

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Matheus de Lima Pinho

Construindo uma grade de alta resolução para estrelas de rápida rotação

São Paulo

2025

Matheus de Lima Pinho

Construindo uma grade de alta resolução para estrelas de rápida rotação

Tese/Dissertação apresentada ao Departamento
de Astronomia do Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universi-
dade de São Paulo como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em Astrono-
mia

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Alex Cavalieri Carciofi
(IAG-USP)

São Paulo

2025

Agradecimentos

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões, mesmo nas mais questionáveis possíveis. Ao meu pai, que, mesmo sem entender muito bem o que tenho feito nos últimos anos, nunca deixou de me ouvir.

Aos meus colegas de grupo de pesquisa, em especial ao Tajan, à Pam e à Clara, histórias para contar definitivamente não nos faltam. Ao meu orientador, Alex Carciofi, a quem já fiz passar por poucas e boas ao longo dessa jornada. Vocês não fazem ideia do quanto me ajudaram nesse caminho.

Agradeço também aos inúmeros professores que contribuíram para a minha formação ao longo dessa caminhada. Muitos deles talvez não imaginem o quanto me ensinaram - lições que foram muito além de livros e aulas, sendo, em vários momentos, verdadeiros conselheiros.

“No primeiro dia pensei em me matar. No segundo, em virar padre. No terceiro, em beber até cair. No quarto, pensei em escrever uma carta para Marcela. No quinto, comecei a pensar na Europa e no sexto comecei a sonhar com as noites em Lisboa. Em seis dias Deus fez o mundo e eu refiz o meu”

Machado de Assis

Resumo

O estudo de estrelas Be e Bn exige modelos capazes de representar com fidelidade os efeitos da rotação rápida, como o achatamento gravitacional, a redistribuição de temperatura na superfície e a presença de discos circunstelares. Neste trabalho, desenvolvemos uma nova grade fotosférica de alta resolução baseada em atmosferas calculadas com o código **TLUSTY** e simuladas com o **HDUST** em sua versão atualizada, a qual incorpora cálculos em NLTE e uma implementação mais realista de *limb darkening*. A grade resultante abrange 11 massas estelares, 7 idades na sequência principal, 10 valores da taxa de rotação e 10 inclinações, totalizando milhares de modelos capazes de representar de maneira consistente estrelas dos tipos B e Be.

A partir dessa grade, analisamos de forma sistemática, a resposta espectral às variações em cada um dos parâmetros, destacando o comportamento de linhas de hidrogênio, hélio e metais. Os resultados mostram que cada parâmetro produz assinaturas específicas no espectro, permitindo que seu impacto seja identificado individualmente. Para avaliar o desempenho da grade em observações reais, aplicamos o método à Achernar, uma das estrelas Be mais estudadas. Os modelos conseguem reproduzir adequadamente regiões como a linha do H α , embora discrepâncias persistam em algumas linhas metálicas, principalmente na profundidade das absorções.

Esses resultados revelam tanto a consistência física da nova grade quanto a necessidade de métodos estatísticos mais sofisticados para extração de parâmetros, como algoritmos MCMC capazes de lidar com covariâncias fortes. O trabalho, portanto, estabelece uma base sólida para futuras análises espectroscópicas de alta resolução e reforça o papel das grades sintéticas como ferramentas fundamentais no estudo da estrutura e evolução de estrelas de alta rotação.

Abstract

The study of Be and Bn stars requires models capable of accurately representing the effects of rapid rotation, such as gravitational darkening, stellar oblateness, surface temperature redistribution, and the possible presence of circumstellar disks. In this work, we develop a new high-resolution photospheric grid based on stellar atmospheres computed with the TLUSTY code and simulated with the updated version of HDUST, which now includes NLTE calculations and a more realistic implementation of limb darkening. The resulting grid spans 11 stellar masses, 7 main-sequence ages, 10 rotation rates, and 10 inclinations totaling thousands of models that consistently represent B and Be type stars.

Using this grid, we systematically analyze the spectral response to variations in mass, rotation, evolutionary stage, and inclination, highlighting the behavior of hydrogen, helium, and metal lines. The results show that each parameter produces distinct signatures in the spectrum, allowing their individual contributions to be identified. To assess the performance of the grid on real observations, we apply it to Achernar, one of the best-studied Be stars. The models successfully reproduce key regions such as H α , although discrepancies remain in some metallic lines, particularly in their absorption depths.

These findings demonstrate both the physical consistency of the new grid and the need for more sophisticated statistical methods for parameter inference, such as MCMC algorithms capable of handling strong covariances. This work therefore establishes a solid foundation for future high-resolution spectroscopic analyses and reinforces the role of synthetic model grids as essential tools in the study of the structure and evolution of rapidly rotating stars.

Lista de Figuras

3.1	Variação das linhas espectrais com a mudança de massa nos modelos sintéticos: (a) H α alcança seu auge em massas menores (por volta de $2 M_{\odot}$); (b) HeI atinge maior intensidade por volta de $9 M_{\odot}$; (c) O I apresenta ápice próximo de $2 M_{\odot}$ e desaparece em modelos de $20 M_{\odot}$	32
3.2	Variação das linhas espectrais com a mudança de W nos modelos sintéticos.	33
3.3	Variação da linha de He I (4026.2 Å) a medida que a estrela avança pela sequência principal.	34
3.4	Alteração no formato e profundidade de linhas próximos ao Fe II (5018.44 Å), ilustrando como observações no polo facilitam a obtenção de linhas mais definidas e profundas.	34
4.1	Ajuste do modelo do BeSS na região do H α , acompanhado de dois modelos interpolados.	36
4.2	Região do He I observada pelo FEROS, acompanhada de dois modelos inter- polados. Embora o formato seja razoavelmente reproduzido, a profundidade ainda apresenta discrepâncias.	37
4.3	Ajuste da linha Mg II (4481.13 Å). Assim como no caso do HeI, a inter- polação reproduz o formato geral, mas não a profundidade.	38
4.4	Ajuste da linha OI (7774.17 Å). Neste caso, os modelos não reproduzem adequadamente a linha.	38

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros estelares da grade fotosférica construída para o projeto.	26
3.1	Relação de linhas selecionadas e normalizadas para o estudo de seu comportamento com variações de parâmetros. Dois casos merecem atenção: (1) as linhas de carbono (6578.10 Å e 6582.9 Å), vizinhas de H α , não foram incluídas como linhas independentes por estarem dentro do próprio intervalo de H α ; (2) a linha de oxigênio listada pertence ao triplete (7771.94–7775.39 Å), sendo apresentada apenas como representante do conjunto.	29
4.1	Relação de valores obtidos para Achernar. As duas primeiras colunas foram extraídas de Rubio et al. (2023), enquanto a terceira reúne valores recentes. ★ A taxa de rotação apresentada foi retirada de Domiciano de Souza, A. et al. (2014).	36

Sumário

1.	<i>Introdução</i>	19
1.1	Estrelas massivas e o papel da rotação	20
1.2	Estrelas Be e Bn	20
1.3	Uso de grades sintéticas na análise estelar	21
2.	<i>Objetivos</i>	23
2.1	Estrutura do <i>BeAtlas</i>	23
2.2	Construindo uma grade de alta resolução	24
2.2.1	Fundamentação teórica	24
2.2.2	As mudanças estruturais na nova grade	25
3.	<i>Trabalhando com modelos sintéticos</i>	27
3.1	Um pouco de literatura	27
3.1.1	Muito além das linhas	28
3.2	Entendendo modelos	28
3.2.1	Variações de Massa	29
3.2.2	Variações de rotação	30
3.2.3	Variações com o tempo na sequência principal	30
3.2.4	Variações com a inclinação da estrela	30
4.	<i>Análise de espectros</i>	35
4.1	Análise do caso Achernar	35
4.1.1	Perspectivas futuras: em busca de um algoritmo robusto	37

5. Conclusões	41
Referências	43
<i>Apêndice</i>	47

Capítulo 1

Introdução

A rotação estelar constitui um dos parâmetros fundamentais na caracterização de estrelas, especialmente as mais massivas, influenciando diretamente sua estrutura interna, evolução e características observacionais. Historicamente, a incorporação da rotação em modelos evolutivos representou um avanço expressivo na astrofísica estelar, permitindo reproduzir com maior precisão propriedades observadas, como o enriquecimento químico superficial, as variações populacionais e a proporção entre supergigantes azuis e vermelhas (Ekström, 2008).

