



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

# A EVOLUÇÃO DA ROTAÇÃO ESTELAR NA VIZINHANÇA SOLAR

**Daniel Brito de Freitas**

Orientador: **Prof. Dr. José Renan de Medeiros**

Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE** em **FÍSICA**.

Natal, Setembro de 2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

---

**Para Pessoas Especiais:**

---

Minha esposa Nara, Minha mãe,  
meu irmão Darkson, minha afilhada Joyce  
e meus amigos Jean, Marcos e Elton.

**Valeu Boi!!!**  
(Anônimo)

# Agradecimentos

Meus agradecimentos vão em primeiro lugar à uma pessoa que mora no meu coração, minha esposa Nara. Sua presença em minha vida, além de me forlatacer como pessoa, transformou meu modo de pensar. Com sua generosidade e uma virtude extraordinária de conduzir qualquer problema, me ensinou mais sobre ciência e vida que o maior *best-seller*. Esta dissertação de mestrado é uma obra que leva em conta o lado racional do conceito e da especulação, assim como, o lado emocional, derivado do apoio e amor desta pessoa que nunca duvidou que nossos objetivos pudessem ser alcançados. Outra pessoa de muita garra e perseverança, na qual dedico esta dissertação, é minha mãe, que sempre lutou pelos filhos, em todos os momentos, difíceis e alegres. Antes tinha dúvidas sobre a existência de um Ente Superior, mas através do amor destas mulheres vejo que não é possível que o bem, a dedicação e o amor, sejam obras do acaso, seriam necessárias infinitas interações, além do próprio Universo, para que ele pudesse compilar tal sentimento. Certas coisas no Universo podem ser equacionadas, analisadas, mas outras, apenas contempladas.

Dedico esta dissertação ao meu orientador Prof. Dr. José Renan de Medeiros, não somente por me aceitar no grupo, mas por confiar na minha

pessoa e no meu trabalho. Acredito que uma boa orientação se faz com um orientador a frente de seu próprio tempo, alguém que consegue equilibrar a ambição racional e o desejo emocional, tal virtude só compete à aqueles que ignoram o óbvio, o sensível, em lugar do vir-à-ser. Dedico também ao Prof. Dr. José Dias do Nascimento Jr. pelas discussões sobre os fundamentos da Astrofísica.

Dedico esta dissertação ao meu irmão Darkson pelas longas conversas sobre Filosofia, Teologia, Ciência e Vida, afirmando sempre que a ciência não se faz apenas por ela própria. Dedico aos meus amigos do peito, em ordem alfabética, para não se irritarem comigo, Elton Gomes, Jean Maia e Marcos Geiser, pelos momentos maravilhosos que tivemos como amigos (e os que virão!), onde mesmo me provocando para jogar vôleibol, entendiam quando eu não podia me apoiando e insentivando. Aos meus professores da UFC, Newton Theófilo, Raimundo Nogueira da Costa Filho, Eloneid Felipe Nobre e Cleuton Freire, assim como, aos professores da UFRN, Joel, Luciano e Fernando Nobre.

Dedico esta dissertação aos meus amigos de pós-graduação, em primeiro lugar, ao nome de Luís P. de Souza Neto pela troca de idéias e profundo apoio quando mais necessitei, aos amigos do grupo, Bruno Canto Martins, Izan Leão e Saulo Carneiro, pelo carisma, apoio e amizade que traçamos ao longo desta jornada. Aos meus amigos Isaías, Gabriel Mendes, Thatyara, Edcarlos, Xiquinho, Josenildo, Pedro, Hydalin, Rodrigo, Bernadino e Pepeu, pelas conversas descontraídas ao longo do mestrado.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

# Resumo

Diferentes estudos apontam para uma conexão rotação–idade seguindo uma relação do tipo:  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^\alpha$ . O valor do parâmetro  $\alpha$  tem um forte papel no comportamento evolucionário da rotação, porque indica quão forte é a desaceleração uma vez que as estrelas evoluem. A bem conhecida relação de Skumanich  $v_{rot} \propto t^{-1/2}$ , a qual é consistente com teorias simples de perda de momentum angular de estrelas em rotação com campos magnéticos e ventos, é uma das mais bem aceitas. No entanto, vários estudos mostram claramente que tal relação não pode ser válida para estrelas muito mais jovens ou muito mais velhas do que as Pleiades (100 Mega–anos) sem conduzir à velocidades muito maiores ou muito menores do que aquelas atualmente observadas. O presente estudo visa melhorar este quadro a partir de uma sólida análise levando em conta o papel da massa e da metalicidade na relação rotação–idade, com base em uma amostra, sem precedentes, de aproximadamente 14 000 estrelas da vizinhança solar. A partir deste novo enfoque mostramos que o parâmetro  $\alpha$  depende fortemente da idade estelar e, por consequência, da metalicidade. Além disso, observa-se uma forte dependência do referido parâmetro sobre o *status* binárias ou simples das estrelas.

# Abstract

Different studies point for an rotation–age link following a  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^\alpha$  relationship. The value of the  $\alpha$ –parameter has a strong role on the evolutionary behaviour of rotation, because it indicates how strong is the spindown once stars evolve. The well known Skumanich’s relation  $v_{rot} \propto t^{-1/2}$ , which is consistent with simple theories of angular momentum loss from rotating stars with magnetic fields and winds, is one of the best accepted. Nevertheless, several studies show clearly that such a relation cannot hold for stars much younger or much older than the Pleiades (100 Myr) without leading to velocities much greater or much lower than those presently observed. The present study aims at improving this picture on the basis of an enlarged analyses taking into account the role of mass and metallicity on the rotation–age relation, based on an unprecedented sample of about 14 000 stars in the solar neighbourhood. From this new approach we show that the  $\alpha$ –parameter it depends strongly on the stellar age and, by consequence, on the metallicity. In addition, one observes a strong dependence of the referred parameter on the single or binary status of the stars.

# Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 A Rotação do Sol . . . . .	4
1.2 Rotação como um parâmetro canônico . . . . .	7
1.2.1 A rotação de um corpo rígido ou deformado . . . . .	10
1.3 Objetivos deste trabalho . . . . .	12
1.4 Plano de trabalho . . . . .	12
<b>2 A FÍSICA DA RELAÇÃO ROTAÇÃO–IDADE</b>	<b>14</b>
2.1 Um caminho teórico para a Lei de Skumanich . . . . .	15
2.1.1 O fator de desaceleração generalizado . . . . .	15
2.1.2 O decaimento $t^{-1/2}$ . . . . .	18
<b>3 OS DADOS OBSERVACIONAIS</b>	<b>26</b>
3.1 Trabalhando a amostra . . . . .	26
3.1.1 A completeza da amostra em magnitude . . . . .	27

3.1.2	Parâmetros estelares estudados na amostra . . . . .	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>36</b>
4.1	Conexão Rotação–Idade em estrelas simples e binárias . . .	36
4.1.1	Tratamento estatístico das distribuições da rotação em função da idade . . . . .	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b>	<b>47</b>
5.1	Conclusões . . . . .	47
5.2	Perspectivas . . . . .	51
<b>A</b>	<b>Extrato do Catálogo de <i>Geneva–Copenhagen</i></b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>

# Lista de Figuras

- 1.1 Frequência angular  $\Omega/2\pi$  em função do raio solar para cinco diferentes latitudes:  $0^\circ$  (equador),  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . A envoltória convectiva (à direita da linha pontilhada) segue a rotação diferencial, entretando a envoltória radiativa (à esquerda da linha pontilhada) segue aproximadamente a rotação de um corpo rígido. Cortesia do National Solar Observatory.  $\Omega/2\pi$  é medido em nHz (nanohertz). . . . . 8
- 1.2 O gráfico representa a estrutura das envoltórias convectiva e radiativa para estrelas com massa entre  $0.2M_\odot$  e  $7.0M_\odot$ . Da esquerda para a direita temos:  $7M_\odot$ ,  $3.5M_\odot$ ,  $1M_\odot$ ,  $0.8M_\odot$ ,  $0.5M_\odot$  e  $0.2M_\odot$ . Observa-se que ocorre uma inversão entre as envoltórias convectiva e radiativa relativo as estrelas massivas e de baixa massa. . . . . 9
- 2.1 Fator de desaceleração como função da idade (escala arbitrária) para os primeiros termos da série representada pela Eq. (2.2). A lei de Skumanich expressa uma aproximação de quarta ordem na série. O decaimento linear expressa a desaceleração devido a própria evolução da estrela. . . . . 18

2.2	Distribuição de velocidade rotacional $v \sin i$ para uma gama de valores de $x_3$ (escala arbitrária). A distribuição maxwelliana está representada pela curva (—o—). As demais curvas mostram o efeito do tempo sobre a distribuição. A linha vertical (— — —) denota a distribuição de velocidade rotacional para um tempo $t \rightarrow \infty$ . . . . .	25
3.1	<b>a — d.</b> Função integral da magnitude visual aparente para estrelas: (a) binárias do tipo espectral F, (b) do tipo G, (c) simples do tipo F e (d) do tipo G. . . . .	28
3.2	<b>a — b.</b> Função integral da magnitude visual aparente para estrelas (a) binárias e (b) simples, independente do tipo espectral. . . . .	29
3.3	A distribuição cumulativa de $v \sin i$ para estrelas binárias (linha tracejada) e simples (linha contínua), onde é mostrado o percentual de semelhança entre as distribuições determinada pelo teste K–S. A probabilidade de que as duas distribuições sejam diferentes é $D \sim 0.13\%$ e a probabilidade de que as distribuições sejam iguais é $P \sim 96\%$ . A figura mostra que a maioria das estrelas da amostra possui $v \sin i < 20$ km/s. . . . .	31
3.4	Histograma da idade de todas as estrelas da amostra. . . .	33
3.5	Histograma da massa de todas as estrelas da amostra. . . .	34
3.6	Histograma da metalicidade de todas as estrelas da amostra. . . .	35

4.1	Velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ por intervalo de idade. Estrelas simples são representadas por círculos e estrelas binárias por quadrados. O número de estrelas usadas para estimar a velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ é dado na Tabela (4.1). As barras apresentadas na figura não são barras de erro, mas uma distribuição pico à pico dos valores de $v \sin i$ em cada intervalo de idade. . . . .	39
4.2	A distribuição da velocidade rotacional $\langle v \sin i \rangle$ por intervalo de idade, para diferentes faixas de massa: (a) painel das estrelas binárias (b) para estrelas simples. . . . .	43
4.3	A velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ por intervalo de idade para estrelas com massa $M=(1\pm 0.25)M_{\odot}$ . As estrelas simples são representadas pelos círculos sólidos e as estrelas binárias pelos quadrados abertos. . . . .	44
4.4	A velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ por intervalo de idade para estrelas com massa $M=(1\pm 0.1)M_{\odot}$ . As estrelas simples são representadas pelos círculos e as estrelas binárias pelos quadrados. . . . .	45

# Lista de Tabelas

4.1	Número de estrelas por intervalo de idade usado para estimar $\langle v \sin i \rangle$ presente na Fig. 4.1. . . . . .	37
4.2	Número de estrelas por intervalo de idade usado na estimativa de $\langle v \sin i \rangle$ presente na Fig. 4.2. (i) $0.75 < M (M_{\odot}) \leq 1.25$ , (ii) $1.25 < M (M_{\odot}) \leq 1.50$ e (iii) $M (M_{\odot}) > 1.50$ .	38
4.3	Número de estrelas por intervalo de idade usadas para estimar $\langle v \sin i \rangle$ presentes na Fig. 4.3. . . . . .	38
4.4	Na tabela, LS se refere a curva da Lei de Skumanich e LB a da Lei de Barry. $P$ representa a probabilidade que as distribuições sejam iguais. . . . . .	46
A.1	Extrato contendo <b>Estrelas Binárias</b> da nossa amostra e seus respectivos parâmetros. . . . . .	54
A.2	Extrato contendo <b>Estrelas Simples</b> da nossa amostra e seus respectivos parâmetros. . . . . .	55

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Apresentamos aqui uma breve síntese dos trabalhos que marcaram o estudo da evolução da rotação estelar, que foram objetos de motivação e, principalmente, que serviram de base teórica para esta dissertação. Tais trabalhos apontam para questões referentes aos mecanismos que controlam a evolução da rotação, que serão objetos de análise na Seção 1.2 e no Capítulo 2.

