 ± 0.017	3.051 ± 0.133	2.267	0.38
NGC6633No100	4924 ± 70.83	2.514 ± 0.254	-0.095 ± 0.016	2.722 ± 0.093	2.013	0.78
NGC6633No106	5015 ± 71.06	2.697 ± 0.253	-0.067 ± 0.015	2.457 ± 0.093	1.849	0.78
NGC6633No119	5093 ± 70.83	2.828 ± 0.253	-0.108 ± 0.015	2.252 ± 0.096	1.723	0.78
NGC6633No126	5068 ± 70.83	2.742 ± 0.253	-0.080 ± 0.015	2.424 ± 0.092	1.810	0.78
NGC6705No1090	4628 ± 70.61	1.887 ± 0.257	0.068 ± 0.019	3.8 ± 0.155	2.490	0.22
NGC6705No1101	4770 ± 70.41	2.260 ± 0.254	0.079 ± 0.016	3.674 ± 0.159	2.391	0.22
NGC6705No1111	4730 ± 70.83	2.075 ± 0.255	0.063 ± 0.018	3.618 ± 0.167	2.458	0.22
NGC6705No1117	4721 ± 70.61	1.949 ± 0.256	0.076 ± 0.018	3.521 ± 0.137	2.500	0.22
NGC6705No1145	4645 ± 70.41	2.151 ± 0.254	0.026 ± 0.016	3.355 ± 0.230	2.430	0.22
NGC6705No1184	4350 ± 70.04	1.705 ± 0.256	0.022 ± 0.017	3.448 ± 0.330	2.743	0.22
NGC6705No1248	4783 ± 70.83	2.136 ± 0.255	0.083 ± 0.017	3.455 ± 0.113	2.377	0.22
NGC6705No1256	4380 ± 70.04	1.729 ± 0.256	0.046 ± 0.017	3.146 ± 0.285	2.669	0.22
NGC6705No1286	4772 ± 70.83	2.166 ± 0.255	0.065 ± 0.017	3.709 ± 0.149	2.462	0.22
NGC6705No136	4657 ± 70.61	2.055 ± 0.256	0.098 ± 0.018	3.792 ± 0.170	2.493	0.22
NGC6705No1364	4796 ± 70.61	2.074 ± 0.254	0.032 ± 0.017	3.67 ± 0.243	2.475	0.22
NGC6705No1423	4425 ± 70.41	1.701 ± 0.256	0.073 ± 0.018	3.852 ± 0.297	2.724	0.22
NGC6705No1446	4599 ± 70.21	2.108 ± 0.254	0.062 ± 0.016	3.451 ± 0.225	2.501	0.22
NGC6705No160	4602 ± 70.41	1.775 ± 0.256	0.030 ± 0.017	3.74 ± 0.166	2.635	0.22
NGC6705No1625	4354 ± 70.04	1.696 ± 0.256	0.050 ± 0.017	3.087 ± 0.280	2.651	0.22
NGC6705No1658	4598 ± 70.41	1.930 ± 0.256	0.068 ± 0.018	3.91 ± 0.170	2.595	0.22
NGC6705No1837	4778 ± 70.61	2.230 ± 0.254	0.064 ± 0.016	3.493 ± 0.110	2.409	0.22
NGC6705No2000	4551 ± 70.41	1.749 ± 0.257	0.086 ± 0.018	4.04 ± 0.140	2.685	0.22
NGC6705No320	4719 ± 70.83	2.061 ± 0.256	0.090 ± 0.018	3.876 ± 0.192	2.530	0.22
NGC6705No411	4390 ± 70.21	1.683 ± 0.256	0.052 ± 0.018	3.193 ± 0.304	2.677	0.22
NGC6705No660	4651 ± 70.61	1.952 ± 0.256	0.083 ± 0.019	3.577 ± 0.203	2.511	0.22
NGC6705No669	4652 ± 70.61	1.858 ± 0.257	0.087 ± 0.019	3.451 ± 0.160	2.444	0.22
NGC6705No686	4706 ± 70.61	2.035 ± 0.255	0.109 ± 0.018	3.727 ± 0.149	2.454	0.22
NGC6705No779	4320 ± 70.21	1.565 ± 0.257	0.054 ± 0.018	3.397 ± 0.337	2.736	0.22
NGC6705No816	4667 ± 70.61	1.813 ± 0.257	0.060 ± 0.019	3.956 ± 0.160	2.580	0.22
NGC6705No827	4494 ± 70.41	1.793 ± 0.256	0.056 ± 0.018	4.04 ± 0.269	2.673	0.22
NGC6705No899	4689 ± 70.83	2.008 ± 0.256	0.086 ± 0.019	3.584 ± 0.171	2.532	0.22
NGC6705No916	4682 ± 70.61	1.876 ± 0.256	0.079 ± 0.018	3.745 ± 0.154	2.588	0.22
NGC6705No963	4655 ± 70.61	1.912 ± 0.256	0.075 ± 0.019	3.757 ± 0.158	2.545	0.22

Anexo C

Tabela de parâmetros na determinação do indicador de actividade R'_{HK}