O fenômeno da alta rotação manifesta-se, em primeiro lugar, por meio de efeitos hidrostáticos. As forças centrífugas induzidas pelo movimento rotacional reduzem a gravidade efetiva de forma dependente da latitude, ocasionando desvios da esfericidade — isto é, a estrela torna-se ligeiramente oblata (Maeder e Meynet, 2000). Esse achatamento gera diferenças de temperatura e luminosidade entre o equador e os polos, fenômeno conhecido como **escurecimento gravitacional** (*gravity darkening*) (Jeans, 1925).

Um conceito central nesse contexto é o da **velocidade crítica** (ω_{crit}), correspondente à velocidade rotacional na qual a força centrífuga na região equatorial iguala a atração gravitacional local (Granada et al., 2013). Durante sua evolução, algumas estrelas podem atingir velocidades próximas ou até mesmo iguais a esse limite crítico, levando à ejeção de material superficial e à formação de uma estrutura circumestelar (Granada et al., 2013).

A rotação, entretanto, não se restringe a deformar a estrutura da estrela. Ela atua também como um mecanismo interno de **transporte de momento angular e mistura química**, redistribuindo elementos no interior estelar (Maeder e Meynet, 2000). Esse processo de mistura pode alterar significativamente a composição superficial, promovendo, por exemplo, o enriquecimento em hélio e outros produtos de fusão nuclear (Zeng, Y. R.,

2002), além de prolongar a permanência na sequência principal (Ekström, 2008).

Em síntese, a rotação elevada funciona como um **terceiro parâmetro essencial** — juntamente com a massa e a metalicidade —, determinando como a estrela interage com o meio interestelar, prolonga sua vida útil, modifica sua aparência e define seu destino evolutivo (Maeder e Meynet, 2000).

1.1 Estrelas massivas e o papel da rotação

Essa alta rotação pode desencadear **eventos de perda de massa** associados a efeitos tanto mecânicos quanto químicos. No caso particular das perdas mecânicas, a força centrífuga resultante da rotação reduz a gravidade efetiva nas regiões equatoriais, facilitando a ejeção de material superficial (Maeder e Meynet, 2000).

A matéria expelida pode permanecer em órbita, formando um disco aproximadamente kepleriano, ou em estrelas ainda mais massivas, como as de tipo O ser lançada preferencialmente pelos polos por ventos estelares anisotrópicos (Ekström, 2008). Esses processos têm implicações profundas na evolução e na aparência observável dessas estrelas, afetando desde a taxa de perda de massa até a distribuição superficial do fluxo emitido.

1.2 Estrelas Be e Bn

Entre os exemplos mais notáveis de estrelas de alta rotação encontram-se as **estrelas Be clássicas (CBe)**, variáveis do tipo espectral B caracterizadas pela presença de **linhas de emissão de hidrogênio**, em especial a linha H α , em seus espectros (Navarete et al., 2024). A rotação extremamente elevada dessas estrelas favorece a ejeção de material na região equatorial — onde a força gravitacional é mais fraca —, resultando na formação de **discos circunstelares** compostos por gás quente e ionizado (Carciofi et al., 2025).

Outro grupo de interesse é o das **estrelas Bn**, nas quais o “n” se refere à aparência “nebulosa” (*nebulous*) das linhas espetrais, causada pelo alargamento rotacional. Essas estrelas também giram rapidamente, mas, ao contrário das Be, não exibem linhas de Balmer em emissão (Cochetti et al., 2020). Apesar disso, há indícios de que algumas Bn possuem **discos circunstelares tênues**, cuja emissão pode ser demasiado fraca para ser detectada com técnicas espectroscópicas convencionais (Cochetti et al., 2020). Observações recentes têm revelado que a fronteira entre os grupos Be e Bn é difusa. Diversas estrelas inicialmente

classificadas como Bn foram posteriormente reclassificadas como Be após apresentarem componentes de emissão em H α ou perfis de absorção do tipo “shell”, indicando que o disco equatorial ainda estava em formação ou em estado de baixa emissão (Cochetti et al., 2020).

Entre os exemplos mais estudados estão **Regulus** (α Leo), uma estrela Bn, e **Acheronar** (α Eri), uma Be - ambas rotadoras extremamente rápidas e amplamente analisadas por diferentes técnicas observacionais, como interferometria e espectropolarimetria. Existem também objetos de caráter intermediário, como **Epsilon Sagittarii** (ϵ Sgr), que apresenta um disco fino e estável, sem variações temporais significativas (Bailey et al., 2024).

1.3 Uso de grades sintéticas na análise estelar

Devido à complexidade e diversidade das estrelas de alta rotação, o uso de modelos sintéticos tornaram-se uma ferramenta indispensável para a determinação de seus parâmetros fundamentais. Esses modelos são construídos com base em **códigos de transferência radiativa**, como o HDUST (Carciofi et al., 2017), que permitem simular de forma realista os efeitos tridimensionais da rotação, incluindo o achatamento gravitacional e o escurecimento gravitacional (Rubio et al., 2023). A incorporação desses efeitos é essencial, pois eles alteram significativamente os observáveis estelares, como o espectro, a fotometria e a distribuição de intensidade superficial.

Além disso, o uso de grades sintéticas proporciona vantagens estatísticas relevantes, permitindo o tratamento adequado das correlações entre parâmetros físicos, como temperatura efetiva, gravidade superficial e inclinação do eixo de rotação. Ignorar essas correlações — por exemplo, ao fixar determinados valores — pode levar à subestimação das incertezas e à obtenção de resultados sistematicamente enviesados (Rubio et al., 2023).

Estudos aplicados a aglomerados estelares mostraram que, em média, os modelos sintéticos oferecem ajustes mais consistentes para a **metalicidade** e a **idade** quando comparados a valores de referência obtidos por métodos independentes, como isócronas fotométricas e análises espectroscópicas detalhadas (Asad et al., 2025).

Capítulo 2

Objetivos

O estudo de estrelas Be e Bn exige modelos físicos capazes de reproduzir seus observáveis e suas particularidades estruturais, como o achatamento e o escurecimento gravitacional resultantes da alta rotação. Nesse contexto, surge o *BeAtlas*, uma **grade de modelos de transferência radiativa** composta por espectros sintéticos de estrelas dos tipos B e Be.

O *BeAtlas* foi concebido como uma ferramenta abrangente de análise multitécnica, integrando polarimetria, espectroscopia, fotometria e interferometria, de modo a permitir a **inferência de parâmetros físicos estelares** de forma consistente e eficiente Rubio et al. (2023).

2.1 Estrutura do *BeAtlas*

O *BeAtlas* é organizado em duas grades principais:

1. **Grade fotosférica**: reúne modelos de estrelas dos tipos A a O sem disco (ou inativas), aplicável também a estrelas Bn. Essa grade inclui desde objetos não rotantes até aqueles que giram próximo à velocidade crítica.
2. **Grade com disco**: composta por modelos de estrelas circundadas por discos descritos pelo modelo de *Disco Decrescente Viscoso* (VDD), atualmente reconhecido como o mais consistente do ponto de vista teórico (Rivinius et al., 2013).

A grade completa possui extensão significativa, com mais de **91.400 modelos** e cerca de **616.000 espectros sintéticos**, considerando dez ângulos de observação por modelo (Correia Mota, 2019). Esses modelos foram gerados com o código de transferência radiativa

HDUST, capaz de simular emissão polarizada e incorporar os efeitos de simetria, achatamento e **escurecimento gravitacional** característicos de estrelas em rotação.

Para assegurar consistência física, o *BeAtlas* é fundamentado nos modelos evolutivos rotacionais de Geneva, de modo que cada estrela é descrita por quatro parâmetros principais:

- Massa (M), em unidades solares;
- Taxa de rotação (W), definida como a razão entre a velocidade equatorial e a velocidade crítica ($v_{\text{rot}}/v_{\text{crit}}$);
- Idade fracionária (t/t_{MS}), dada pela razão entre a idade da estrela e sua vida útil na sequência principal;
- Metalicidade (Z/Z_{\odot}), parâmetro que, embora não analisado neste trabalho, já se mostrou influente em estudos recentes Figueiredo et al. (2025).