O estudo da relação rotação–idade estelar é um tópico de fundamental importância na astrofísica, que ainda necessita firmar respostas para um grande número de questões. A literatura sobre esse assunto é vasta, mas ainda não conhecemos totalmente como a rotação evolui com a idade, em particular, como é a dependência da relação rotação–idade sobre a massa estelar. Ao longo dos últimos 30 anos, diferentes estudos têm mostrado que a atividade cromosférica é influenciada pela rotação na presença de uma envoltória convectiva, mas não temos o real conhecimento de como a cromosfera estelar é aquecida e qual é a relação precisa entre a presença da cromosfera e a rotação (ver: Pasquini et al., 2000; Pace e Pasquini, 2004).

Uma das mais importantes propriedades da rotação estelar foi proposta por Struve (1945) ao considerar que os eixos de rotação estão distribuídos de forma aleatória. Chandrasekhar e Münch (1950) baseados em tal proposição sugeriram duas equações integrais para descrever a distribuição das velocidades rotacionais verdadeiras ( $f(x = v)$ )<sup>1</sup> e projetadas ( $\phi(y = v \sin i)$ )<sup>2</sup>, com o objetivo de fornecer uma ferramenta eficaz para analisar as funções de distribuição observadas, as quais possibilitariam passar do momento observado para o momento verdadeiro. A complexidade da Eq. (1.1), devido a derivada parcial, gera um erro razoavelmente grande depois de integrada, fazendo com que muitos autores admitam  $f(x = v)$  como uma função maxwelliana. Deste modo, a média, o desvio quadrático médio e a função  $f(x = v)$  podem ser derivadas dos momentos da distribuição  $\phi(y)$  de acordo com a média  $\langle v \sin i \rangle$ .

Schatzman (1962) fez um importante estudo sobre o papel da rotação na atividade magnética estelar. Este autor mostrou que a atividade magnética em uma estrela com rotação para cada região do diagrama–HR depende da profundidade da envoltória convectiva.

Os trabalhos de Su–Shu Huang (1965, 1967) utilizando as funções de distribuição de Chandrasekhar e Münch (1950) analisaram o comportamento da rotação para estrelas da sequência principal focalizando as consequências concernentes à perda de momentum angular devido a presença

---

1

$$f(x) = -\frac{2}{\pi} x^2 \frac{\partial}{\partial x} x \int_x^\infty \frac{\phi(y) dy}{y^2 (y^2 - x^2)^{1/2}}. \quad (1.1)$$

2

$$\phi(y) = y \int_y^\infty \frac{f(x) dx}{x (x^2 - y^2)^{1/2}}. \quad (1.2)$$

A Eq. (1.1) é conhecida como a solução da equação de Abel (1.2).

de planetas. Tais estudos, propiciaram uma descrição estatística das distribuições de  $v \sin i$  para diferentes tipos espectrais, mostrando que o mecanismo de desaceleração, que é uma função da idade da estrela, tem um comportamento que muda de perfil com o tipo espectral. Este autor considerou que a taxa de perda de momentum angular poderia ser descrita com uma lei de potência<sup>3</sup>:

$$\frac{dx}{dt} = - \sum a_j x^j, \quad (1.3)$$

onde na verdade  $x$  denota qualquer grandeza física que não se conserva.

Skumanich (1972), em seu trabalho pioneiro, mostrou que medidas de rotação e atividade para as Hyades e Pleiades efetuadas por Kraft (1967), juntamente com a rotação solar, eram consistentes com a relação  $v_{rot} \propto t^{-1/2}$ . Esta relação é consistente com teorias simples de perda de momentum angular em que o vento ionizado é acoplado à estrela pelo campo magnético (ver: Schatzman, 1962). Soderblom (1983), Barry et al. (1987) e Soderblom et al. (1991) encontraram resultados qualitativos similares para estrelas do tipo-solar, mas com leis de potência apresentando expoentes que estendem-se de -1/2 (correspondendo à relação de Skumanich) à -4/3. Entretanto, mais recentemente, Pace e Pasquini (2004) afirmaram que essas leis de potência não produzem o perfil da curva relacionada à rotação-atividade-idade de estrelas anãs com tipo espectral F em aglomerados abertos. De acordo com esses autores uma lei do tipo  $0.5t^{-5/2} + 0.5$ , é mais consistente com os dados observacionais obtidos. Apesar das relações

---

<sup>3</sup>Onde os  $a'_j$ s são parâmetros independentes de  $x$ , podendo ser função do tempo. Fica a cargo da determinação do fator de desaceleração  $x_j$  o perfil da distribuição, que tem como objetivo deformar a distribuição maxwelliana.

rotação–atividade–idade possuem discrepâncias, o volume de dados sugere enormemente que esta relação é de fato determinística e não apenas um artefato estatístico.

Entretanto, muitas questões sobre a relação entre rotação e idade permanecem em aberto. Algumas dessas: Como a relação rotação–idade depende da massa? Esta é uma relação única ou é dependente da massa e evolução da rotação? A rotação do Sol é típica para sua massa e idade? Por exemplo, Pace e Pasquini (2004) encontraram que a rotação permanece quase constante para estrelas de  $1M_{\odot}$  ao longo de sua evolução. Em contraste, diferentes trabalhos apontam uma descontinuidade na rotação para estrelas imediatamente mais massivas ao longo do diagrama–HR (ver De Medeiros et al. 2002).

Tais trabalhos pioneiros na investigação da conexão da rotação–idade serviram de base para fundamentar o corpo desta dissertação.

## 1.1 A Rotação do Sol

Vários estudos recentes têm sugeridos que o Sol pode ser uma estrela anormal comparada à estrelas similares na vizinhança solar. Por exemplo, Hardorp (1978) argumenta que espectroscopicamente o Sol é comparável à uma anã do tipo G5, não do tipo G2, embora Garrison (1980) discorde. Smith (1979) encontrou que o Sol gira distintamente mais lento que outras estrelas de  $1M_{\odot}$  de idade similar. É improvável que somente planetas sejam responsáveis pela rotação lenta do Sol por consumir a maioria do momento angular do proto–sol, mas se fosse encontrado que o Sol tem velocidade

rotacional baixa para sua massa e idade seria difícil evitar conjecturas que planetas são raros entre estrelas na vizinhança solar (ver Soderblom, 1983).

Soderblom (1983) questiona se o Sol é uma estrela de rotação lenta. O Sol pode agora ser comparado à outras estrelas de duas maneiras. Primeiro, o Sol ocupa na relação  $t^{-1/2}$  posição equivalente à sua idade? Comparado ao  $\langle v_{rot} \rangle$  neste caso, a velocidade média do Sol está por um fator  $\frac{\pi}{4}=0.79$  abaixo da média. Segundo, o Sol pode também ser comparado à um subconjunto de estrelas semelhantes a ele (considerando metalicidade  $[Fe/H]$ , abundância do Li,  $\log T_{ef}$ , e emissão de CaII). Este subconjunto inclui HR 483, 104 Tau,  $\lambda$  Aur, 20 LMi, HR 4098, 47 UMa,  $\beta$  CVn, HR 5384,  $\lambda$  Ser,  $\rho$  CrB, 18 Sco, dentre outras. Para essas estrelas,  $v_{\odot}/\langle v \rangle=0.76$  e  $v_{\odot}/v_{rms}=0.74$ . Todas essas frações estão dentro de  $1\sigma$  (desvio padrão) da média para a idade do Sol. A velocidade média das estrelas comparadas pode ser ligeiramente mais elevada porque o processo de determinação de  $v \sin i$  tende à reproduzir resultados que estão acima ou próximo do limite de detecção. Isto é ilustrado através de baixos valores de  $v \sin i$  obtidos pela observação com melhor resolução espectral. Segundo Soderblom (1983) não existe evidência que a rotação do Sol seja lentamente anormal. Esta conclusão difere do argumento de Smith (1979) porque na amostra de Soderblom as estrelas mais quentes com  $\log T_{ef} > 3.780$  ( $\sim 6000K$ , correspondente à temperatura na superfície do Sol) são excluídas.

O Sol possui rotação diferencial, isto é, a frequência angular solar varia com a latitude e o raio. A rotação diferencial é particularmente gerada na envoltória convectiva onde a região equatorial tem rotação aproximadamente 30% mais rápida do que as regiões na vizinhança polar. Existem

também fortes variações da frequência angular com o raio da superfície à região mais profunda da envoltória convectiva. Em contraste com a envoltória convectiva, a envoltória radiativa gira quase que uniformemente, entretanto a frequência angular do núcleo solar ainda é uma incógnita. Os mecanismos da rotação diferencial, que são provavelmente devidos à interação entre convecção e rotação, não são totalmente compreendidos. Acredita-se que a rotação diferencial tenha um papel determinante no mecanismo do dínamo e, portanto na atividade magnética solar. A frequência angular típica no equador do Sol é aproximadamente  $460 \text{ nHz}^4$  ( $2.89 \mu\text{rad/s}$  ou  $14.31 \text{ }^\circ/\text{dia}$ ), correspondendo à uma velocidade rotacional de  $2.012 \text{ km/s}$ .

Pizzo et al. (1983) analisaram os dados do Satélite *Helios*, de onde derivaram uma taxa de perda de momentum angular para o Sol de  $2 \cdot 10^{29}$  dina cm/sr. A taxa de perda de momentum angular total depende da latitude e da área onde ocorre o fenômeno. Se a taxa ocorre acima de  $\pm 15^\circ$  da latitude solar, aproximadamente  $3.5 \times 10^9$  anos serão necessários para o Sol dissipar 10% de seu momentum angular corrente. Esta escala de tempo decresce se o torque agir sobre uma área maior. Priest e Pneuman (1974) argumentaram que a verdadeira escala de tempo é muito maior que esta, porque a desaceleração ocorre somente sobre uma área relativamente pequena em altas latitudes ( $0^\circ$  corresponde ao equador solar). Somente áreas com linhas de campo abertas podem contribuir para a desaceleração rotacional. As áreas vizinhas ao equador tendem à ser regiões com linhas de campo fechadas. Entretanto Skumanich e Eddy (1981) mostraram que

---

<sup>4</sup>Nanohertz:  $1\text{nHz}=10^{-9}\text{Hz}$

uma área menor é compensada por uma intensa velocidade do vento de modo que a escala de tempo é essencialmente a mesma do modelo simples do campo magnético radial com linhas abertas.

Por comparação, a relação  $t^{-1/2}$  implica que o Sol levará somente  $10^9$  anos para perder 10% de seu momentum angular. Esta diferença na escala de tempo é consistente com o argumento de Dicke (1970) visto que o centro do Sol está rotacionalmente desacoplado das camadas externas, de modo que somente as regiões externas estão perdendo momentum angular. Entretanto, as incertezas na taxa atual da perda de momentum angular e a área onde ela ocorre são grande o bastante para apresentar algumas conclusões sólidas (ver Soderblom, 1983).

## 1.2 Rotação como um parâmetro canônico

Rotação é um importante parâmetro para descrever uma variedade de problemas em astrofísica estelar, influenciando fortemente a evolução das estrelas. Ela também nos fornece valiosas informações sobre o magnetismo estelar, interações de maré gravitacional em binárias, assim como a transferência de momentum angular ou desaceleração devido à planetas ou outro gênero de processo.