Tabela C.1 Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$

Star	I_{CaII}	S_{MW}	BV	BV_{Ref}	$\log(R'_{HK})$
IC2714No110	0.15 ± 0.0007	0.19 ± 0.0009	1.00	Høg et al. [32]	-5.016 ± 0.002
IC2714No121	0.07 ± 0.0007	0.09 ± 0.0008	1.26	Høg et al. [32]	-5.606 ± 0.004
IC2714No126	0.08 ± 0.0004	0.10 ± 0.0005	0.91	Høg et al. [32]	-5.360 ± 0.004
IC2714No190	0.06 ± 0.0005	0.08 ± 0.0005	1.09	Høg et al. [32]	-5.505 ± 0.003
IC2714No220	0.08 ± 0.0004	0.11 ± 0.0005	0.99	Høg et al. [32]	-5.289 ± 0.003
IC2714No5	0.08 ± 0.0005	0.10 ± 0.0006	1.10	Høg et al. [32]	-5.392 ± 0.003
IC2714No53	0.12 ± 0.0008	0.15 ± 0.0010	1.27	Mermilliod et al. [46]	-5.408 ± 0.003
IC2714No87	0.12 ± 0.0007	0.15 ± 0.0008	1.21	Munari et al. [50]	-5.311 ± 0.002
IC4651No10393	0.11 ± 0.0005	0.15 ± 0.0007	1.11	Lovis and Mayor [39]	-5.225 ± 0.002
IC4651No11218	0.11 ± 0.0022	0.14 ± 0.0027	0.92	Høg et al. [32]	-5.144 ± 0.012
IC4651No11453	0.08 ± 0.0003	0.11 ± 0.0004	1.02	Lovis and Mayor [39]	-5.305
IC4651No14527	0.08 ± 0.0004	0.11 ± 0.0005	1.14	Lovis and Mayor [39]	-5.389 ± 0.002
IC4651No17646	0.13 ± 0.0066	0.16 ± 0.0079	1.16	Høg et al. [32]	-5.232 ± 0.022
IC4651No17647	0.07 ± 0.0052	0.09 ± 0.0062	1.02	Høg et al. [32]	-5.398 ± 0.037
IC4651No6333	0.08 ± 0.0012	0.10 ± 0.0014	1.35	Lovis and Mayor [39]	-5.688 ± 0.006
IC4651No7646	0.08 ± 0.0004	0.11 ± 0.0004	1.04	Munari et al. [50]	-5.306 ± 0.002
IC4651No8540	0.09 ± 0.0004	0.12 ± 0.0005	1.13	Munari et al. [50]	-5.348 ± 0.002
IC4651No9025	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	1.13	Lovis and Mayor [39]	-5.341 ± 0.002
IC4651No9122	0.09 ± 0.0003	0.11 ± 0.0004	0.80	Lovis and Mayor [39]	-5.404 ± 0.004
IC4651No9791	0.08 ± 0.0004	0.11 ± 0.0005	1.32	Lovis and Mayor [39]	-5.627 ± 0.002
IC4756No101	0.08 ± 0.0011	0.11 ± 0.0013	1.02	Alcaino [1]	-5.301 ± 0.006
IC4756No109	0.08 ± 0.0007	0.11 ± 0.0008	1.05	Alcaino [1]	-5.314 ± 0.004
IC4756No12	0.08 ± 0.0007	0.10 ± 0.0009	1.03	Alcaino [1]	-5.345 ± 0.005
IC4756No125	0.09 ± 0.0010	0.12 ± 0.0012	1.01	Alcaino [1]	-5.253 ± 0.005
IC4756No14	0.05 ± 0.0037	0.07 ± 0.0044	1.22	Alcaino [1]	-5.676 ± 0.028
IC4756No164	0.06 ± 0.0009	0.08 ± 0.0011	1.08	Alcaino [1]	-5.459 ± 0.006
IC4756No28	0.08 ± 0.0006	0.11 ± 0.0008	1.27	Alcaino [1]	-5.552 ± 0.003
IC4756No38	0.11 ± 0.0006	0.14 ± 0.0007	1.10	Alcaino [1]	-5.243 ± 0.002
IC4756No42	0.13 ± 0.0013	0.16 ± 0.0016	0.97	Alcaino [1]	-5.081 ± 0.005
IC4756No44	0.14 ± 0.0014	0.17 ± 0.0016	1.08	Alcaino [1]	-5.116 ± 0.004
IC4756No49	0.07 ± 0.0009	0.09 ± 0.0011	1.04	Alcaino [1]	-5.412 ± 0.006
IC4756No52	0.07 ± 0.0004	0.09 ± 0.0005	1.37	Alcaino [1]	-5.782 ± 0.002
IC4756No81	0.11 ± 0.0009	0.13 ± 0.0011	1.00	Alcaino [1]	-5.181 ± 0.004
NGC1662No1	0.08 ± 0.0015	0.10 ± 0.0018	1.18	Lovis and Mayor [39]	-5.462 ± 0.008
NGC1662No2	0.10 ± 0.0014	0.12 ± 0.0017	1.16	Lovis and Mayor [39]	-5.349 ± 0.006