Essa parametrização reduz o número de parâmetros livres e associa cada modelo a um estágio evolutivo bem definido, tornando o *BeAtlas* uma base robusta para comparações com dados observacionais por meio de métodos bayesianos (como MCMC). Assim, análises que tradicionalmente demandariam semanas ou meses podem ser concluídas em poucas horas.

2.2 Construindo uma grade de alta resolução

2.2.1 Fundamentação teórica

O código HDUST requer, em sua formulação original, cinco parâmetros independentes para modelar a estrela central: massa (M), taxa de rotação (W), raio polar (R_{pole}), luminosidade (L), expoente de escurecimento gravitacional (β_{GD}) e metalicidade. A redução para quatro parâmetros decorre de dois fatores: (1) o expoente β_{GD} pode ser determinado como função de W pela prescrição de Espinosa Lara, F. e Rieutord, M. (2011); e (2) os modelos evolutivos de Geneva (Georgy, C. et al., 2013) fornecem relações diretas entre R_{pole} , L , M , W e t/t_{MS} .

Com isso, obtém-se um conjunto de parâmetros fisicamente consistente, alinhando modelagem atmosférica, evolução estelar e simulações radiativas.

2.2.2 As mudanças estruturais na nova grade

Atualizações recentes no HDUST permitiram o cálculo de populações atômicas em condições de Não Equilíbrio Termodinâmico Local (NLTE), fornecendo descrições mais realistas da formação e variabilidade das linhas espectrais. Essa melhoria motivou a criação de uma versão atualizada do *BeAtlas*, agora voltada para o estudo de espectros em alta resolução.

As análises de estrelas do tipo B dependem fortemente das linhas da série de Balmer, especialmente H α , cuja emissão é uma das assinaturas mais marcantes do fenômeno Be (Navarete et al., 2024). Embora versões anteriores da grade como a de 2021, baseada nos modelos atmosféricos de *Kurucz*, já incorporassem ajustes para representar essas linhas, a resolução espectral permanecia limitada e o foco concentrava-se apenas em populações com disco, restringindo sua aplicabilidade.

Neste trabalho, expandimos esse escopo. A nova grade proposta busca representar de forma abrangente as propriedades espectrais de estrelas do tipo B, com ou sem emissão. Para isso, empregamos o código *TLUSTY*, que calcula atmosferas estelares, em conjunto com o *Hdust* responsável por incluir os efeitos de rotação elevada e NLTE. O resultado é um conjunto de modelos mais coerente com o comportamento físico esperado dessas estrelas, sobretudo nas faixas de temperatura e gravidade típicas da sequência principal.

A grade também se beneficia de melhorias adicionais no HDUST, especialmente na implementação do **escurecimento de bordo** (*limb darkening*). Enquanto versões anteriores utilizavam coeficientes fixos para determinados valores do continuo, a nova implementação varia com frequência, permitindo descrever com maior precisão a variação angular da intensidade emergente e aprimorando o ajuste de perfis espectrais observados.

A nova grade foi construída a partir da combinação de 11 valores de massa estelar, 7 idades ao longo da sequência principal e 10 valores da taxa de rotação. A Tabela 2.1 apresenta os valores adotados para cada parâmetro, definidos de modo a cobrir um espaço de parâmetros suficientemente amplo para aplicações futuras. Um ponto particular merece destaque: alguns modelos ultrapassam ligeiramente o limite teórico da sequência principal. Isso ocorre devido ao prolongamento da vida estelar por efeitos de rotação, especialmente em estrelas massivas, onde a mistura interna transporta momento angular e repõe hidrogênio no núcleo (Limongi et al., 2025), aumentando a quantidade de combustível

Tabela 2.1 - Parâmetros estelares da grade fotosférica construída para o projeto.

Parâmetro	Grandeza	Intervalo	Valores
M	Massa (M_{\odot})	$1.7 - 20$	1.7, 2, 2.5, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 20
W	Taxa de rotação	$0.00 - 0.99$	0.00, 0.33, 0.47, 0.57, 0.66, 0.74, 0.81, 0.87, 0.93, 0.99
t_{ms}	Tempo na sequência principal	$0.00 - 1.25$	0.00, 0.20, 0.40, 0.65, 0.85, 1.00, 1.25
i	Inclinação	$90^{\circ} - 0^{\circ}$	90.00, 83.68, 77.29, 70.73, 63.90, 56.63, 47.93, 38.74, 27.13, 0.00

disponível e estendendo a fase de queima de hidrogênio¹ (Ekström, 2008).

¹ Vale destacar que esses modelos são uma extração dos modelos de evolução estelar usuais.

Capítulo 3

Trabalhando com modelos sintéticos

3.1 Um pouco de literatura

Analisar a qualidade ou a eficácia de um conjunto extenso de modelos que percorrem todo o espectro não é uma tarefa simples. Felizmente, não somos pioneiros no uso de linhas espectrais para obter informações sobre populações estelares. Assim, podemos recorrer brevemente à literatura para identificar linhas já destacadas como alvos de estudo promissores.

Começamos naturalmente pela série de Balmer (hidrogênio), em especial $H\alpha$, considerada a linha mais importante no estudo de estrelas CBe (Correia Mota, 2019). As linhas $H\beta$, $H\gamma$ e $H\delta$ também são amplamente utilizadas na modelagem espectroscópica de parâmetros estelares, conforme mostrado inclusive em versões anteriores da grade em Correia Mota (2019).

Além do hidrogênio, outros elementos também merecem atenção, como o hélio neutro (He I). Linhas como 4471 Å, 4026 Å e 6678 Å podem ser úteis para medir a largura equivalente dessas linhas (e, consequentemente, a rotação projetada). No entanto, sua sensibilidade diminui conforme a velocidade de rotação se aproxima da velocidade crítica ou na presença de sistemas binários (Townsend et al., 2004).

Avançando além do He I, encontramos algumas linhas metálicas. Embora geralmente fracas em estrelas B, elas podem ser sensíveis às variações nos parâmetros fundamentais (Shokry et al., 2018). Entre as mais relevantes destacam-se:

- **Mg II (4481 Å)** — amplamente utilizada para estimar $V \sin i$; sua largura equivalente aumenta em temperaturas menores (Townsend et al., 2004);
- **Si III (4552 Å)** — utilizada em análises NLTE e eficiente como indicador de

parâmetros estelares (Correia Mota, 2019);

- **Fe II (5169 Å)** — frequentemente usada na determinação de parâmetros fundamentais (Correia Mota, 2019).

Duas linhas particularmente interessantes são as do **C II (6578.1 Å e 6582.9 Å)**, localizadas muito próximas de H α . Elas podem contaminar análises, especialmente em estrelas de alta rotação. Por isso, em muitos estudos essas linhas são removidas antes da análise, como em Rubio et al. (2023). Felizmente, em modelos com rotação elevada, sua presença é prevista, eliminando a necessidade de removê-las.

3.1.1 Muito além das linhas

Ao fazer uma análise completa do espectro, podemos extrair informações de diversos outros aspectos, não à toa, versões anteriores do *BeAtlas* já apresentavam bons resultados apenas com o continuo. Podemos destacar alguns aspectos como a **Descontinuidade de Balmer**, sensível à $\log g$ e T_{eff} , e pode facilmente ser medida usando o Método BCD (Barbier-Chalonge-Divan) Cochetti et al. (2020). Além disso, em estrelas Be, pode aparecer uma Descontinuidade de Balmer Secundária (sBD), devido ao envelope gasoso ao redor da estrela, podendo estar em emissão ou absorção Shokry et al. (2018).