Os efeitos da rotação acompanham toda a história da evolução estelar, desde a redistribuição de momentum angular na formação da proto-estrela até o momento da morte da estrela, que dependerá explicitamente de sua massa. Apesar de inúmeros estudos sobre os efeitos da rotação na evolução estelar (ver Endal e Sofia, 1976), a grande maioria dos modelos não leva

em conta o papel deste parâmetro na estrutura estelar.

Hoje sabemos que a rotação afeta não apenas a atmosfera, mas de forma substancial, o interior estelar. Fenômenos turbulentos na envoltória convectiva provocam uma circulação meridional causando o efeito conhecido como *rotação diferencial*. Deste modo, a envoltória convectiva segue uma rotação diferencial observada na superfície, como uma função da latitude, enquanto que a envoltória radiativa parece seguir uma rotação de corpo rígido, (ver Faulkner et al., 1968; Kosovichev et al., 1997), como ilustrado para o Sol na Fig. 1.1.

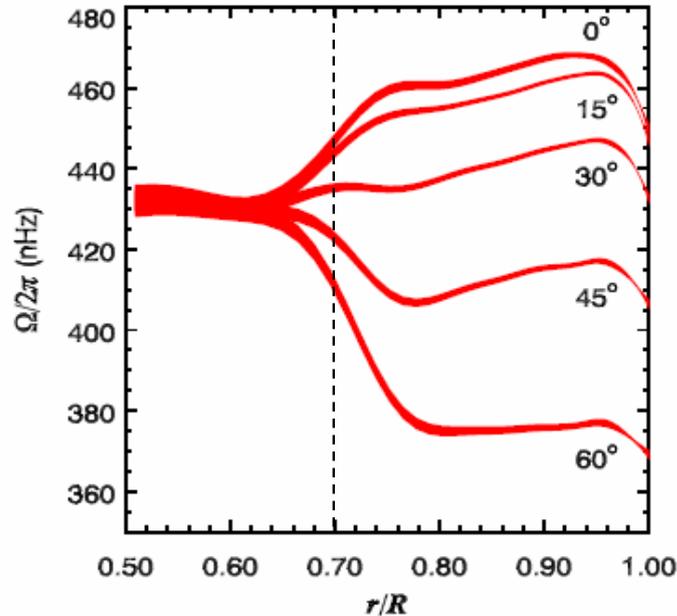


Figura 1.1: Frequência angular  $\Omega/2\pi$  em função do raio solar para cinco diferentes latitudes:  $0^\circ$  (equador),  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . A envoltória convectiva (à direita da linha pontilhada) segue a rotação diferencial, entretando a envoltória radiativa (à esquerda da linha pontilhada) segue aproximadamente a rotação de um corpo rígido. Cortesia do National Solar Observatory.  $\Omega/2\pi$  é medido em nHz (nanohertz).

Podemos verificar que nas regiões interiores à  $0.7R$  ( $R$  representa o raio

solar), as curvas para diferentes latitudes se igualam, indicando uma mesma rotação para o plasma. Esta brusca transição na velocidade de rotação entre um interior que gira como um corpo rígido e a envoltória convectiva, onde o plasma gira mais rápido no equador, é determinada por uma fina camada imediatamente abaixo da envoltória convectiva denominada de *tachocline*<sup>5</sup>.

Vale ressaltar que a espessura da envoltória convectiva, assim como, a da envoltória radiativa, varia em função da massa da estrela, como mostrado na Fig. 1.2.

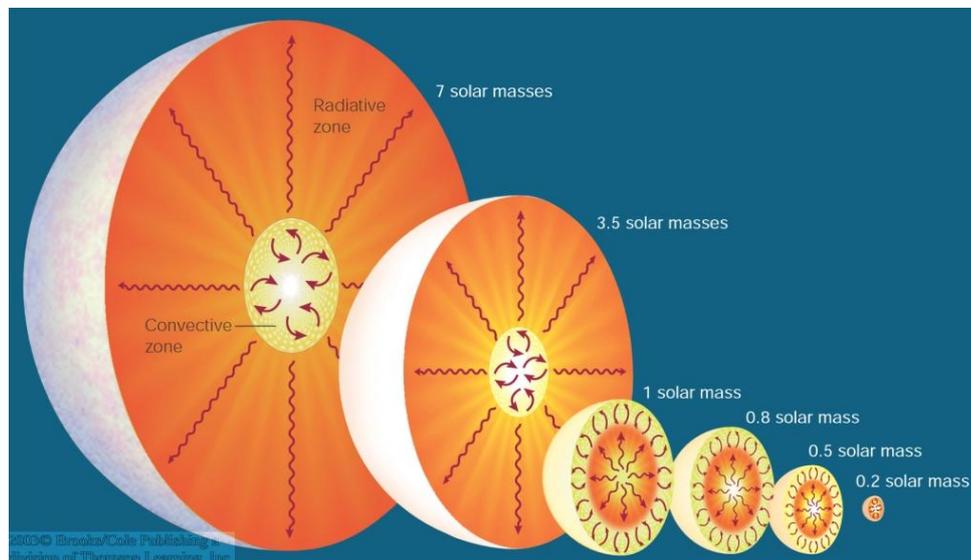


Figura 1.2: O gráfico representa a estrutura das envoltórias convectiva e radiativa para estrelas com massa entre  $0.2M_{\odot}$  e  $7.0M_{\odot}$ . Da esquerda para a direita temos:  $7M_{\odot}$ ,  $3.5M_{\odot}$ ,  $1M_{\odot}$ ,  $0.8M_{\odot}$ ,  $0.5M_{\odot}$  e  $0.2M_{\odot}$ . Observa-se que ocorre uma inversão entre as envoltórias convectiva e radiativa relativo as estrelas massivas e de baixa massa.

Um outro aspecto relevante é o efeito levitacional, onde as estrelas,

<sup>5</sup>Interface entre a envoltória radiativa e a envoltória convectiva no interior solar. Nesta camada a velocidade do plasma sofre mudanças bruscas, gerando o campo magnético solar através de um processo dínamo (ver Silva, 2006)

devido à rotação, apresentam luminosidade intrínseca e temperatura efetiva menores. Tal fato gera fortes consequências na determinação da posição das estrelas no Diagrama HR.

### 1.2.1 A rotação de um corpo rígido ou deformado

Várias simplificações são levadas em conta quando consideramos uma estrela esférica e com rotação de corpo rígido. Dentre elas podemos citar:

- Tais argumentos são válidos apenas para estrelas de baixa velocidade rotacional e que estejam evoluindo na sequência principal. Segundo Endal e Sofia (1976) medidas de rotação de estrelas da sequência principal, mostram que o efeito da rotação sobre a estrutura interna de uma determinada estrela é muito pequeno, a menos que o interior estelar esteja em rotação diferencial com relação às camadas da superfície.
- Tais argumentos consideram a estrela como tendo forma homogênea, sendo suficiente para descrevê-la, valores médios baseados no equilíbrio hidrostático global, tais como, luminosidade, temperatura efetiva, gravidade, densidade, dentre outras.
- Outro fator importante diz respeito ao mecanismo de produção de energia. Autores que levam em conta a aproximação de modelo de atmosfera, baseados no teorema de von Zeipel (ver von Zeipel, 1924; Eddington, 1926)<sup>6</sup>, considerando rotação uniforme (Faulkner et al.,

---

<sup>6</sup>Se uma estrela, girando como um corpo rígido com velocidade angular  $\Omega$ , está em equilíbrio estático,

1968; Collins, 1963; Endal e Sofia, 1976; Roxburgh, 2004), admitem que tal mecanismo não é seriamente afetado pela rotação, implicando com isso, que a luminosidade total da estrela não é afetada.

Mas, qual o problema em admitir o teorema de von Zeipel que considera explicitamente o papel da rotação como mecanismo de controle da dissipação de energia no interior estelar? Vários autores, estudando modelos de atmosfera, admitem que a estrela é uma espécie de *cebola*, onde cada casca é uma superfície equipotencial (ver: Endal e Sofia, 1976). Ou seja, admitem que superfícies equipotenciais discretizam a estrela concentricamente, mas não do equador para o pólo. Autores como, Collins (1963, 1965) e Frémat et al. (2005) mostram que existe um gradiente de luminosidade do equador para o pólo, sendo máximo nos pólos, com certa simetria azimutal, onde os parâmetros da atmosfera da estrela, tais como, temperatura e gravidade, devem ser obtidos localmente. A forma clássica de uma estrela homogênea, ao considerá-la irrotacional, dá lugar à fenômenos de achatamento dos pólos implicando na discretização ao longo da latitude da estrela. Com isso, o teorema de von Zeipel não responderia a discretização na latitude, e conseqüentemente, à dissipação de energia efetivamente maior nos pólos, a menos que fosse sugerido a escolha de uma superfície equipotencial como função de vários parâmetros, tais como, velocidade angular  $\Omega = \Omega(r, \theta)$  e excentricidade.

---

a razão de liberação de energia  $\epsilon$  em pontos no interior é dado por:

$$\epsilon = cte \cdot \left( 1 - \frac{\Omega^2}{2\pi G\rho} \right),$$

onde  $G$  representa a constante da gravitação,  $\rho$  a densidade. A constante  $cte$  é uma função da massa do gás (ver von Zeipel, 1924; Eddington, 1926).

### 1.3 Objetivos deste trabalho

Nosso trabalho tem entre os objetivos principais,

- Mostrar através de uma sólida amostra de estrelas de campo, binárias e simples com tipo espectral F e G na vizinhança solar, com velocidades rotacionais  $v \sin i$  e idades bem definidas, o comportamento da rotação como uma função da idade de forma mais consistente.
- Neste contexto tentaremos responder as seguintes questões:
  - 1) Como a relação rotação–idade depende da massa e da metalicidade?
  - 2) Esta é uma relação única ou depende diretamente do estágio evolucionário das estrelas?
  - 3) O *status* simples ou binária das estrelas influencia a relação rotação–idade?

### 1.4 Plano de trabalho

No capítulo 1, discutimos a rotação como um parâmetro canônico apontando os principais trabalhos que trataram da desaceleração da rotação com a idade. Abordamos os vínculos entre o decaimento rotacional e a atividade cromosférica em estrelas do tipo solar.

No capítulo 2 discutimos a física da relação rotação–idade e tentaremos relacionar a lei empírica de Skumanich com as proposições de Huang, através de um enfoque teórico. Fazemos um estudo relativo ao fator de desaceleração generalizado, em seguida descrevemos o decaimento  $t^{-1/2}$  teori-

camente para finalmente obtermos a função de distribuição da velocidade rotacional projetada.

No capítulo 3, apresentamos os dados observacionais. Abordamos a completeza da amostra e os parâmetros estelares estudados.

No capítulo 4, apresentamos os principais resultados do nosso trabalho e discutimos alguns pontos de destaque.

No capítulo 5, apresentamos nossas principais conclusões e discutimos também algumas perspectivas teóricas e observacionais.

## CAPÍTULO 2

### A FÍSICA DA RELAÇÃO ROTAÇÃO–IDADE

É comum na física admitirmos que uma determinada grandeza pode ser desenvolvida em uma série de potência, na maioria das vezes procurando uma aproximação devido a complexidade numérica. As leis assim expostas podem de um modo geral ser entendidas como o desenvolvimento em série de potência.

Como já sublinhado, vários estudos apontam para uma relação rotação–idade seguindo uma lei de potência do tipo  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^\alpha$ . E entretanto, a forma mais consistente com os dados observacionais, como afirmam Pace e Pasquini (2004), parece ser do tipo:

$$\langle v \sin i \rangle = a_i + b_i t^\alpha. \quad (2.1)$$

Vários valores de  $\alpha$  são usados na literatura. É importante salientar que essas leis de potência não foram somente aplicadas para averiguar o comportamento da rotação estelar com a idade, mas também para o estudo da atividade cromosférica e da diluição do lítio (ver Skumanich, 1972).