NGC2204No1320	0.11 ± 0.0060	0.14 ± 0.0072	1.14	Mermilliod et al. [46]	-5.284 ± 0.024
NGC2204No2211	0.21 ± 0.0082	0.26 ± 0.0098	0.88	Mermilliod and Mayor [45]	-4.772 ± 0.020
NGC2204No2212	0.05 ± 0.0091	0.06 ± 0.0109	1.21	Lovis and Mayor [39]	-5.705 ± 0.076
NGC2204No3324	0.11 ± 0.0099	0.14 ± 0.0118	1.30	Mermilliod et al. [46]	-5.482 ± 0.037
NGC2204No3325	0.11 ± 0.0083	0.13 ± 0.0100	1.69	Munari et al. [50]	-6.159 ± 0.032
NGC2204No4137	0.07 ± 0.0099	0.09 ± 0.0118	0.83	Høg et al. [32]	-5.612 ± 0.191
NGC2251No3	0.07 ± 0.0029	0.10 ± 0.0034	1.25	Lovis and Mayor [39]	-5.572 ± 0.015
NGC2251No33	0.06 ± 0.0020	0.08 ± 0.0023	0.78	Høg et al. [32]	-7.040 ± 1.144
NGC2251No35	0.13 ± 0.0030	0.16 ± 0.0036	1.44	Høg et al. [32]	-5.641 ± 0.010
NGC2287No107	0.09 ± 0.0007	0.12 ± 0.0008	1.15	Lovis and Mayor [39]	-5.365 ± 0.003
NGC2287No204	0.11 ± 0.0008	0.14 ± 0.0009	1.26	Lovis and Mayor [39]	-5.411 ± 0.003
NGC2287No21	0.15 ± 0.0006	0.19 ± 0.0007	1.51	Høg et al. [32]	-5.676 ± 0.002
NGC2287No75	0.09 ± 0.0003	0.11 ± 0.0004	1.28	Lovis and Mayor [39]	-5.550 ± 0.001

Tabela C.2 Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$

Star	I_{CaII}	S_{MW}	BV	BV_{Ref}	$\log(R'_{HK})$
NGC2287No87	0.11 ± 0.0005	0.14 ± 0.0007	1.41	Lovis and Mayor [39]	-5.659 ± 0.002
NGC2287No97	0.08 ± 0.0003	0.10 ± 0.0004	1.16	Lovis and Mayor [39]	-5.430 ± 0.002
NGC2354No125	0.07 ± 0.0015	0.10 ± 0.0018	1.13	Høg et al. [32]	-5.429 ± 0.008
NGC2354No152	0.09 ± 0.0077	0.11 ± 0.0092	1.12	Mermilliod et al. [46]	-5.355 ± 0.037
NGC2354No183	0.07 ± 0.0019	0.09 ± 0.0023	1.25	Munari et al. [50]	-5.596 ± 0.011
NGC2354No205	0.10 ± 0.0020	0.13 ± 0.0024	1.20	Høg et al. [32]	-5.370 ± 0.008
NGC2354No219	0.13 ± 0.0010	0.16 ± 0.0012	0.93	Munari et al. [50]	-5.050 ± 0.004
NGC2354No59	0.18 ± 0.0261	0.22 ± 0.0312	1.14	Mermilliod et al. [46]	-5.068 ± 0.063
NGC2354No66	0.05 ± 0.0020	0.06 ± 0.0024	1.12	Høg et al. [32]	-5.632 ± 0.019
NGC2354No91	0.08 ± 0.0023	0.11 ± 0.0027	1.15	Munari et al. [50]	-5.417 ± 0.012
NGC2355No398	0.11 ± 0.0021	0.14 ± 0.0026	1.15	Krone-Martins et al. [33]	-5.275 ± 0.008
NGC2360No119	0.09 ± 0.0005	0.11 ± 0.0006	1.04	McClure [43]	-5.302 ± 0.003
NGC2360No50	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	1.01	McClure [43]	-5.254 ± 0.003
NGC2360No66	0.17 ± 0.0006	0.21 ± 0.0007	0.93	Mermilliod [44]	-4.900 ± 0.002
NGC2360No7	0.09 ± 0.0005	0.11 ± 0.0006	1.00	McClure [43]	-5.282 ± 0.003
NGC2360No79	0.09 ± 0.0003	0.11 ± 0.0004	1.02	Mermilliod [44]	-5.285 ± 0.002
NGC2360No85	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	1.00	McClure [43]	-5.260 ± 0.003
NGC2360No86	0.10 ± 0.0004	0.13 ± 0.0005	1.03	Purgathofer [52]	-5.220 ± 0.002
NGC2360No89	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	1.00	McClure [43]	-5.247 ± 0.003