Regiões espectrais também são de particular interesse, a região do Ultravioleta (UV) serve como um grande diagnóstico fotosférico, sendo a região de maior emissão da estrela e tendo uma contaminação mínima do disco, ela é uma boa escolha para inferência de parâmetros estelares independente do disco (Correia Mota, 2019). O infravermelho (IR) por outro lado, apresenta alguns excessos (*IR Excess*) causados pela emissão do disco presente em estrelas Be (Correia Mota, 2019), essa região é naturalmente interessante no estudo de estruturas de disco, mas para o presente trabalho vamos evitá-la. A eficácia de regiões espectrais na inferência de parâmetros, não é algo novo, sendo testado por Correia Mota (2019) e Rubio et al. (2023), assim, focaremos em um primeiro momento exclusivamente nas linhas, e como elas podem nos ajudar na recuperação desses parâmetros.

3.2 Entendendo modelos

O primeiro passo para entender o impacto de cada parâmetro nas linhas foi normalizar as linhas listadas acima. Também incluímos algumas linhas estratégicas. A Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Relação de linhas selecionadas e normalizadas para o estudo de seu comportamento com variações de parâmetros. Dois casos merecem atenção: (1) as linhas de carbono (6578.10 Å e 6582.9 Å), vizinhas de H α , não foram incluídas como linhas independentes por estarem dentro do próprio intervalo de H α ; (2) a linha de oxigênio listada pertence ao triplete (7771.94–7775.39 Å), sendo apresentada apenas como representante do conjunto.

Linha	Comprimento de onda central (Å)
H	6562.80 (H α), 4861.33 (H β)
He I	4471.48, 6678.15, 5875.62, 4026.19
Mg II	4481.13
Si III	4552.62
Fe II	5169.03, 5018.44, 4552.62
C II	4267.00
N II	5001.13
O I	7774.17

apresenta o conjunto completo de linhas escolhidas.

Essas linhas foram normalizadas e avaliadas sob variações controladas dos modelos. Três parâmetros eram mantidos fixos enquanto um era variado, com o objetivo de compreender como cada grandeza afeta o comportamento das linhas.

3.2.1 Variações de Massa

A massa estelar está intimamente ligada ao tipo espectral, temperatura efetiva e raio (Navarete et al., 2024). Em estrelas de alta rotação, a mudança desses parâmetros altera toda a estrutura espectral devido ao achatamento rotacional e ao consequente escurecimento gravitacional. As linhas e a magnitude estelar são fortemente impactadas, refletindo a relação direta entre massa, raio e temperatura (Correia Mota, 2019).

A Figura 3.1 compara modelos sintéticos com três parâmetros fixos (t_{tms} , W , inclinação) e massas diferentes. No primeiro painel, observamos H α , cuja profundidade diminui à medida que o tipo espectral avança, atinge um máximo em torno de 2 M_\odot e um mínimo próximo de 20 M_\odot . O segundo painel exibe a linha He I (6678 Å), que atinge máximo por volta de 9 M_\odot , tornando-se promissora para o estudo de estrelas B intermediárias. O último painel mostra o triplete O I (7771–7775 Å), que apresenta intensidade máxima por volta de 2 M_\odot e se torna praticamente imperceptível em modelos de maior massa.

3.2.2 Variações de rotação

O parâmetro W é considerado a grandeza física mais relevante para descrever a rotação de estrelas Be e Bn (Rivinius et al., 2013), sendo definido como a razão entre a velocidade equatorial (v_{rot}) e a velocidade crítica (v_{crit}). Ele determina a deformação estelar e as condições da superfície equatorial, afetando diretamente a geometria, temperatura superficial e o escurecimento gravitacional (Rubio et al., 2023).

A Figura 3.2 mostra a variação de três linhas com W . H β apresenta linhas mais finas e profundas em modelos menos rotantes, reduz-se conforme a rotação aumenta. O duploto Mg II (e a linha vizinha He I) exibem comportamento semelhante. O último painel mostra as variações da linha de C II com o aumento de W .

3.2.3 Variações com o tempo na sequência principal

À medida que a estrela evolui ao longo da sequência principal, seu núcleo se contrai, enquanto as camadas externas se expandem. Isso altera seus parâmetros fundamentais e, como consequência, o espectro. Linhas de Balmer apresentam asas menos desenvolvidas, e mudanças também ocorrem no espectro contínuo (SED) (Baade et al., 2016).

A Figura 3.3 mostra como a evolução afeta a linha He I (4026 Å). Embora o formato geral da linha não mude drasticamente, pequenas variações surgem — em particular, um aprofundamento progressivo conforme a estrela avança pela sequência principal.

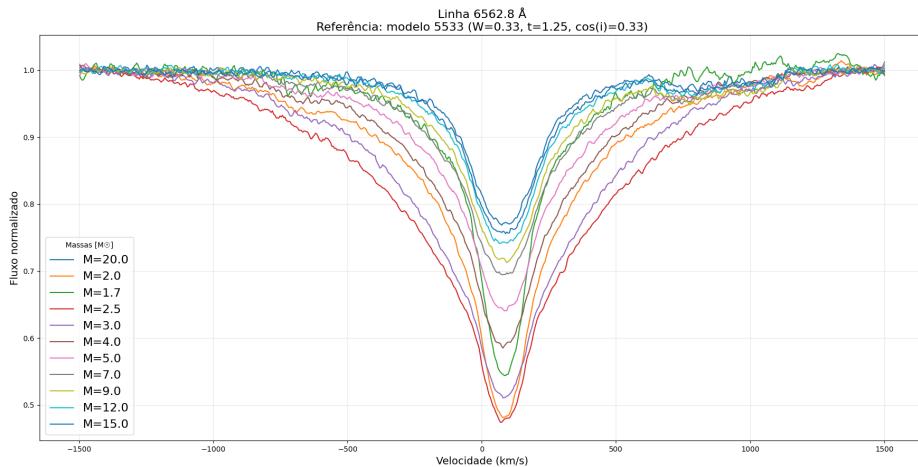
3.2.4 Variações com a inclinação da estrela

Embora a inclinação seja um parâmetro observacional, ela desempenha um papel fundamental no estudo de estrelas de alta rotação. Em modelos esféricos tradicionais, temperatura e gravidade superficial são uniformes. No entanto, em estrelas achatadas, a inclinação define qual região da superfície observamos: o polo (quente) ou o equador (frio) (Rímullo et al., 2018). Essa diferença resulta em propriedades espectrais distintas para um mesmo objeto.

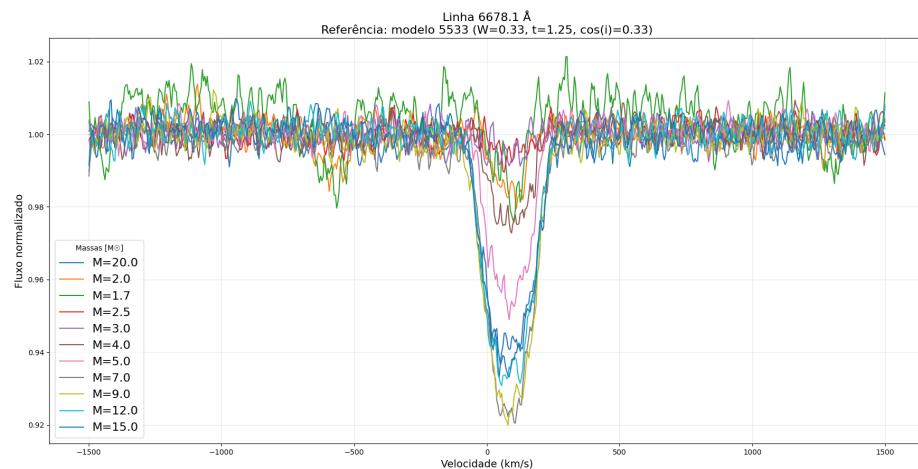
A Figura 3.4 mostra a linha Fe II (5018 Å). Para inclinações baixas (polo voltado ao observador), as linhas são mais profundas, finas e bem definidas. Em altas inclinações (equador visível), as linhas se tornam mais rasas e alargadas, dificultando a identificação.