## 2.1 Um caminho teórico para a Lei de Skumanich

A lei de Skumanich é essencialmente uma lei empírica. Na presente seção, utilizando as proposições de Huang (1965 e 1967) obtemos um caminho teórico para essa lei. Na realidade seguiremos as seguintes premissas: 1) mostrar que a lei de Skumanich pode ser derivada de uma série de potência de uma determinada grandeza que decai com o tempo, 2) encontrar uma distribuição de frequência da velocidade rotacional projetada, utilizando as integrais de Chandrasekhar e Münch (1950), para a lei de Skumanich, e 3) obter distribuições teóricas de rotação que serão comparados aos dados observacionais.

### 2.1.1 O fator de desaceleração generalizado

Como indicado no Capítulo 1 (ver Eq. (1.3)) a taxa de diminuição do momentum angular de uma dada estrela pode ser descrita por uma lei de potência. Desenvolvendo a Eq. (1.3) obtemos

$$\frac{dx}{dt} = \underbrace{-a_0 - a_1x - a_2x^2 - a_3x^3 - \dots}_{j \text{ vezes}} \quad (2.2)$$

O parâmetro adimensional  $x$  é uma relação entre  $v \sin i$  e seu valor mais provável  $v_m = \langle v_{rot} \rangle$ . De forma geral, se  $j > 1$  a distribuição de  $y$  desaparece em  $y = 0$  (ver Eq. 1.2). Por outro lado, se  $0 \leq j \leq 1$  a distribuição assume um valor finito em  $y = 0$ , devido a rotação de algumas estrelas serem muito baixas. Isto equivale a dizer que, para um caso  $j > 1$

as distribuições teóricas tem um máximo em  $y$  com uma certa distância  $\Delta y$  da origem que depende do fator de desaceleração. Os dados observacionais revelam que as distribuições de rotação para estrelas simples, no sentido das F à K, tendem a deslocar tal pico para as baixas velocidades; da mesma forma, a cauda da distribuição também se desloca neste sentido, como mostra Huang (1967). Assim, nossa distribuição teórica, que objetiva encontrar o fator de desaceleração correspondente a determinado tipo espectral, será tão melhor quanto mais satisfazer às condições supracitadas.

Deste modo, a Eq. (2.2) denota, para uma determinada dimensão de  $x$ , a não conservação da grandeza física considerada, seja ela, por exemplo, o momentum angular, a massa, a velocidade rotacional ou o fluxo cromosférico.

Os três primeiros termos da série foram estudados por Huang (1965, 1967) supondo uma rotação de corpo rígido para a estrela, que os eixos de rotação são aleatórios e que as velocidades rotacionais sejam baixas para que o efeito da cauda da distribuição presente para grandes velocidades não afete a estrutura da função.

Cada caso proposto por Huang tem por objetivo definir a forma como o fator de desaceleração se comporta na distribuição da velocidades rotacional projetada  $y$ , considerando que

$$y = x \sin i, \tag{2.3}$$

onde  $i$  denota o ângulo de inclinação com relação a linha de visada. Com isso, podemos a partir da Eq. (2.2) e escolhendo um certo termo da série, digamos,  $x_j$  com

$$\frac{dx_j}{dt} = -a_j x_j^j, \quad (2.4)$$

obter uma expressão geral para determinar o fator de desaceleração  $x_j$ , dada por:

$$x_j = [(j-1)a_j t]^{\frac{1}{1-j}}, \quad j \neq 1 \quad (2.5)$$

O passo seguinte é a partir das Eqs. (2.2) e (2.4) encontrar uma expressão para  $x$  como uma função da condição inicial  $x_a$  e do fator de desaceleração  $x_j$ . Portanto,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dx_j} \frac{dx_j}{dt}, \quad (2.6)$$

e como isso, para cada valor de  $j=0, 1$  e  $2$ , obtemos os casos descritos por Huang (ver Fig. 2.1). Substituindo as Eqs. (2.2) e (2.4) e integrando (2.6), temos:

$$\int_{x_a}^x \frac{dx}{x^j} = \int^{x_j} \frac{dx_j}{x_j^j}. \quad (2.7)$$

Deste modo, a Eq. (2.7) denota, para cada valor de  $j$ , uma determinada equação para o parâmetro inicial  $x_a$  como uma função do fator de desaceleração e do parâmetro  $x$ . De posse de  $x_a$  e da função de distribuição maxwelliana, obteremos uma função distribuição da velocidade rotacional projetada, que de maneira geral é expressa como

$$\phi(y, x_j) = y \int_y^\infty \frac{f(x, x_j) dx}{x(x^2 - y^2)^{1/2}}. \quad (2.8)$$

Assim, cabe a um determinado valor de  $x_j$  o perfil de  $\phi(y, x_j)$  que melhor descreve a distribuição correspondente aos dados observacionais.

### 2.1.2 O decaimento $t^{-1/2}$

Com os resultados obtidos por Skumanich (1972) e posteriores confirmações através de outros autores, observa-se que estrelas dos tipos es-

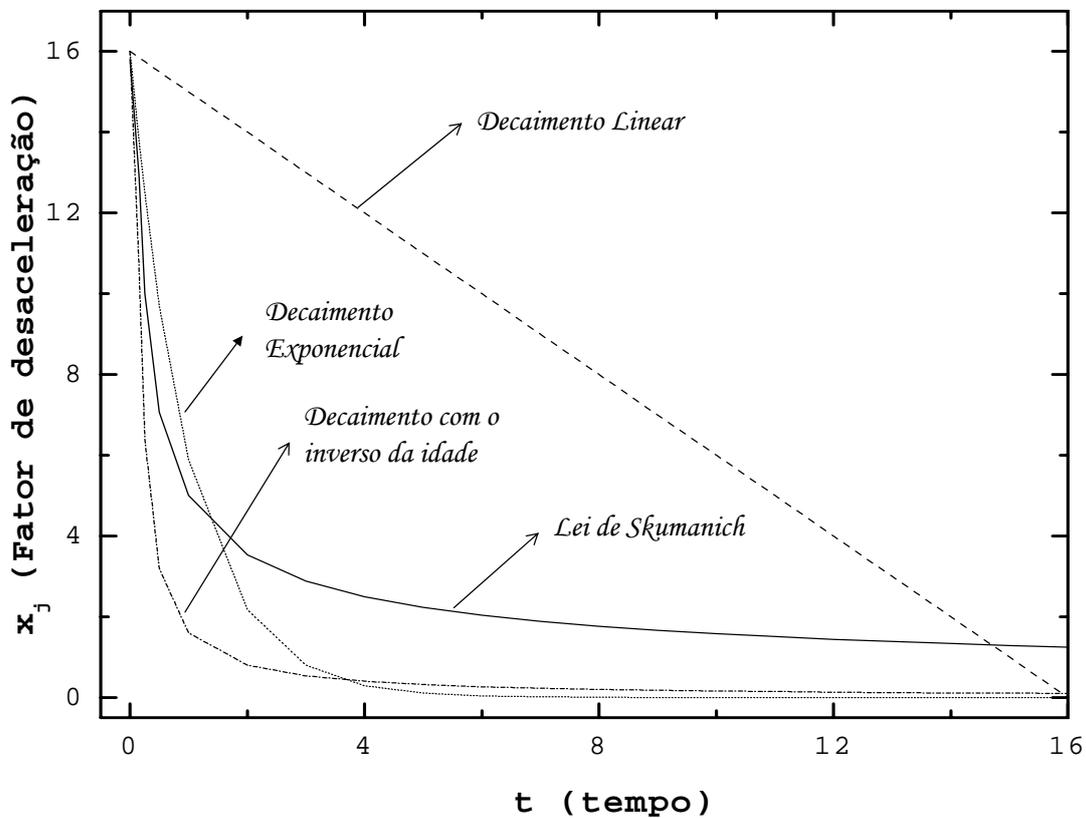


Figura 2.1: Fator de desaceleração como função da idade (escala arbitrária) para os primeiros termos da série representada pela Eq. (2.2). A lei de Skumanich expressa uma aproximação de quarta ordem na série. O decaimento linear expressa a desaceleração devido a própria evolução da estrela.

pectrais F, G e K seguem uma lei onde a velocidade rotacional decai com o inverso da raiz quadrada da idade ou de um fator  $\alpha$ . De posse deste argumento, procuramos através das proposições de Huang (1965, 1967), obter uma função de distribuição de velocidade do tipo referido por Chandrasekhar e Münch (1950), que nos ofereça através de argumentos simples uma teoria para descrever a evolução do momentum angular estelar. É importante salientar que não estamos interessados em personificar o responsável pela desaceleração rotacional mas, assim como Huang (1965, 1967), obter um caminho teórico, onde possamos da forma mais simples possível, ajustar o *parâmetro de desaceleração* a diferentes processos físicos. A partir da discussão apresentada na Seção anterior, podemos considerar que para um dado tipo espectral a função distribuição de  $x$  sobre a condição de contorno inicial  $x_a$ , e válida no tempo  $t = 0$  é dada por

$$f(x_a) = \frac{4\gamma}{\sqrt{\pi}} x_a^2 e^{-x_a^2}, \quad x_a < x_c. \quad (2.9)$$

Aqui  $x_c$  é o limite superior imposto pela instabilidade rotacional e  $\gamma$  o fator numérico para normalizar a função  $f(x_a)$ . Por simplicidade é considerado que  $x_c \rightarrow \infty$  e portanto  $\gamma = 1$ . Nosso problema se resume em encontrar  $x_3$  da equação

$$\frac{dx_3}{dt} = -a_3 x_3^3, \quad (2.10)$$

extraída da série proposta por Huang (1965, 1967)(ver Eq. (2.2)). Procuramos, com base nos casos desenvolvidos por Huang (1967), obter uma equação para  $x_3$  como uma função do tempo. Para isso, usando a Eq. (2.10) e o procedimento descrito na Seção anterior para  $j = 3$ , obtemos

uma equação de decaimento em  $t$  que pode ser comparada à lei de Skumanich, a menos de uma constante. Portanto,

$$x_3 = \frac{1}{\sqrt{2a_3}} t^{-0.5}. \quad (2.11)$$

Recorrendo à Eq. (2.7), obtemos uma equação para  $x$  em função do fator de desaceleração  $x_3$ ,

$$\frac{1}{x^2} = \frac{1}{x_a^2} + \frac{1}{x_3^2} \quad (2.12)$$

Desta equação podemos encontrar  $\frac{dx}{dx_3}$  que juntamente com a Eq. (2.10) devem satisfazer a Eq. (2.6). É necessário a partir da Eq. (2.12) expressar  $x_a$  como uma função de  $x$  e  $x_3$  para tornar a distribuição maxwelliana, expressa pela Eq. (2.9), uma função do tempo através da inclusão do parâmetro  $x_3$ . Deste modo:

$$x_a = \frac{x_3 x}{(x_3^2 - x^2)^{1/2}}. \quad (2.13)$$

Assim, o parâmetro  $x$  ocorre com uma certa distribuição, aqui considerado não-maxwelliana (maxwelliana acoplada ao fator de desaceleração), governada por uma função de distribuição ou função frequência  $f(x, x_3)$  dada por

$$f(x, x_3) dx = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{x^2 x_3^5}{(x_3^2 - x^2)^{5/2}} e^{-\frac{x^2 x_3^2}{x_3^2 - x^2}} dx. \quad (2.14)$$

A função frequência de  $y$  denotada por  $\phi(y, x_3)$  é dada por

$$\phi(y, x_3) = y \int_y^\infty \frac{f(x, x_3) dx}{x(x^2 - y^2)^{1/2}}, \quad (2.15)$$

onde tal expressão, similar à Eq. 2.3, estabelece uma relação entre os momentos  $\phi(y, x_3)$  e  $f(x, x_3)$  que satisfazem aos valores médios de  $x$  e  $y$  como demonstrado por Chandrasekhar & Münch (1950). Após realizar algumas substituições<sup>1</sup>, obtemos finalmente a função distribuição  $\phi(y, x_3)$ , que representa a velocidade rotacional projetada, descrevendo o decaimento temporal como na lei de Skumanich:

$$\phi_{Skumanich}(y, x_3) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} x_3^5 y^2 \int_0^{\theta_3} \frac{\cos^3 \theta}{(x_3^2 \cos^2 \theta - y^2)^{5/2}} \exp\left(-\frac{x_3^2 y^2}{x_3^2 \cos^2 \theta - y^2}\right) d\theta. \quad (2.20)$$

Considerando a Eq. (2.17) no limite superior de  $\theta$ , isto é, que o valor máximo de  $x$  seja  $y_3$ , temos

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{y}{y_3}\right), \quad \pi/2 \leq \theta_3 \leq 2\pi, \quad (2.21)$$

que representa a condição de contorno de  $\theta_3$ .  $y_3$  é o limite superior de  $y$ . A integral pode ser resolvida numericamente, e o caso com  $y_3 \rightarrow \infty$  é mostrado na Fig. 2.2 pela curva marcada pelo símbolo  $-o-$ .