NGC2423No20	0.11 ± 0.0027	0.13 ± 0.0032	1.01	Clariá et al. [12]	-5.189 ± 0.012
NGC2423No3	0.08 ± 0.0003	0.11 ± 0.0003	1.27	Høg et al. [32]	-5.564 ± 0.001
NGC2423No56	0.19 ± 0.0016	0.23 ± 0.0019	1.01	Clariá et al. [12]	-4.923 ± 0.004
NGC2447No41	0.08 ± 0.0017	0.10 ± 0.0020	0.89	Høg et al. [32]	-5.373 ± 0.016
NGC2477No1014	0.14 ± 0.0028	0.17 ± 0.0033	1.20	Mermilliod et al. [46]	-5.254 ± 0.008
NGC2477No1272	0.13 ± 0.0033	0.16 ± 0.0039	1.06	Carlberg [8]	-5.121 ± 0.011
NGC2477No1388	0.15 ± 0.0052	0.18 ± 0.0063	1.35	Lovis and Mayor [39]	-5.444 ± 0.015
NGC2477No2036	0.10 ± 0.0029	0.13 ± 0.0034	1.23	Mermilliod et al. [46]	-5.418 ± 0.012
NGC2477No2061	0.14 ± 0.0019	0.18 ± 0.0022	1.20	Mermilliod et al. [46]	-5.228 ± 0.005
NGC2477No2359	0.07 ± 0.0064	0.09 ± 0.0077	1.41	Munari et al. [50]	-5.858 ± 0.038
NGC2477No3072	0.09 ± 0.0030	0.11 ± 0.0036	1.18	Mermilliod et al. [46]	-5.434 ± 0.015
NGC2477No3181	0.07 ± 0.0017	0.10 ± 0.0020	1.24	Munari et al. [50]	-5.561 ± 0.009
NGC2477No3206	0.08 ± 0.0030	0.10 ± 0.0036	1.29	Munari et al. [50]	-5.626 ± 0.016
NGC2477No4004	0.07 ± 0.0008	0.09 ± 0.0010	1.18	Munari et al. [50]	-5.497 ± 0.005
NGC2477No4027	0.10 ± 0.0025	0.12 ± 0.0030	1.20	Lovis and Mayor [39]	-5.395 ± 0.011
NGC2477No4037	0.10 ± 0.0033	0.12 ± 0.0039	1.19	Carlberg [8]	-5.386 ± 0.014
NGC2477No4064	0.21 ± 0.0037	0.26 ± 0.0044	1.15	Carlberg [8]	-5.017 ± 0.008
NGC2477No4221	0.09 ± 0.0047	0.12 ± 0.0056	1.20	Bragaglia et al. [7]	-5.423 ± 0.021
NGC2477No4248	0.30 ± 0.0075	0.36 ± 0.0089	1.24	Munari et al. [50]	-4.986 ± 0.011
NGC2477No4301	0.24 ± 0.0079	0.30 ± 0.0094	1.30	Zacharias et al. [66]	-5.156 ± 0.014
NGC2477No4327	0.10 ± 0.0059	0.12 ± 0.0070	1.42	Lovis and Mayor [39]	-5.726
NGC2477No5035	0.07 ± 0.0011	0.09 ± 0.0013	1.25	Carlberg [8]	-5.606 ± 0.007
NGC2477No5047	0.08 ± 0.0018	0.11 ± 0.0021	1.27	Carlberg [8]	-5.559 ± 0.009
NGC2477No5074	0.15 ± 0.0036	0.18 ± 0.0044	1.20	Mermilliod et al. [46]	-5.229 ± 0.011
NGC2477No5076	0.10 ± 0.0036	0.12 ± 0.0043	1.22	Mermilliod et al. [46]	-5.430 ± 0.015
NGC2477No5094	0.19 ± 0.0028	0.24 ± 0.0034	1.20	Mermilliod et al. [46]	-5.114 ± 0.006
NGC2477No5317	0.20 ± 0.0040	0.25 ± 0.0047	1.28	Munari et al. [50]	-5.208 ± 0.008
NGC2477No5338	0.15 ± 0.0038	0.19 ± 0.0045	1.32	Munari et al. [50]	-5.376 ± 0.010
NGC2477No5345	0.18 ± 0.0053	0.23 ± 0.0063	1.25	Munari et al. [50]	-5.193 ± 0.012

Tabela C.3 Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$

Star	I_{CaII}	S_{MW}	BV	BV_{Ref}	$\log(R'_{HK})$
NGC2477No6005	0.16 ± 0.0031	0.20 ± 0.0036	1.21	Mermilliod et al. [46]	-5.191 ± 0.008
NGC2477No6040	0.04 ± 0.0091	0.06 ± 0.0109	0.98	Carlberg [8]	-5.751 ± 0.166
NGC2477No6058	0.18 ± 0.0032	0.22 ± 0.0038	1.16	Mermilliod et al. [46]	-5.100 ± 0.008
NGC2477No6088	0.09 ± 0.0044	0.12 ± 0.0052	1.17	Mermilliod et al. [46]	-5.396 ± 0.020