Sintetizando os resultados, observamos que cada parâmetro fundamental afeta de ma-

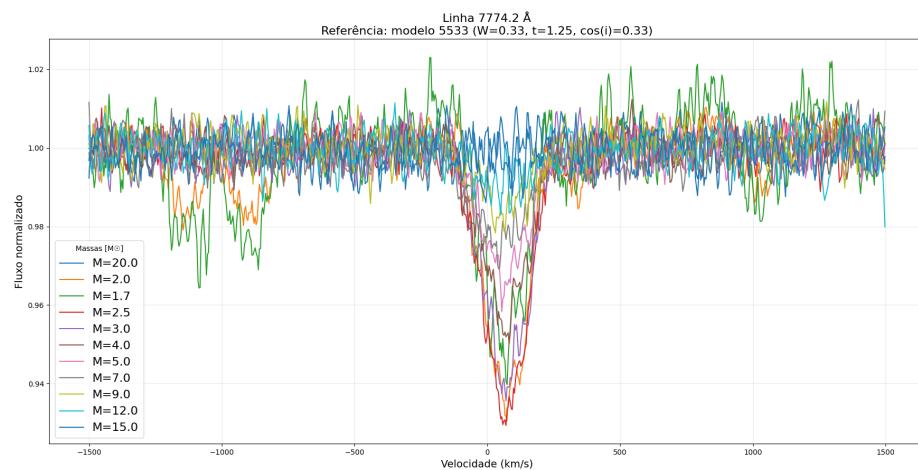
neira distinta as linhas e o espectro. Assim, uma compreensão profunda dessas correlações pode ser uma ferramenta poderosa para inferir propriedades físicas, mesmo em estrelas fortemente afetadas pela rotação rápida.



(a) Variação da profundidade da linha H α (6562.80 Å) com a massa.



(b) Variação da profundidade da linha He I (6678.15 Å) com a massa.



(c) Variação do triplet de O I (7771.94–7775.39 Å) com a massa.

Figura 3.1: Variação das linhas espectrais com a mudança de massa nos modelos sintéticos: (a) H α alcança seu auge em massas menores (por volta de $2 M_{\odot}$); (b) He I atinge maior intensidade por volta de $3 M_{\odot}$; (c) O I apresenta ápice próximo de $2 M_{\odot}$ e desaparece em modelos de $20 M_{\odot}$.

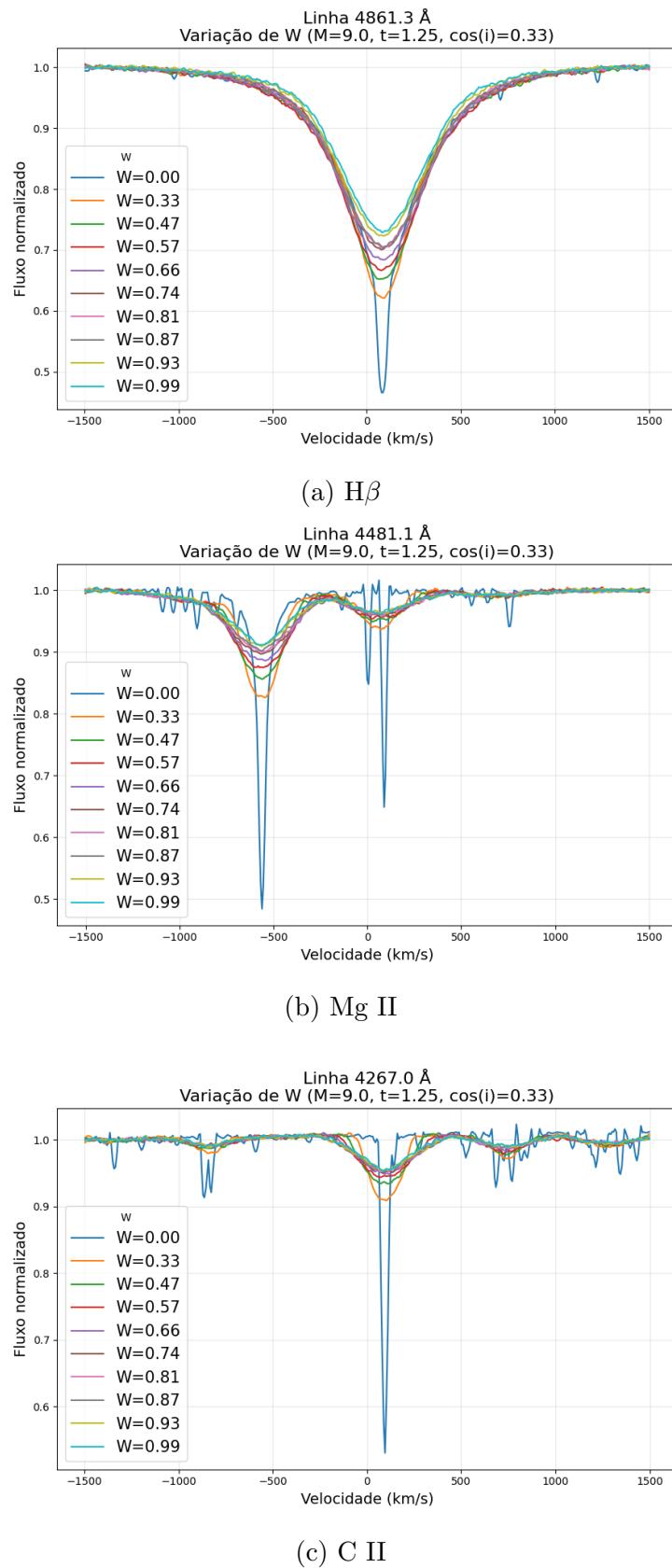


Figura 3.2: Variação das linhas espectrais com a mudança de W nos modelos sintéticos.

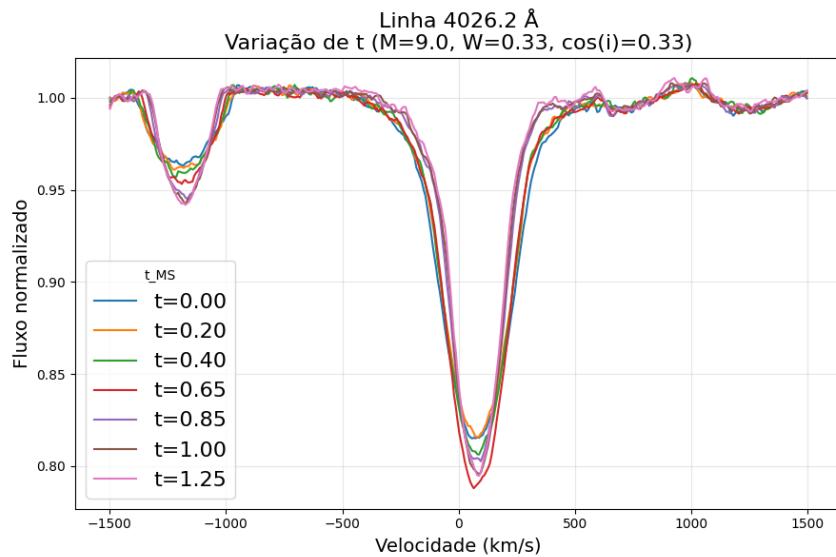


Figura 3.3: Variação da linha de He I (4026.2 Å) a medida que a estrela avança pela sequência principal.

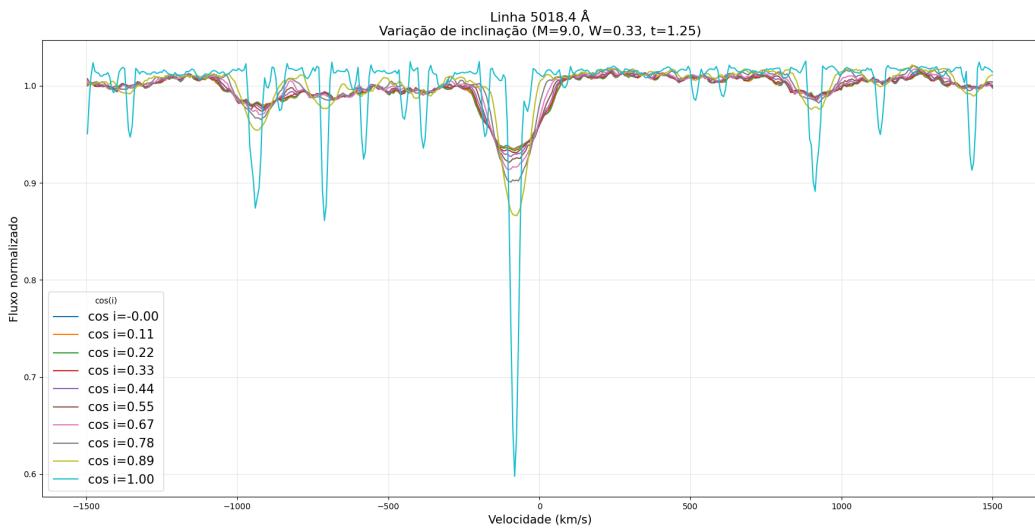


Figura 3.4: Alteração no formato e profundidade de linhas próximos ao Fe II (5018.44 Å), ilustrando como observações no polo facilitam a obtenção de linhas mais definidas e profundas.