---

<sup>1</sup>Considerando

$$\theta = i - \frac{\pi}{2}, \quad \text{assim} \quad \text{sen}i = \text{cos}\theta, \quad (2.16)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação com relação ao plano do céu. Deste modo, a Eq. (2.3) pode ser reescrita

$$x = y \sec \theta, \quad (2.17)$$

assim como,

$$dx = y \sec \theta \tan \theta d\theta, \quad (2.18)$$

e

$$(x^2 - y^2)^{1/2} = x \text{sen} \theta \quad (2.19)$$

De posse dessas relações, o processo se baseia em fixar  $x_3$ , variar  $y$  e integrar numericamente. As curvas presentes na Fig. 2.2 foram gerados fazendo  $y$  variar num passo de 0.05.

Sobre as condições em que  $x_a=x_c$  e  $x=y_3$ , a Eq. (2.12) pode ser expressa como

$$\frac{1}{y_3^2} = \frac{1}{x_3^2} + \frac{1}{x_c^2}, \quad (2.22)$$

impondo  $x_c \rightarrow \infty$ , temos que o limite superior da integral na Eq. (2.15) é dado por

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{y}{x_3}\right). \quad (2.23)$$

A Figura 2.1 explicita o papel de cada termo da série (ver Eq. (2.3)): O decaimento linear assume que a desaceleração da rotação é constante, independente da velocidade rotacional, enquanto que o decaimento exponencial assume que a ação da desaceleração é diretamente proporcional à velocidade rotacional. Se considerarmos o mecanismo de desaceleração de Schatzman (1962), o momentum angular dissipado pelo vento estelar é proporcional à velocidade angular da estrela naquele instante (ver Schatzman, 1962; Roxburgh, 1983)<sup>2</sup>. Isto corresponde ao decaimento exponencial, se a taxa de massa ejetada e a força do campo magnético são independentes da rotação.

Segundo Huang (1967) a forma com que a taxa de  $x$  diminui com o tempo deveria ser então proporcional à  $x^n$ , mais especificamente para  $n > 1$ . Isto pode ser justificado pela ação da desaceleração presente no decaimento com

---

<sup>2</sup>Podemos comparar o segundo termo da Eq. (2.2) com a equação da dissipação de momentum angular mostrada por Roxburgh (1983):

$$\frac{dx}{dt} = -a_1 x \Leftrightarrow \frac{dH}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{B^2 \Omega}{V_A}, \quad (2.24)$$

onde  $B$  é o campo magnético médio da superfície e  $V_A$  a velocidade de Alfvén.

o inverso da idade ( $v(\text{ou } x) \propto t^{-1}$ ) ou com a lei de Skumanich.

Soderblom (1983) mostra que a taxa de diminuição da velocidade rotacional (ou a dissipação do momentum angular) é proporcional ao cubo da velocidade rotacional  $v$ , ou seja,

$$\frac{dv}{dt} \propto vB^2 \propto v^3, \quad (2.25)$$

com  $v \propto a_i + b_i t^{-1/2}$ . Para estrelas mais velhas  $a_i$  é desprezível e a equação se reduz à  $v \propto t^{-1/2}$ .

Skumanich (1972) chegou a conclusão que tanto a emissão de  $\text{Ca}^+$  quanto a velocidade rotacional seguem a mesma lei de decaimento com  $B \propto v$ . Skumanich, Smythe e Frazier (1975) mostraram que a intensidade do campo magnético médio e a emissão de  $\text{CaII}$  são aproximadamente proporcionais ( $F(\text{CaII}) \propto B$ ). Deste modo, é razoável admitir que a Eq. 2.25 é válida sob a condição das estrelas manterem esta linearidade.

Análises da distribuição  $\phi_{Skumanich}(y, x_3)$  para diferentes valores do parâmetro de desaceleração  $x_3 = x_3(t^{-1/2})$  mostram um resultado interessante: na medida que  $x_3$  aumenta a cauda de distribuição é alargada se aproximando cada vez mais de uma maxwelliana, ao contrário, a medida que  $x_3$  diminui a distribuição se comprime no intervalo das baixas velocidades (ver Fig. 2.2). Ou seja, a medida que a estrela evolui o fator  $x_3$  diminui. Isto é devido simplesmente ao fato que  $x_3$  é inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. Cada valor de  $x_3$  corresponde à um determinado intervalo de tempo. Para entender a Fig. 2.2 temos que considerar que cada curva denota um certo intervalo de tempo  $\Delta t$  de

ação da desaceleração<sup>3</sup>. Estrelas com tipo espectral F, G e K podem ter distribuições teóricas da velocidade rotacional projetada obtidas pela Eq. (2.20), por já terem sofrido vários mecanismo de dissipação de momentum angular.

Soderblom et al. (1983) obtém através de uma função Maxwell–Boltzmann, do tipo

$$\phi(u) = \Phi(U) = CU \exp\left(-\frac{\pi}{4}U^2\right), \quad U = u / \langle u \rangle, \quad e \quad u = v \sin i, \quad (2.26)$$

um histograma da distribuição de velocidade  $v \sin i$  similar à nossa distribuição.  $C$  é uma constante de normalização da ordem da unidade. A nossa distribuição tem vantagem sobre a de Soderblom por tratar o decaimento em diferentes tempos evolutivos, enquanto ele trata o decaimento dentro de uma média da idade da estrela. Ambas as distribuições possuem erros elevados para baixas velocidades (ver Fig. 2.2), não sendo apropriado para tirar muitas conclusões. Segundo Soderblom et al. (1983) tal distribuição não é bimodal, sugerindo que não existe nenhuma diferença entre estrelas com ou sem planetas, e que a parte da distribuição que se refere as baixas velocidades pode ser negligenciada.

Cada curva na Fig. 2.2 representa a intensidade da desaceleração rotacional  $x_3$ . A distribuição Maxwell–Boltzmann (ver Soderblom, 1983) representa o máximo valor de  $x_3$ , devido a condição imposta pelas Eqs. (2.21) e (2.22). Se  $y > 3.0$  a função distribuição  $\phi_{Skumanich}(y, x_3)$  torna-se complexa.

---

<sup>3</sup>Huang (1967) afirma que o fator de desaceleração para estrelas de aglomerados é considerado como uma constante, por as mesmas terem idades idênticas. Desta forma, pode ser feito o mesmo para estrelas de campo especificando o intervalo de idade à considerar.

A medida que  $x_3$  diminui a desaceleração torna-se mais intensa.  $x_3=0.0$  pode ser representada por uma reta vertical assintótica, informando que todas as estrelas num tempo  $t \rightarrow \infty$  estarão paradas. Isto pode ser evidenciado pela elevação do pico à medida que  $x_3$  diminui. Deste modo, cada valor de  $x_3$  denota um intervalo de tempo em que a desaceleração atua.

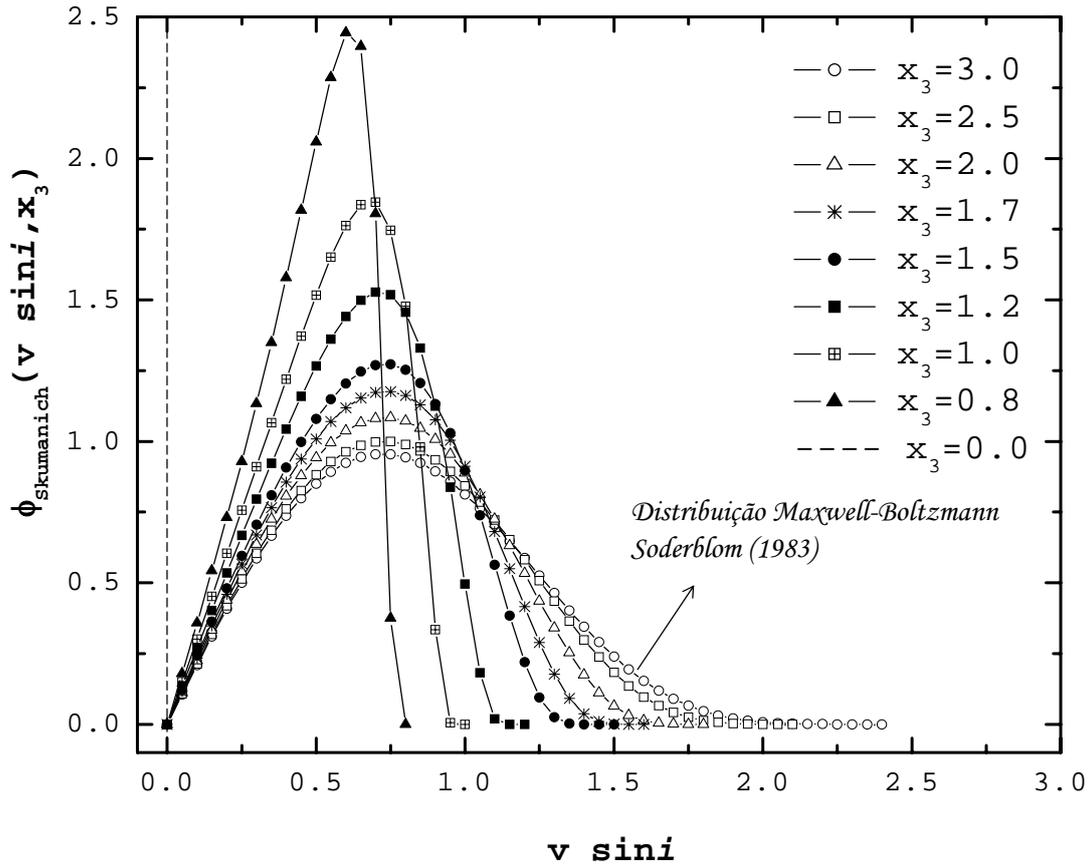


Figura 2.2: Distribuição de velocidade rotacional  $v \sin i$  para uma gama de valores de  $x_3$  (escala arbitrária). A distribuição maxwelliana está representada pela curva  $(-o-)$ . As demais curvas mostram o efeito do tempo sobre a distribuição. A linha vertical  $(---)$  denota a distribuição de velocidade rotacional para um tempo  $t \rightarrow \infty$ .

## CAPÍTULO 3

### OS DADOS OBSERVACIONAIS

As medidas de velocidade rotacional projetada utilizadas na presente dissertação foram obtidas do catálogo de *Geneva–Copenhagen*, que contém cerca de 14 000 estrelas na vizinhança solar (Nordström et al., 2004).

#### 3.1 Trabalhando a amostra

Nosso estudo é baseado em uma amostra completa em magnitude de estrelas binárias e simples da vizinhança solar, com tipo espectral F e G, limitada em um volume de aproximadamente 40 pc.