NGC2477No6254	0.13 ± 0.0008	0.17 ± 0.0010	0.96	Munari et al. [50]	-5.048 ± 0.003
NGC2477No6288	0.08 ± 0.0006	0.11 ± 0.0008	1.16	Høg et al. [32]	-5.419 ± 0.003
NGC2477No7012	0.14 ± 0.0028	0.18 ± 0.0033	0.98	Mermilliod et al. [46]	-5.025 ± 0.010
NGC2477No7203	0.17 ± 0.0055	0.21 ± 0.0066	1.28	Mermilliod et al. [46]	-5.281 ± 0.014
NGC2477No7206	0.19 ± 0.0060	0.23 ± 0.0072	1.25	Mermilliod et al. [46]	-5.189 ± 0.013
NGC2477No7242	0.21 ± 0.0058	0.26 ± 0.0069	1.28	Carlberg [8]	-5.178 ± 0.011
NGC2477No7266	0.07 ± 0.0041	0.10 ± 0.0049	1.19	Mermilliod et al. [46]	-5.494 ± 0.022
NGC2477No7273	0.07 ± 0.0038	0.09 ± 0.0045	1.23	Munari et al. [50]	-5.568 ± 0.022
NGC2477No7310	0.08 ± 0.0045	0.10 ± 0.0053	1.35	Mermilliod et al. [46]	-5.706 ± 0.023
NGC2477No7334	0.24 ± 0.0036	0.30 ± 0.0043	1.36	Mermilliod et al. [46]	-5.241 ± 0.006
NGC2477No7349	0.15 ± 0.0055	0.19 ± 0.0066	1.33	Mermilliod et al. [46]	-5.399 ± 0.015
NGC2477No7367	0.10 ± 0.0012	0.13 ± 0.0014	1.20	Mermilliod et al. [46]	-5.390 ± 0.005
NGC2477No7503	0.16 ± 0.0046	0.20 ± 0.0055	1.26	Zacharias et al. [66]	-5.265 ± 0.012
NGC2477No8028	0.13 ± 0.0026	0.17 ± 0.0031	1.24	Mermilliod et al. [46]	-5.310 ± 0.008
NGC2477No8033	0.13 ± 0.0032	0.16 ± 0.0038	1.25	Mermilliod et al. [46]	-5.343 ± 0.010
NGC2477No8039	0.12 ± 0.0038	0.15 ± 0.0045	1.24	Munari et al. [50]	-5.372 ± 0.013
NGC2477No8216	0.06 ± 0.0013	0.08 ± 0.0016	1.29	Munari et al. [50]	-5.691 ± 0.008
NGC2477No8256	0.11 ± 0.0026	0.14 ± 0.0031	1.24	Munari et al. [50]	-5.394 ± 0.010
NGC2506No2122	0.09 ± 0.0050	0.11 ± 0.0059	1.16	Carlberg [8]	-5.402 ± 0.024
NGC2506No2212	0.11 ± 0.0033	0.14 ± 0.0040	1.12	Carlberg [8]	-5.246 ± 0.013
NGC2506No3204	0.10 ± 0.0075	0.13 ± 0.0089	0.86	Carlberg [8]	-5.217 ± 0.054
NGC2506No3254	0.15 ± 0.0037	0.19 ± 0.0044	1.42	Lovis and Mayor [39]	-5.544 ± 0.010
NGC2539No229	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	0.96	Høg et al. [32]	-5.254 ± 0.003
NGC2539No246	0.20 ± 0.0006	0.25 ± 0.0007	1.07	Høg et al. [32]	-4.937 ± 0.001
NGC2539No251	0.16 ± 0.0006	0.20 ± 0.0007	0.86	Høg et al. [32]	-4.906 ± 0.002
NGC2539No317	0.11 ± 0.0005	0.14 ± 0.0006	0.98	Lovis and Mayor [39]	-5.159 ± 0.002
NGC2539No346	0.13 ± 0.0006	0.16 ± 0.0007	0.80	Høg et al. [32]	-5.059 ± 0.003
NGC2539No447	0.07 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.99	Høg et al. [32]	-5.354 ± 0.003
NGC2539No463	0.08 ± 0.0005	0.11 ± 0.0006	0.83	Høg et al. [32]	-5.391 ± 0.005
NGC2539No502	0.10 ± 0.0005	0.13 ± 0.0006	0.83	Høg et al. [32]	-5.214 ± 0.004
NGC2539No652	0.09 ± 0.0004	0.11 ± 0.0005	1.00	Høg et al. [32]	-5.275 ± 0.002
NGC2567No114	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0006	1.11	Lovis and Mayor [39]	-5.319 ± 0.003
NGC2567No16	0.12 ± 0.0006	0.15 ± 0.0008	0.72	Lovis and Mayor [39]	-5.107 ± 0.005