Capítulo 4

Análise de espectros

A análise de modelos sintéticos oferece uma série de inferências possíveis apenas pela observação de como eles respondem a variações controladas em seus parâmetros. No entanto, tais modelos seriam de pouca utilidade se não pudesse ser comparados, ao menos de forma mínima, com observações reais. Assim, nada mais natural do que confrontar esses modelos com estrelas e sistemas bem conhecidos, a fim de avaliar sua capacidade preditiva.

4.1 Análise do caso Achernar

A estrela Achernar é particularmente interessante por ser uma das estrelas Be mais próximas da Terra. Conhecida por sua acentuada deformação, um reflexo direto de uma rotação próxima da velocidade crítica, e pela formação periódica de discos, Achernar constitui um alvo privilegiado para observações e estudos detalhados (Rivinius, Th. et al., 2013). Na literatura, encontram-se diversos conjuntos de parâmetros físicos obtidos por diferentes autores (Domiciano de Souza, A. et al., 2003), (Vinicius et al., 2006), (Rivinius et al., 2013), (Domiciano de Souza, A. et al. (2014), Kervella et al. (2022), Rubio et al. (2023)), o que reforça seu papel como excelente referência para avaliar a eficácia dos modelos utilizados. Por esse motivo, ela será também o principal objeto de análise neste capítulo.

Para este estudo, utilizamos um espectro obtido pelo **FEROS** em 2014 e disponibilizado por Kervella et al. (2022), e um espectro obtido pelo **BeSS** em 2024. Com base em parâmetros físicos já inferidos em trabalhos anteriores, investigamos, por meio de interpolações, se os espectros sintéticos são capazes de recuperar as propriedades de Achernar. Os parâmetros utilizados para interpolação podem ser vistos na Tabela 4.1

Tabela 4.1 - Relação de valores obtidos para Achernar. As duas primeiras colunas foram extraídas de Rubio et al. (2023), enquanto a terceira reúne valores recentes. * A taxa de rotação apresentada foi retirada de Domiciano de Souza, A. et al. (2014).

Parâmetro	UV+H α (Rubio et al., 2023)	Pesquisas em andamento
M (M_{\odot})	$6.20^{+0.05}_{-0.05}$	7.5
W	$0.78^{+0.02}_{-0.02}$	0.84*
t/t_{ms}	$1.24^{+0.02}_{-0.02}$	1.24
$i[^o]$	$65.35^{+2.79}_{-2.75}$	65.35

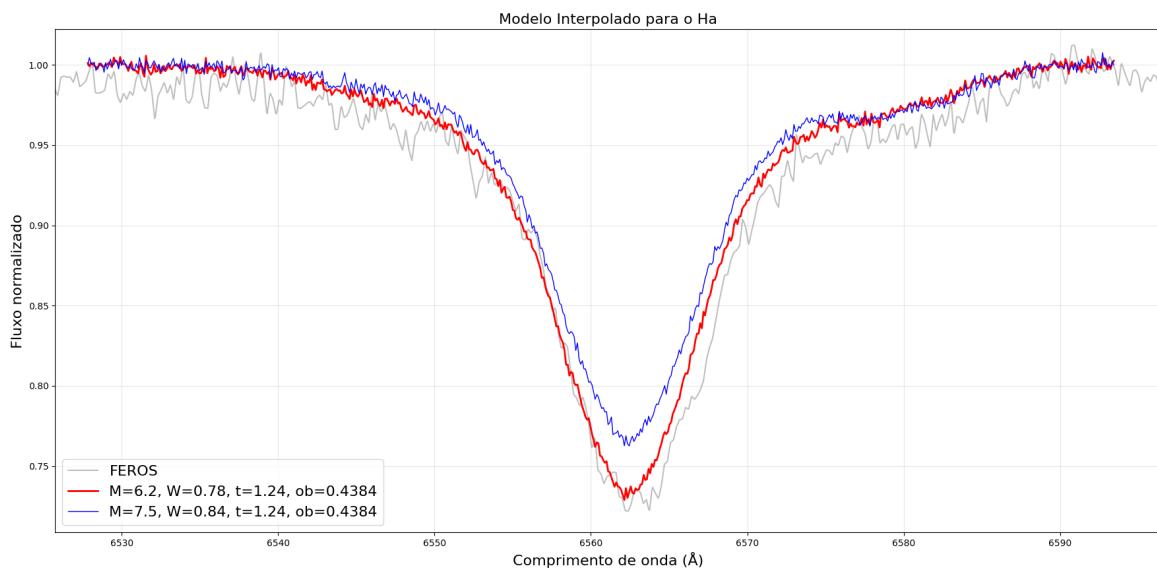


Figura 4.1: Ajuste do modelo do BeSS na região do H α , acompanhado de dois modelos interpolados.

Como ponto de partida, analisamos a linha H α , largamente utilizada em estudos anteriores e já incorporada em versões antigas do **BeAtlas**. A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos. Para esta análise específica, utilizamos espectros do BeSS, garantindo a escolha de um momento em que Achernar se encontrava sem disco, evitando, assim, contaminações. Observamos que a grade é capaz de fornecer bons ajustes para ambos os conjuntos de parâmetros; entretanto, os valores mais recentes tendem a reproduzir o espectro observado com maior precisão.

Passando a outras linhas, especialmente metálicas, cuja inclusão representa um dos principais avanços da nova grade, podemos começar analisando a linha He I (4471.48 Å). A Figura 4.2 mostra que, embora os modelos interpolados reproduzam o formato geral da linha, eles ainda não capturaram adequadamente sua profundidade. Como discutido

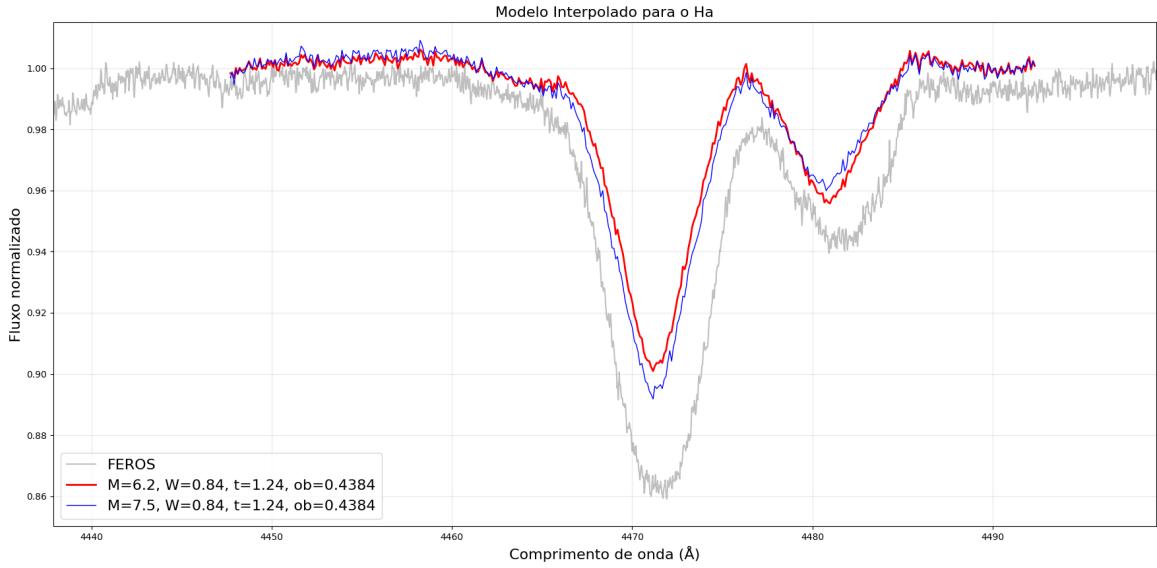


Figura 4.2: Região do He I observada pelo FEROS, acompanhada de dois modelos interpolados. Embora o formato seja razoavelmente reproduzido, a profundidade ainda apresenta discrepâncias.

no Capítulo 3, esse comportamento poderia ser corrigido mediante a redução da taxa de rotação, o que aumentaria a profundidade das linhas (ver Figura 3.2); porém, ajustar esse parâmetro implicaria descaracterizar uma das propriedades fundamentais de Achernar.