Para 12 941 estrelas os dados de  $v \sin i$  foram obtidos de observações efetuadas através do espectrômetro de correlação cruzada CORAVEL (Baranne et al. 1979; Mayor, 1985) usando as calibrações de Benz e Mayor (1980, 1984). Tal procedimento oferece valores de  $v \sin i$  com uma precisão de 1 km/s para rotações menores que 30 km/s (ver também De Medeiros e Mayor, 1999). Nesta amostra a grande maioria das estrelas tem rotações abaixo de 20 km/s. Deste total de 12941 estrelas com rotação, 36% são

binárias e 64% são simples.

Para 833 estrelas os dados de rotação foram determinados de observações efetuadas com o espectrômetro digital (Latham, 1985) do *Havard-Smithsonian Center for Astrophysics*, CfA, em particular, para estrelas com rotação maior do que os limites oferecidos pelo CORAVEL tipicamente 50 km/s. Em resumo, a amostra final usada na presente análise é composta por estrelas com valores de  $v \sin i$  obtidos a partir de observações dos espectrômetros CORAVEL e digital do CfA, que possuem também idade, metalicidade e massa dados por Nordström et al. (2004). Refinando a amostra nestes parâmetros, obtemos uma base de dados final composta de 10 256 estrelas binárias e simples.

### 3.1.1 A completeza da amostra em magnitude

A grande quantidade de dados presentes na amostra nos permite uma análise sobre a completeza da mesma. Primeiramente, separamos as estrelas em binárias e simples, depois separamos por tipo espectral, eliminando da amostra algumas estrelas com classificação espectral incerta.

Resolvemos analisar as distribuições cumulativas da magnitude visual aparente por tipo espectral, F ou G, e por tipo de estrela, binária ou simples. Por fim, checamos a completeza da amostra quanto à magnitude visual aparente  $m_v$ .

- Para as estrelas binárias com tipo espectral F, é mostrado na Fig. 3.1a que a amostra é completa para magnitudes em torno de 8.8.

- Para as estrelas binárias com tipo espectral G, é mostrado na Fig. 3.1**b** que a amostra é completa para magnitudes em torno de 8.3.
- Para estrelas simples com tipo espectral F, é mostrado na Fig. 3.1.**c** que a amostra é completa para para magnitudes em torno de 8.
- Para as estrelas binárias com tipo espectral G, é mostrado na Fig. 3.1**d** que a amostra é completa para magnitudes em torno de 8.3.

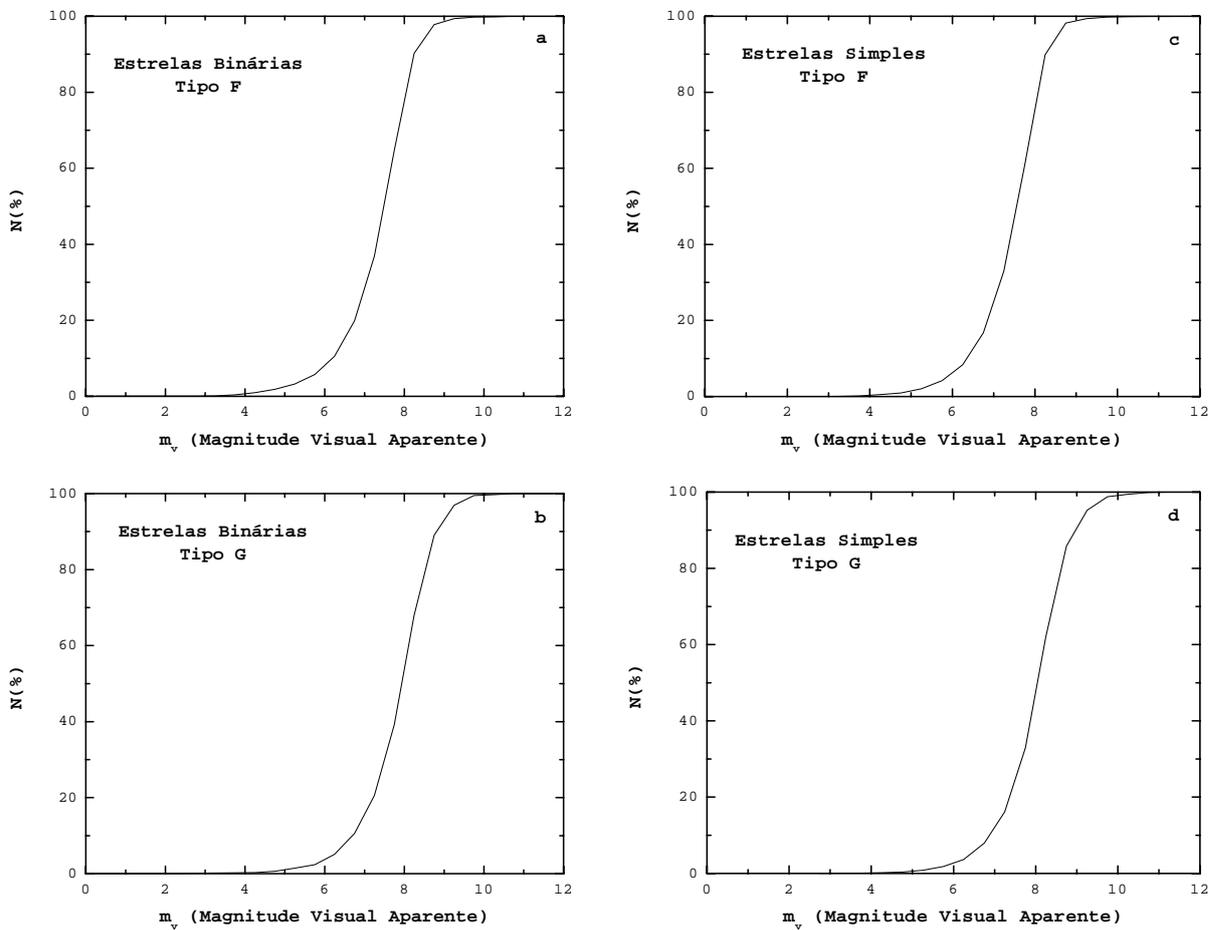


Figura 3.1: **a–d**. Função integral da magnitude visual aparente para estrelas: (a) binárias do tipo espectral F, (b) do tipo G, (c) simples do tipo F e (d) do tipo G.

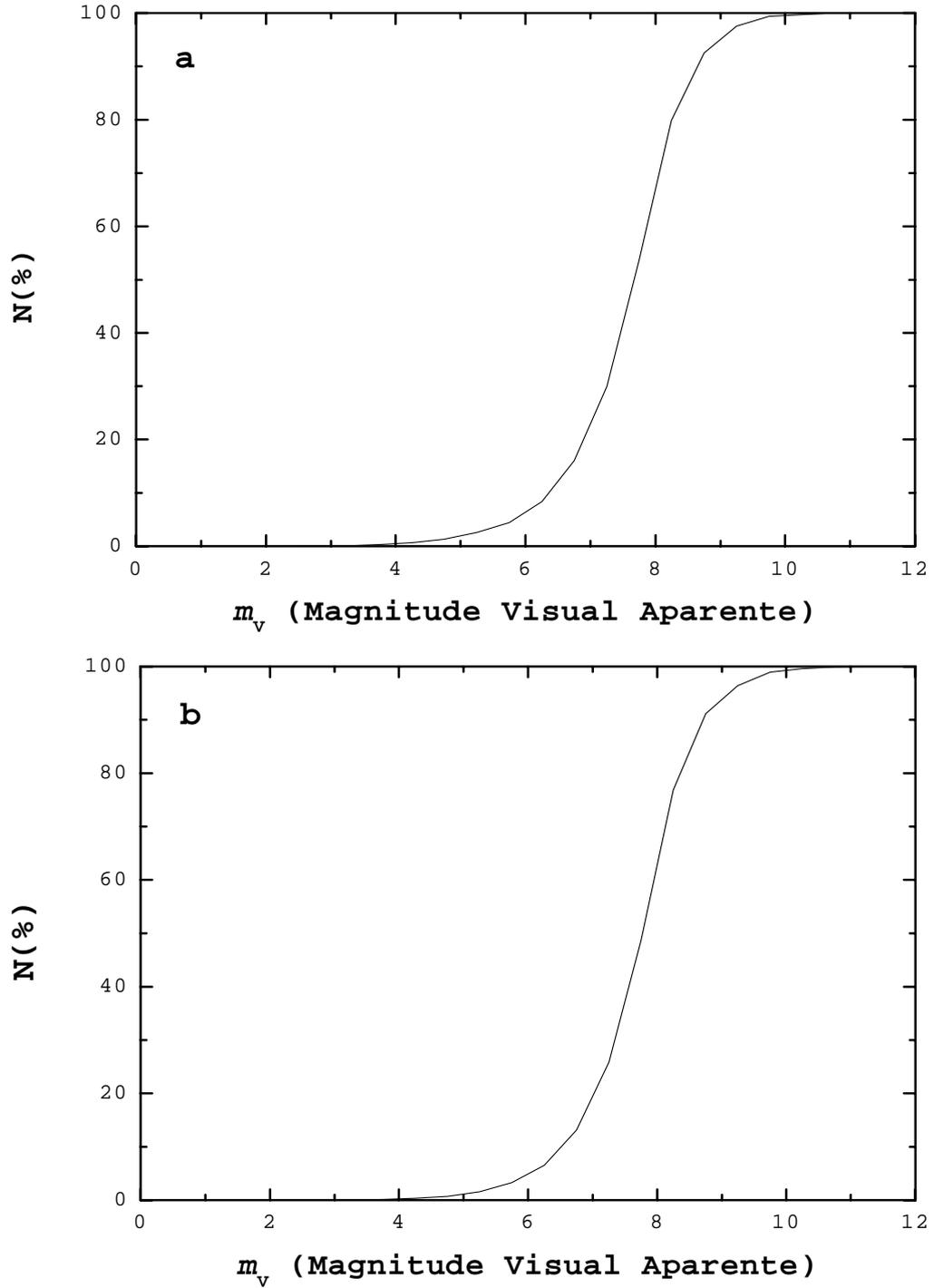


Figura 3.2: **a**–**b**. Função integral da magnitude visual aparente para estrelas (a) binárias e (b) simples, independente do tipo espectral.

Porém, visualizando o quadro geral nas Figs. 3.2a e 3.2b, com todas as estrelas independente do tipo espectral, poderíamos concluir que, efetiva-

mente, somente estrelas com  $m_v < 8.7$ , tanto para binárias quanto para as simples, tornam a nossa amostra completa. Por conseguinte, deveríamos excluir as estrelas acima desse valor de magnitude, ou seja, 13% das estrelas binárias e 16% das simples. Por outro lado, resolvemos verificar a contribuição destas estrelas no desvio da velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$  e verificamos que suas médias não distanciam da velocidade média da amostra, e resolvemos manter tais estrelas, considerando que o excesso de estrelas com magnitude acima de 8.7 não terá influência na análise de nossa amostra.

### 3.1.2 Parâmetros estelares estudados na amostra

Vamos analisar alguns parâmetros importantes usados no presente trabalho.

#### **Velocidade rotacional projetada $v \sin i$**

Como discutido na Seção 3.1 as medidas de velocidade da rotação projetada,  $v \sin i$ , usadas na presente Dissertação apresentam precisão tão boas quanto 1 km/s, o que torna nossa amostra única também do ponto de vista qualitativo do parâmetro principal aqui utilizado. É importante sublinhar que tal qualidade é válida tanto para as estrelas simples quanto para as binárias.

Podemos verificar através da Fig. 3.3, que as distribuições de  $v \sin i$  para estrelas binárias e simples, são bem semelhantes. De fato, realizando o teste

de Kolmogorov–Smirnov (teste K–S), obtivemos que a probabilidade das duas distribuições serem iguais é de aproximadamente 96%.