NGC2567No37	0.19 ± 0.0008	0.24 ± 0.0009	1.05	Munari et al. [50]	-4.931 ± 0.002
NGC2567No54	0.11 ± 0.0007	0.14 ± 0.0008	1.10	Lovis and Mayor [39]	-5.239 ± 0.003
NGC2567No61	0.11 ± 0.0013	0.14 ± 0.0015	1.13	Lovis and Mayor [39]	-5.263 ± 0.005
NGC2818No2130	0.20 ± 0.0079	0.25 ± 0.0094	1.37	Munari et al. [50]	-5.333 ± 0.016
NGC2818No297	0.09 ± 0.0162	0.12 ± 0.0193	1.04	Mermilliod et al. [46]	-5.279 ± 0.084
NGC2925No108	0.19 ± 0.0005	0.23 ± 0.0006	0.73	Høg et al. [32]	-4.779 ± 0.002
NGC2925No95	0.27 ± 0.0010	0.33 ± 0.0011	1.03	Mermilliod et al. [46]	-4.772 ± 0.002
NGC2972No11	0.02 ± 0.0040	0.04 ± 0.0048	1.28	Lovis and Mayor [39]	-6.028 ± 0.056
NGC2972No3	0.05 ± 0.0057	0.06 ± 0.0068	1.26	Lovis and Mayor [39]	-5.782 ± 0.048
NGC3114No150	0.19 ± 0.0005	0.23 ± 0.0006	1.12	Lovis and Mayor [39]	-5.030 ± 0.001

Tabela C.4 Parâmetros na determinação de $\log(R'_{\text{HK}})$

Star	I_{CaII}	S_{MW}	BV	BV_{Ref}	$\log(R'_{\text{HK}})$
NGC3114No170	0.17 ± 0.0004	0.21 ± 0.0005	0.88	Lovis and Mayor [39]	-4.901 ± 0.001
NGC3114No181	0.07 ± 0.0003	0.09 ± 0.0004	1.24	Lovis and Mayor [39]	-5.593 ± 0.002
NGC3114No238	0.07 ± 0.0004	0.09 ± 0.0004	1.33	Høg et al. [32]	-5.703 ± 0.002
NGC3114No262	0.13 ± 0.0003	0.17 ± 0.0003	1.13	Høg et al. [32]	-5.187 ± 0.001
NGC3114No283	0.17 ± 0.0004	0.22 ± 0.0005	1.20	Høg et al. [32]	-5.156 ± 0.001
NGC3114No6	0.14 ± 0.0002	0.17 ± 0.0003	1.26	Lovis and Mayor [39]	-5.330 ± 0.001
NGC3532No100	0.07 ± 0.0003	0.10 ± 0.0003	1.12	Clem et al. [13]	-5.421 ± 0.001
NGC3532No122	0.21 ± 0.0005	0.26 ± 0.0006	0.94	Clem et al. [13]	-4.802 ± 0.001
NGC3532No160	0.09 ± 0.0005	0.12 ± 0.0007	1.03	Clem et al. [13]	-5.248 ± 0.003
NGC3532No19	0.12 ± 0.0002	0.15 ± 0.0002	0.98	Clem et al. [13]	-5.119 ± 0.001
NGC3532No221	0.09 ± 0.0002	0.12 ± 0.0002	1.28	Lovis and Mayor [39]	-5.535 ± 0.001
NGC3532No522	0.40 ± 0.0014	0.49 ± 0.0017	1.23	Clem et al. [13]	-4.843 ± 0.002
NGC3532No596	0.09 ± 0.0003	0.12 ± 0.0003	0.99	Clem et al. [13]	-5.231 ± 0.001
NGC3532No649	0.09 ± 0.0002	0.11 ± 0.0003	0.98	Clem et al. [13]	-5.285 ± 0.001
NGC3532No670	0.08 ± 0.0002	0.11 ± 0.0003	1.37	Clem et al. [13]	-5.699 ± 0.001
NGC3680No13	0.06 ± 0.0007	0.07 ± 0.0008	1.15	Lovis and Mayor [39]	-5.570 ± 0.005
NGC3680No26	0.06 ± 0.0005	0.08 ± 0.0005	1.30	Lovis and Mayor [39]	-5.723 ± 0.003
NGC3680No34	0.11 ± 0.0004	0.14 ± 0.0004	0.87	Mermilliod et al. [46]	-5.145 ± 0.002
NGC3680No41	0.06 ± 0.0004	0.09 ± 0.0005	1.16	Munari et al. [50]	-5.518 ± 0.003
NGC3680No44	0.06 ± 0.0007	0.08 ± 0.0009	1.28	Lovis and Mayor [39]	-5.673 ± 0.005
NGC3680No53	0.06 ± 0.0005	0.08 ± 0.0006	1.10	Lovis and Mayor [39]	-5.490 ± 0.004
NGC3960No28	0.02 ± 0.0089	0.03 ± 0.0107	1.20	Lovis and Mayor [39]	-5.972 ± 0.142
NGC3960No44	0.14 ± 0.0043	0.18 ± 0.0051	1.20	Lovis and Mayor [39]	-5.233 ± 0.012