O mesmo comportamento se repete para outras linhas. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram dois casos envolvendo linhas metálicas. Na Figura 4.3, os modelos interpolados reproduzem bem o formato da linha Mg II (4481.13 \AA), mas falham novamente na profundidade. Já para a linha O I (7774.17 \AA), mostrada na Figura 4.4, os modelos não são capazes de reproduzir sua estrutura a partir dos parâmetros considerados. Tais inconsistências podem ser reflexo de uma baixa exploração da metalicidade nos modelos, considerando, em princípio uma metalicidade solar, eles se mostram capazes de reproduzir bem linhas de hidrogênio, mas apresentam discordâncias significativa em linhas metálicas.

4.1.1 Perspectivas futuras: em busca de um algoritmo robusto

As limitações observadas na reprodução das linhas não invalidam os modelos; ao contrário, apontam para a necessidade de métodos mais robustos de interpretação. Diversos fatores — desde fenômenos físicos, como a possível presença de um disco residual, até aspectos estatísticos, como o tratamento dos erros — podem impactar significativamente a comparação espectral.

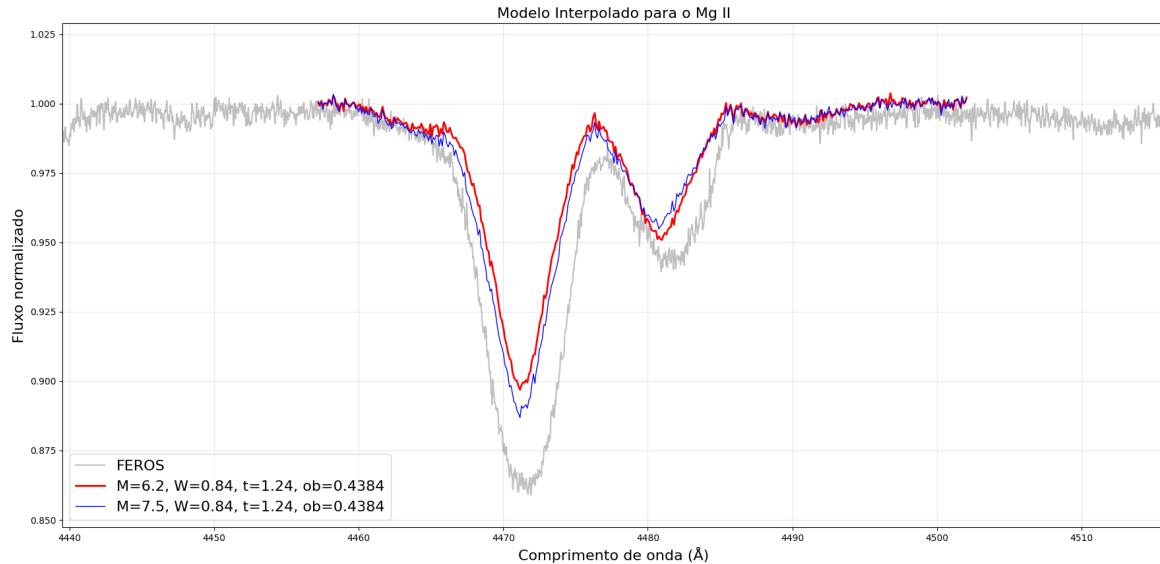


Figura 4.3: Ajuste da linha Mg II (4481.13 Å). Assim como no caso do He I, a interpolação reproduz o formato geral, mas não a profundidade.

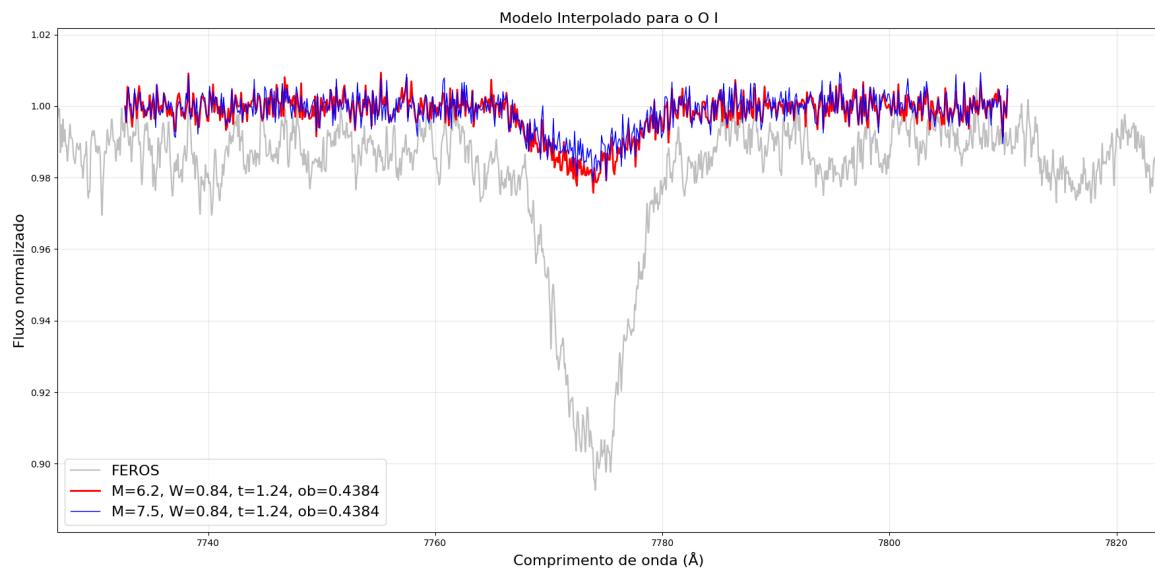


Figura 4.4: Ajuste da linha O I (7774.17 Å). Neste caso, os modelos não reproduzem adequadamente a linha.

Um passo natural após este primeiro ensaio é o desenvolvimento de técnicas de interpolação mais sofisticadas, incluindo algoritmos baseados no pacote `emcee`, que utiliza métodos de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) (Foreman-Mackey et al., 2013). Estes algoritmos são particularmente eficientes por sua invariância, apresentando bom desempenho mesmo diante de fortes covariâncias entre parâmetros. Assim, quando combinados com grades de modelos sintéticos como as utilizadas neste trabalho, tornam-se ferramentas poderosas para explorar o espaço de parâmetros de forma abrangente (Foreman-Mackey et al., 2013).

Embora rotinas desse tipo já tenham sido implementadas em versões anteriores do `BeAtlas`, novas adaptações e o acréscimo de variáveis será necessário para incorporar adequadamente as linhas de absorção agora disponíveis na grade.

Capítulo 5

Conclusões

O desenvolvimento e a análise conduzidos neste trabalho evidenciam o potencial das grades sintéticas de alta resolução como ferramentas robustas para o estudo de estrelas Be e Bn. A incorporação de atmosferas calculadas com o *TLUSTY*, aliada às atualizações recentes do *HDUST* - incluindo cálculos em NLTE, escurecimento gravitacional consistente e uma nova implementação de *limb darkening* - representa um avanço significativo em relação às versões anteriores do *BeAtlas*.

A construção da nova grade fotosférica permitiu explorar de forma sistemática como massa, rotação, evolução e inclinação afetam as principais linhas espectrais de estrelas do tipo B. As análises mostraram que cada parâmetro deixa assinaturas distintas e detectáveis no espectro, reforçando a importância de se considerar simultaneamente tais efeitos na inferência de propriedades físicas. A resposta individual das linhas, desde as variações de intensidade da série de Balmer até a sensibilidade de linhas metálicas como Mg II, Si III e O I, demonstra que uma abordagem multifreqüência e bem calibrada é essencial para o diagnóstico estelar.