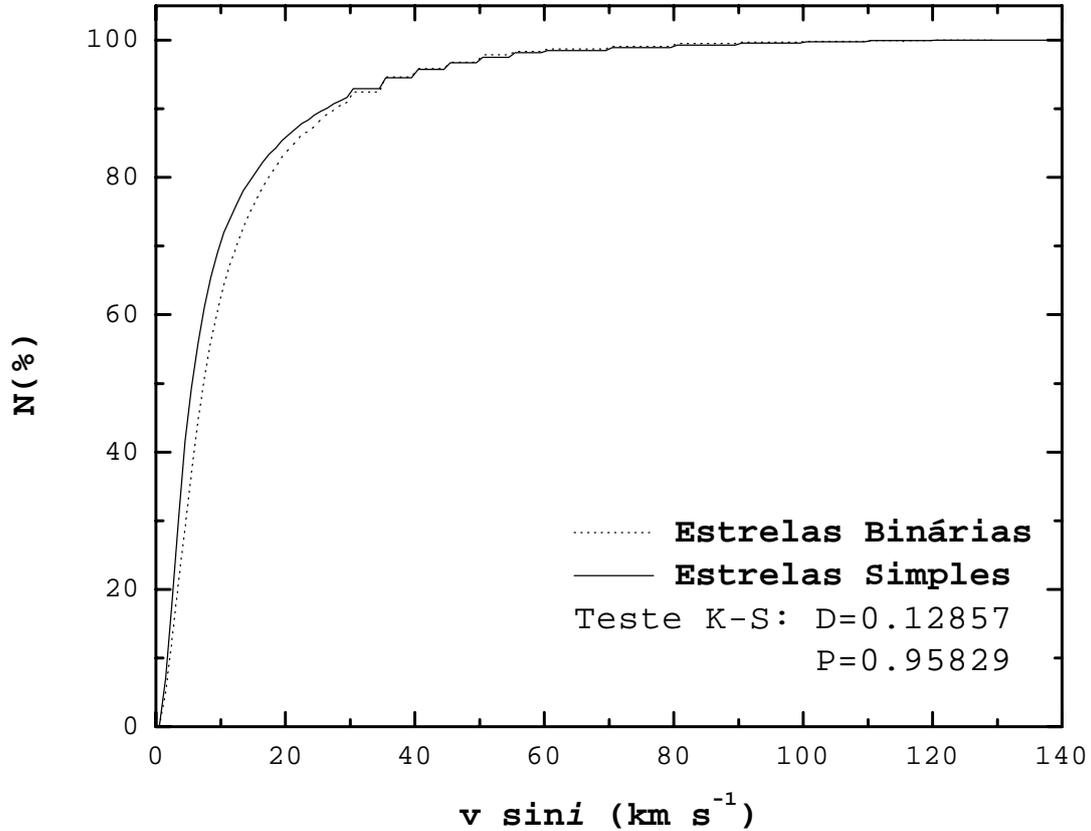


Figura 3.3: A distribuição cumulativa de  $v \sin i$  para estrelas binárias (linha tracejada) e simples (linha contínua), onde é mostrado o percentual de semelhança entre as distribuições determinada pelo teste K–S. A probabilidade de que as duas distribuições sejam diferentes é  $D \sim 0.13\%$  e a probabilidade de que as distribuições sejam iguais é  $P \sim 96\%$ . A figura mostra que a maioria das estrelas da amostra possui  $v \sin i < 20 \text{ km/s}$ .

## Idade

Uma idade bem determinada é, sem dúvida, crucial quando estudamos a evolução de algum objeto astrofísico. As idades das estrelas da pre-

sente amostra foram medidas pela posição no diagrama–HR tridimensional ( $\log T_{ef}$ ,  $m_v$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ). Foi calculada a probabilidade  $P$  que a estrela deve ocupar uma dada posição no diagrama–HR, obtida pela interpolação das isócronas de Padova<sup>1</sup>, dada por

$$P = \exp \left[ -\frac{\Delta T_e^2}{2\sigma_{T_e}^2} \right] * \exp \left[ -\frac{\Delta m_v^2}{2\sigma_{m_v}^2} \right] * \exp \left[ -\frac{\Delta [\text{Fe}/\text{H}]^2}{2\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}^2} \right], \quad (3.1)$$

onde os erros  $\sigma$  são retirados do catálogo. Integrando a Eq. (3.1) sobre todos os pontos é obtida a distribuição de probabilidade global para as possíveis idades de cada estrela. A distribuição normalizada resultante da integração da Eq. (3.1) é denominada de *função–G*, onde o mais provável valor da idade de uma estrela é então determinada pelo valor máximo desta função. Existem algumas dificuldades concernentes a integração numérica desta função, que não serão discutidas (maiores detalhes ver Nordström et al., 2004). Os resultados obtidos da idade das estrelas de nossa base, a partir da *função–G*, vão de 0 à 17.8 Giga–anos, com erro relativo<sup>2</sup> na idade, centrado em 20% na maioria das estrelas, binárias ou simples. A distribuição das idades estimadas a partir do processo acima descrito é ilustrada na Fig. 3.4.

## Massa

---

<sup>1</sup>As isócronas, diferentemente dos traços evolutivos tradicionais, consideram as idades como constante mas variando a massa. São modelos teóricos para determinar o comportamento de parâmetros da estrela no diagrama–HR. Padova é uma homenagem a cidade italiana onde foi criado o modelo.

<sup>2</sup>Na verdade no catálogo são dados o limite inferior confiável e o limite superior confiável, isto vale tanto para idade quanto para qualquer outro parâmetro, onde seja citado no texto a sua estimativa de erro.

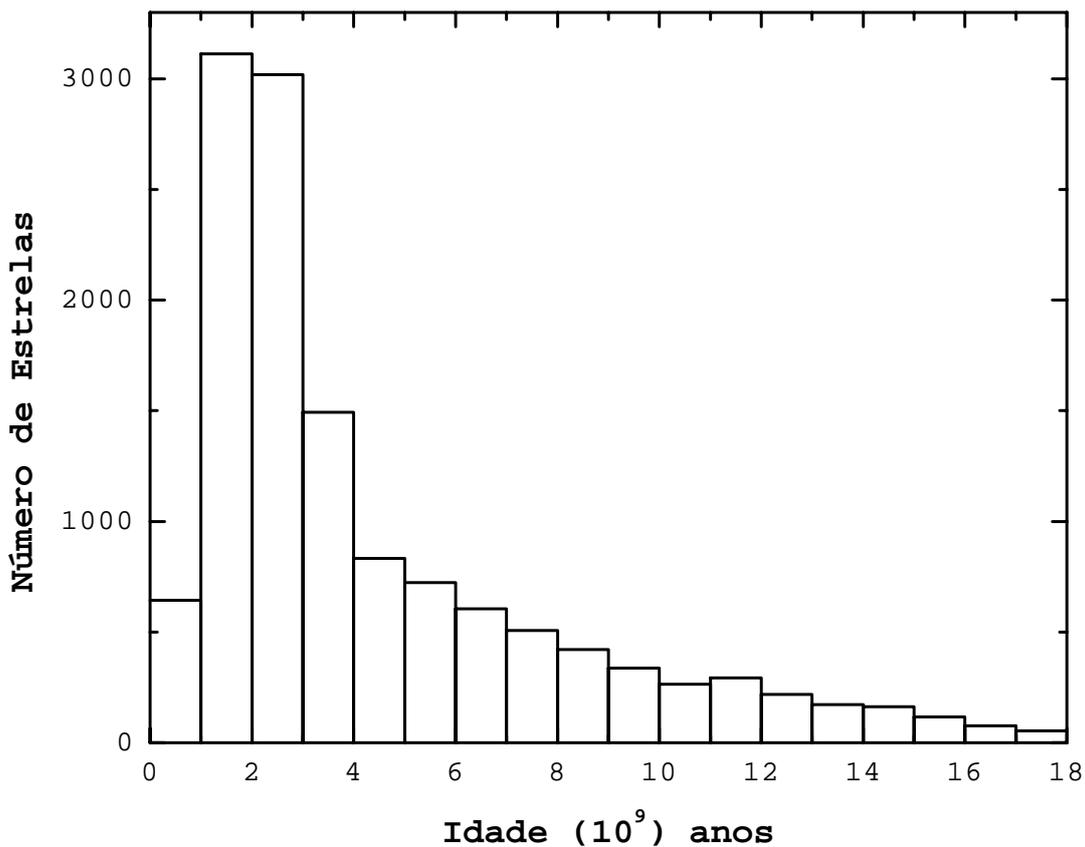


Figura 3.4: Histograma da idade de todas as estrelas da amostra.

Em nossa amostra, a massa está limitada aos intervalos entre  $0.61$  e  $2.36M_{\odot}$  para as estrelas binárias e entre  $0.58$  e  $2.43M_{\odot}$  para as estrelas simples. Nordström et al. (2004) mostraram que estimar a massa é um passo necessário para descrição da história evolutiva de uma estrela. Isto, por que cada ponto em um modelo de isócronas corresponde à um valor específico para a massa, assim como foi para a idade. Nordström et al. (2004) calcularam uma função descrita como *função-M*, importante para estimar a distribuição de probabilidade das massas para uma estrela, assim como foi para a idade com a *função-G*.

A *função-M* tem um melhor comportamento que a *função-G* e geral-

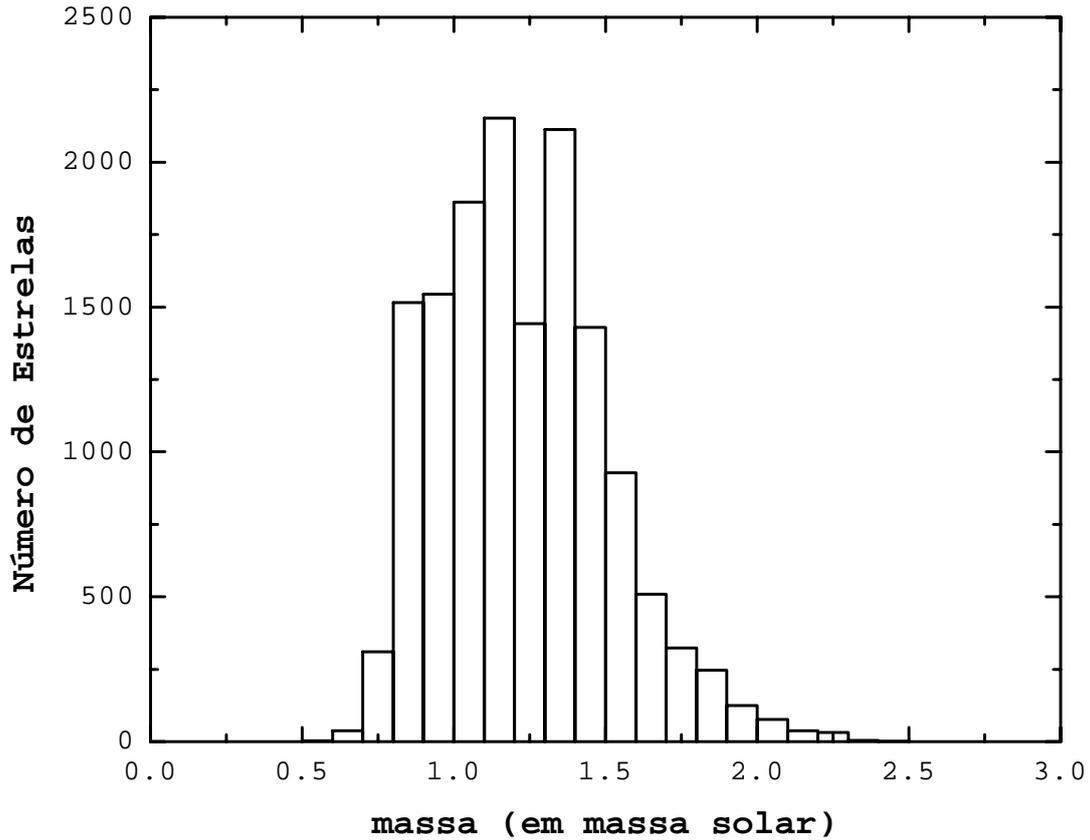


Figura 3.5: Histograma da massa de todas as estrelas da amostra.

mente produz bons resultados, mesmo para estrelas onde a estimativa da idade não foi tão boa. No catálogo de *Geneva–Copenhagen* são informados as estimativas de erro no cálculo das massas, de onde se obtém um erro médio da ordem de  $0.05M_{\odot}$ . A Figura 3.5 mostra a distribuição de massa não limitada em magnitude visual aparente, tanto para estrelas binárias quanto estrelas simples.