NGC4349No127	0.09 ± 0.0005	0.11 ± 0.0005	1.56	Lovis and Mayor [39]	-5.994
NGC4349No168	0.08 ± 0.0005	0.11 ± 0.0006	0.80	Høg et al. [32]	-5.450 ± 0.008
NGC4349No174	0.06 ± 0.0007	0.07 ± 0.0008	1.46	Mermilliod et al. [46]	-6.011 ± 0.005
NGC4349No203	0.09 ± 0.0010	0.11 ± 0.0011	0.86	Høg et al. [32]	-5.343 ± 0.009
NGC4349No5	0.06 ± 0.0005	0.08 ± 0.0006	1.34	Mermilliod et al. [46]	-5.753 ± 0.003
NGC4349No53	0.09 ± 0.0004	0.12 ± 0.0004	1.12	Lovis and Mayor [39]	-5.340 ± 0.002
NGC4349No9	0.14 ± 0.0008	0.18 ± 0.0010	1.33	Mermilliod et al. [46]	-5.419 ± 0.002
NGC5822No1	0.10 ± 0.0006	0.13 ± 0.0007	1.28	Loden [36]	-5.484 ± 0.002
NGC5822No102	0.19 ± 0.0015	0.24 ± 0.0018	1.04	Loden [36]	-4.928 ± 0.003
NGC5822No201	0.12 ± 0.0005	0.15 ± 0.0006	1.07	Loden [36]	-5.188 ± 0.002
NGC5822No224	0.11 ± 0.0014	0.14 ± 0.0016	0.68	Høg et al. [32]	-5.208 ± 0.015
NGC5822No240	0.08 ± 0.0007	0.10 ± 0.0009	1.33	Loden [36]	-5.672 ± 0.004
NGC5822No316	0.10 ± 0.0008	0.12 ± 0.0010	1.04	Høg et al. [32]	-5.243 ± 0.004
NGC5822No348	0.07 ± 0.0013	0.09 ± 0.0015	1.07	Høg et al. [32]	-5.420 ± 0.009
NGC5822No375	0.07 ± 0.0003	0.10 ± 0.0004	1.22	Loden [36]	-5.536 ± 0.002
NGC5822No443	0.09 ± 0.0007	0.11 ± 0.0008	1.22	Loden [36]	-5.479 ± 0.003
NGC5822No6	0.17 ± 0.0015	0.21 ± 0.0018	1.02	Loden [36]	-4.979 ± 0.004
NGC5822No8	0.09 ± 0.0003	0.11 ± 0.0004	1.06	Loden [36]	-5.296 ± 0.002
NGC6067No316	0.49 ± 0.0026	0.59 ± 0.0031	1.50	Lovis and Mayor [39]	-5.170 ± 0.002
NGC6134No114	0.07 ± 0.0136	0.09 ± 0.0163	1.31	Mermilliod et al. [46]	-5.696 ± 0.080
NGC6134No129	0.06 ± 0.0057	0.08 ± 0.0068	0.88	Høg et al. [32]	-5.669 ± 0.112
NGC6134No157	0.10 ± 0.0071	0.12 ± 0.0085	1.27	Mermilliod et al. [46]	-5.493 ± 0.030

Tabela C.5 Parâmetros na determinação de $\log(R'_{HK})$

Star	I_{CaII}	S_{MW}	BV	BV_{Ref}	$\log(R'_{HK})$
NGC6134No62	0.02 ± 0.0041	0.03 ± 0.0049	1.31	Mermilliod et al. [46]	-6.235 ± 0.083
NGC6134No75	0.05 ± 0.0120	0.07 ± 0.0144	1.28	Mermilliod et al. [46]	-5.786 ± 0.095
NGC6134No79	0.14 ± 0.0063	0.18 ± 0.0075	1.15	Høg et al. [32]	-5.177 ± 0.019
NGC6208No31	0.04 ± 0.0042	0.06 ± 0.0051	1.17	Lovis and Mayor [39]	-5.730 ± 0.043
NGC6281No3	0.08 ± 0.0004	0.10 ± 0.0005	1.10	Lovis and Mayor [39]	-5.396 ± 0.002
NGC6281No4	0.07 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	1.11	Lovis and Mayor [39]	-5.411 ± 0.003
NGC6425No46	0.14 ± 0.0021	0.17 ± 0.0025	1.22	Clariá et al. [12]	-5.287 ± 0.006
NGC6425No61	0.09 ± 0.0016	0.11 ± 0.0019	1.16	Høg et al. [32]	-5.396 ± 0.008
NGC6494No46	0.06 ± 0.0004	0.08 ± 0.0005	1.29	Høg et al. [32]	-5.714 ± 0.003
NGC6494No48	0.08 ± 0.0004	0.10 ± 0.0005	1.30	Høg et al. [32]	-5.626 ± 0.002
NGC6494No49	0.11 ± 0.0009	0.13 ± 0.0010	1.28	Høg et al. [32]	-5.474 ± 0.003
NGC6494No6	0.06 ± 0.0006	0.08 ± 0.0008	1.47	Lovis and Mayor [39]	-6.013 ± 0.004