A aplicação da grade ao caso de Achernar, uma estrela Be bem estudada e um excelente laboratório astrofísico, demonstrou que os modelos são capazes de reproduzir diversas regiões espectrais, especialmente o perfil de H α . No entanto, as discrepâncias observadas em linhas metálicas indicam que ainda há espaço para melhorias, seja na modelagem física, seja nas técnicas de interpolação e ajuste, além de uma exploração maior das variações causadas pela diferença de metalicidades na população de estudo. Esses resultados não invalidam a grade; ao contrário, ressaltam a necessidade de métodos estatísticos mais robustos que sejam capazes de lidar com covariâncias fortes entre parâmetros, além da possível inclusão de fenômenos adicionais, como discos residuais ou efeitos binários sutis.

Referências Bibliográficas

- Asad R., Coelho P. R. T., John J. M., Chilingarian I., Bruzual G., Charlot S., , 2025
Semi-empirical versus Theoretical Stellar Population Models: a comparison with Star Clusters
- Baade D., Rivinius, Th. Pigulski, A. Carciofi, A. C. Martayan, Ch. Moffat, A. F. J. Wade, G. A. Weiss, W. W. Grunhut, J. Handler, G. Kuschnig, R. Mehner, A. Pablo, H. Popowicz, A. Rucinski, S. Whittaker, G. Short-term variability and mass loss in Be stars - I. BRITE satellite photometry of η and μ Centauri, A&A, 2016, vol. 588, p. A56
- Bailey J., Lewis F., Howarth I. D., Cotton D. V., Marshall J. P., Kedziora-Chudczer L., ϵ Sagittarii: An Extreme Rapid Rotator with a Decretion Disk, ApJ, 2024, vol. 972, p. 103
- Carciofi A. C., Bjorkman J. E., Zsargó J., HDUST3 - A chemically realistic, 3-D, NLTE radiative transfer code. In The Lives and Death-Throes of Massive Stars , vol. 329 of IAU Symposium, 2017, p. 390
- Carciofi A. C., Bolzan G. P. P., Querido P. R., Rubio A. C., Labadie-Bartz J., de Amorim T. H., Fonseca Silva A. C., Schiavolin V. L., Mass Loss in Be Stars: News from Two Fronts, Galaxies, 2025, vol. 13, p. 77
- Cochetti Y. R., Zorec, J. Cidale, L. S. Arias, M. L. Aidelman, Y. Torres, A. F. Frémat, Y. Granada, A. Be and Bn stars: Balmer discontinuity and stellar-class relationship, A&A, 2020, vol. 634, p. A18

Correia Mota B., BeAtlas: A grid of synthetic spectra for Be stars - Bayesian inference of the physical properties of B and Be Stars, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019, Tese de Doutorado, 334 p.

Domiciano de Souza, A. Kervella, P. Jankov, S. Abe, L. Vakili, F. di Folco, E. Paresce, F. The spinning-top Be star Achernar from VLTI-VINCI, *A&A*, 2003, vol. 407, p. L47

Domiciano de Souza, A. Kervella, P. Moser Faes, D. Dalla Vedova, G. Mérand, A. Le Bouquin, J.-B. Espinosa Lara, F. Rieutord, M. Bendjoya, P. Carciofi, A. C. Hadjara, M. Millour, F. Vakili, F. The environment of the fast rotating star Achernar - III. Photospheric parameters revealed by the VLTI, *A&A*, 2014, vol. 569, p. A10

Ekström S., The Evolution of Fast Rotating Massive Stars at Low or Zero Metallicity, University of Geneva, Astronomical Observatory, 2008, Tese de Doutorado

Espinosa Lara, F. Rieutord, M. Gravity darkening in rotating stars, *A&A*, 2011, vol. 533, p. A43

Figueiredo A. L., Carciofi A. C., Labadie-Bartz J., Pinho M. L., de Amorim T. H., dos Santos P. T., Soszyński I., Udalski A., Be star demographics: a comprehensive study of thousands of lightcurves in the Magellanic Clouds, arXiv e-prints, 2025, p. arXiv:2505.08714

Foreman-Mackey D., Hogg D. W., Lang D., Goodman J., `emcee`: The MCMC Hammer, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, vol. 125, p. 306–312

Georgy, C. Ekström, S. Eggenberger, P. Meynet, G. Haemmerlé, L. Maeder, A. Granada, A. Groh, J. H. Hirschi, R. Mowlavi, N. Yusof, N. Charbonnel, C. Decressin, T. Barblan, F. Grids of stellar models with rotation - III. Models from 0.8 to $120 M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.002$, *A&A*, 2013, vol. 558, p. A103

Granada A., Ekström S., Georgy C., Krtička J., Owocki S., Meynet G., Maeder A., Populations of rotating stars. II. Rapid rotators and their link to Be-type stars, *A&A*, 2013, vol. 553, p. A25

Jeans J. H., On a theorem of von Zeipel on radiative equilibrium, *MNRAS*, 1925, vol. 85, p. 933

- Kervella P., Borgniet S., Domiciano de Souza A., Mérand A., Gallenne A., Rivinius T., Lacour S., Carciofi A., Faes D. M., Le Bouquin J.-B., Taormina M., Pilecki B., Berger J.-P., Bendjoya P., Klement R., Millour F., Janot-Pacheco E., Spang A., Vakili F., The binary system of the spinning-top Be star Achernar, *Astronomy & Astrophysics*, 2022, vol. 667, p. A111
- Limongi M., Roberti L., Falla A., Chieffi A., Nomoto K., , 2025 The chemical yields of stars in the range 9-15 Msun
- Maeder A., Meynet G., The Evolution of Rotating Stars, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2000, vol. 38, p. 143–190
- Navarete F., dos Santos P. T., Carciofi A. C., Figueiredo A. L., , 2024 On the Origin of Fast Rotating Stars. I. Photometric calibration and results of AO-assisted BVRI+Halpha imaging of NGC330 with SAMI/SOAR
- Rivinius T., Carciofi A. C., Martayan C., Classical Be stars: Rapidly rotating B stars with viscous Keplerian decretion disks, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2013, vol. 21
- Rivinius, Th. Baade, D. Townsend, R. H. D. Carciofi, A. C. Štefl, S. Variable rotational line broadening in the Be star Achernar, *A&A*, 2013, vol. 559, p. L4
- Rubio A. C., Carciofi A. C., Ticiani P., Mota B. C., Vieira R. G., Faes D. M., Genaro M., de Amorim T. H., Klement R., Araya I., Arcos C., Curé M., de Souza A. D., Georgy C., Jones C. E., Suffak M. W., Silva A. C. F., , 2023 Bayesian sampling with BeAtlas, a grid of synthetic Be star spectra I. Recovering the fundamental parameters of α Eri and β CMi
- Rímulo L. R., Carciofi A. C., Vieira R. G., Rivinius T., Faes D. M., Figueiredo A. L., Bjorkman J. E., Georgy C., Ghoreyshi M. R., Soszyński I., The life cycles of Be viscous decretion discs: fundamental disc parameters of 54 SMC Be stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, vol. 476, p. 3555
- Shokry A., Rivinius, Th. Mehner, A. Martayan, C. Hummel, W. Townsend, R. H. D. Mérand, A. Mota, B. Faes, D. M. Hamdy, M. A. Beheary, M. M. K Gadallah, K. A.

- Abo-Elazm, M. S. Stellar parameters of Be stars observed with X-shooter, A&A, 2018, vol. 609, p. A108
- Townsend R. H. D., Owocki S. P., Howarth I. D., Be-star rotation: how close to critical?, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, vol. 350, p. 189
- Vinicio M. M. F., Zorec J., Leister N. V., Levenhagen R. S., α Eridani: rotational distortion, stellar and circumstellar activity, A&A, 2006, vol. 446, p. 643
- Zeng, Y. R. A more powerful evolution model for rotating stars, A&A, 2002, vol. 394, p. 965

Apêndice