NGC6633No100	0.08 ± 0.0004	0.11 ± 0.0005	1.08	Lovis and Mayor [39]	-5.332 ± 0.002
NGC6633No106	0.16 ± 0.0004	0.21 ± 0.0005	1.03	Lovis and Mayor [39]	-4.992 ± 0.001
NGC6633No119	0.16 ± 0.0009	0.20 ± 0.0011	0.98	Lovis and Mayor [39]	-4.962 ± 0.003
NGC6633No126	0.14 ± 0.0010	0.18 ± 0.0012	1.03	Lovis and Mayor [39]	-5.067 ± 0.003
NGC6705No1090	0.14 ± 0.0032	0.18 ± 0.0038	1.57	Tautvaišienė et al. [60]	-5.812 ± 0.009
NGC6705No1101	0.17 ± 0.0013	0.21 ± 0.0016	1.44	Lovis and Mayor [39]	-5.518 ± 0.003
NGC6705No1111	0.13 ± 0.0023	0.16 ± 0.0028	1.42	Tautvaišienė et al. [60]	-5.608 ± 0.008
NGC6705No1117	0.11 ± 0.0018	0.14 ± 0.0022	1.44	Tautvaišienė et al. [60]	-5.692 ± 0.007
NGC6705No1145	0.22 ± 0.0023	0.27 ± 0.0027	1.45	Tautvaišienė et al. [60]	-5.440 ± 0.004
NGC6705No1184	0.19 ± 0.0020	0.23 ± 0.0024	1.60	Tautvaišienė et al. [60]	-5.760 ± 0.004
NGC6705No1248	0.12 ± 0.0019	0.16 ± 0.0023	1.46	Tautvaišienė et al. [60]	-5.682 ± 0.006
NGC6705No1256	0.15 ± 0.0023	0.19 ± 0.0028	1.73	Lovis and Mayor [39]	
NGC6705No1286	0.14 ± 0.0014	0.18 ± 0.0017	1.40	Tautvaišienė et al. [60]	-5.526 ± 0.004
NGC6705No136	0.06 ± 0.0028	0.08 ± 0.0033	1.50	Mermilliod et al. [46]	-6.066 ± 0.019
NGC6705No1364	0.24 ± 0.0014	0.29 ± 0.0017	1.21	Tautvaišienė et al. [60]	-5.042 ± 0.003
NGC6705No1423	0.10 ± 0.0015	0.12 ± 0.0018	1.63	Tautvaišienė et al. [60]	-6.081 ± 0.006
NGC6705No1446	0.10 ± 0.0037	0.13 ± 0.0044	1.47	Tautvaišienė et al. [60]	-5.790 ± 0.015
NGC6705No160	0.10 ± 0.0011	0.12 ± 0.0013	1.54	Tautvaišienė et al. [60]	-5.913 ± 0.004
NGC6705No1625	0.11 ± 0.0015	0.15 ± 0.0018	1.73	Lovis and Mayor [39]	
NGC6705No1658	0.14 ± 0.0009	0.17 ± 0.0011	1.48	Mermilliod et al. [46]	-5.681 ± 0.003
NGC6705No1837	0.20 ± 0.0018	0.25 ± 0.0021	1.42	Mermilliod et al. [46]	-5.421 ± 0.004
NGC6705No2000	0.10 ± 0.0013	0.13 ± 0.0015	1.59	Mermilliod et al. [46]	-5.982 ± 0.005
NGC6705No320	0.08 ± 0.0021	0.11 ± 0.0026	1.52	Høg et al. [32]	-5.940 ± 0.010
NGC6705No411	0.10 ± 0.0030	0.13 ± 0.0036	1.67	Tautvaišienė et al. [60]	-6.137 ± 0.012
NGC6705No660	0.11 ± 0.0031	0.14 ± 0.0037	1.49	Tautvaišienė et al. [60]	-5.781 ± 0.012
NGC6705No669	0.05 ± 0.0039	0.06 ± 0.0046	1.55	Tautvaišienė et al. [60]	-6.231 ± 0.032
NGC6705No686	0.13 ± 0.0033	0.17 ± 0.0040	1.48	Tautvaišienė et al. [60]	-5.685 ± 0.010
NGC6705No779	0.13 ± 0.0018	0.17 ± 0.0021	1.73	Lovis and Mayor [39]	
NGC6705No816	0.10 ± 0.0031	0.13 ± 0.0037	1.51	Tautvaišienė et al. [60]	-5.830 ± 0.012
NGC6705No827	0.11 ± 0.0029	0.14 ± 0.0035	1.50	Tautvaišienė et al. [60]	-5.802 ± 0.011
NGC6705No899	0.15 ± 0.0031	0.19 ± 0.0037	1.47	Tautvaišienė et al. [60]	-5.607 ± 0.008
NGC6705No916	0.12 ± 0.0018	0.16 ± 0.0021	1.48	Tautvaišienė et al. [60]	-5.719 ± 0.006
NGC6705No963	0.15 ± 0.0022	0.18 ± 0.0026	1.51	Tautvaišienė et al. [60]	-5.699 ± 0.006