## Metalicidade

Em nossa amostra a metalicidade está limitada entre  $-2.1$  e  $0.6$  *dex* para

as estrelas binárias e entre  $-2.2$  e  $0.6$  dex para as estrelas simples. Os valores de metalicidade foram derivados do sistema  $uvby\beta$  Strömgen (Nordström et al., 2004 e 2005). Vários tipos de calibrações foram usadas, mas para a maioria das estrelas foi adotada a calibração de Schuster e Nissen (1989). As calibrações foram delineadas pelo índice de cor  $b-y$  como foi mostrado por Nordström et al. (2004). A distribuição das metalicidades estimadas por Nordström et al. (2004) é apresentada na Fig. 3.6, com um valor médio na metalicidade em torno de  $-0.14$ , para toda a amostra. Deste modo, é bastante aceitável considerar, que as estrelas da presente amostra possuem metalicidade solar.

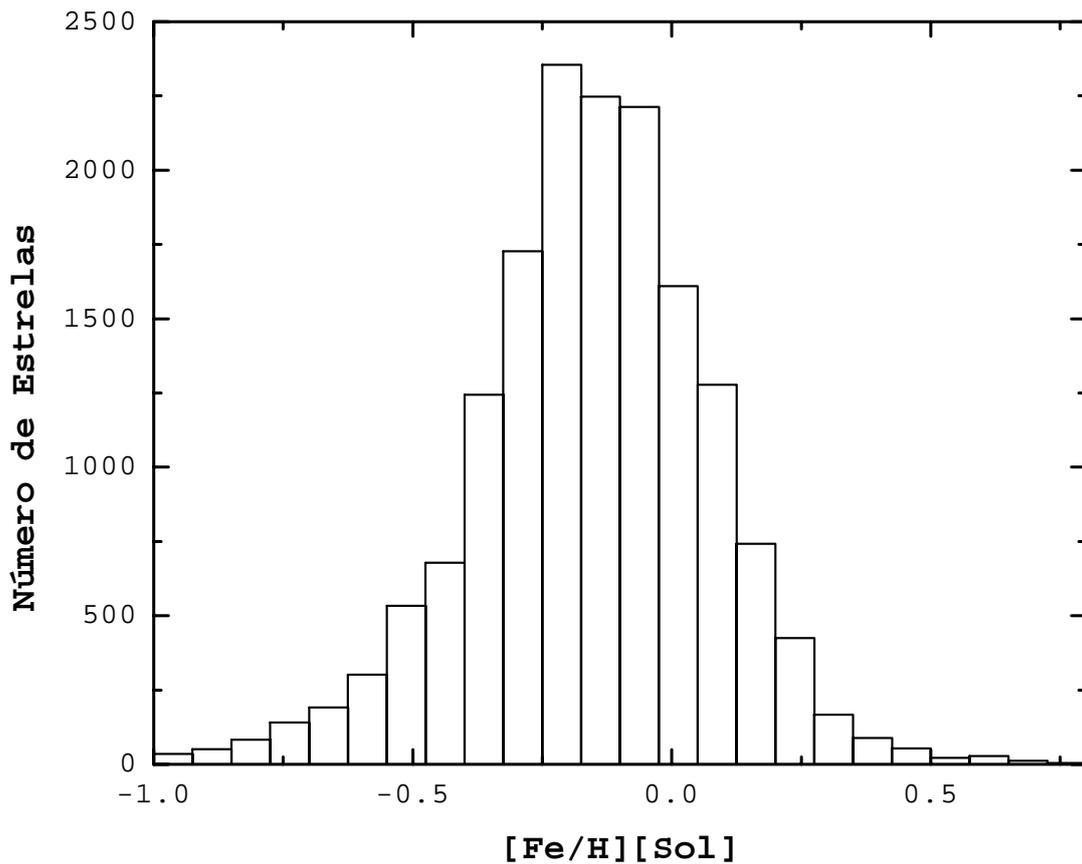


Figura 3.6: Histograma da metalicidade de todas as estrelas da amostra.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da relação rotação–idade é particularmente importante para uma melhor compreensão do processo de evolução estelar. Inicialmente, apresentamos nas Tabelas (4.1), (4.2) e (4.3) o números de estrelas por intervalo de idade e massa usadas para estimar a velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$ .

A partir dos valores de  $\langle v \sin i \rangle$ , analizaremos o comportamento da rotação.

### 4.1 Conexão Rotação–Idade em estrelas simples e binárias

O comportamento da rotação como função da idade para as estrelas da amostra é mostrado na Fig. 4.1. A velocidade rotacional média<sup>1</sup>  $\langle v_{rot} \rangle$  (ou  $\langle v \sin i \rangle$ ) corresponde à média dos valores de  $v \sin i$  em intervalos de idade de 1 Giga–ano ( $1 \times 10^9$  anos), como indicado na figura. O número de estrelas para cada intervalo é dado na Tabela (4.1).

---

<sup>1</sup>A velocidade rotacional média corresponde a média ponderada das estrelas em um determinado intervalo de idade, aqui este intervalo é de 1 Giga–ano.

Tabela 4.1: Número de estrelas por intervalo de idade usado para estimar  $\langle v \sin i \rangle$  presente na Fig. 4.1.

Idade	Binárias	Simples
Giga-anos		
0-1	129	161
1-2	697	1103
2-3	875	1492
3-4	447	838
4-5	263	506
5-6	242	443
6-7	189	380
7-8	174	317
8-9	122	276
9-10	93	217
10-11	86	173
11-12	99	181
12-13	77	136
13-14	55	101

Tabela 4.2: Número de estrelas por intervalo de idade usado na estimativa de  $\langle v \sin i \rangle$  presente na Fig. 4.2. (i)  $0.75 < M (M_{\odot}) \leq 1.25$ , (ii)  $1.25 < M (M_{\odot}) \leq 1.50$  e (iii)  $M (M_{\odot}) > 1.50$

Idade	Binárias (i)	Simples (i)	Binárias (ii)	Simples (ii)	Binárias (iii)	Simples (iii)
Giga-anos						
0-1	9	26	24	45	95	88
1-2	23	72	295	508	379	520
2-3	179	333	672	1105	10	23
3-4	315	618	98	155	-	-
4-5	209	417	14	27	-	-
5-6	210	376	-	6	-	-
6-7	172	339	-	-	-	-
7-8	153	273	-	-	-	-
8-9	111	241	-	-	-	-
9-10	90	189	-	-	-	-
10-11	77	156	-	-	-	-
11-12	88	157	-	-	-	-
12-13	64	104	-	-	-	-
13-14	47	87	-	-	-	-

Tabela 4.3: Número de estrelas por intervalo de idade usadas para estimar  $\langle v \sin i \rangle$  presentes na Fig. 4.3.

Idade	Binárias	Simples
Giga-anos		
0-2	32	98
2-4	494	951
4-6	419	793
6-8	325	612
8-10	201	430
10-12	165	313
12-14	112	191

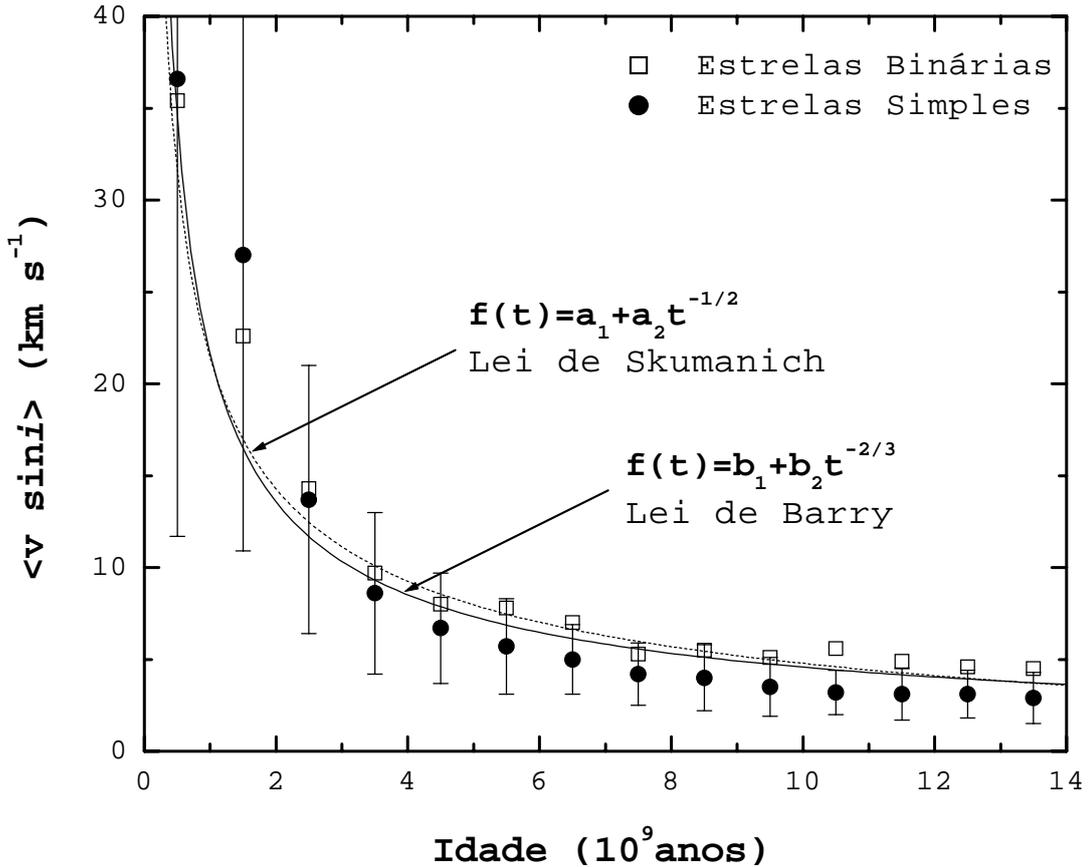


Figura 4.1: Velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$  por intervalo de idade. Estrelas simples são representadas por círculos e estrelas binárias por quadrados. O número de estrelas usadas para estimar a velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$  é dado na Tabela (4.1). As barras apresentadas na figura não são barras de erro, mas uma distribuição pico à pico dos valores de  $v \sin i$  em cada intervalo de idade.

As características mais importantes da Fig. 4.1 são a queda inicialmente lenta da rotação em baixas idades ( $< 1$  Giga-ano), próximas da idade das Hyades ( $\sim 0.6$  Giga-anos); um decaimento rápido em idades intermediárias ( $\sim 1-2$  Giga-anos); e finalmente um decaimento lento para estrelas com idades semelhantes ao Sol. A queda lenta para baixas idades não é acompanhada pela lei de Skumanich, como pode ser evidenciada pelas altas dispersões em torno deste intervalo de idade (ver Fig. 4.1).

Um outro aspecto importante a ser sublinhado, a partir da distribuição rotação–idade apresentada na Fig. 4.1, diz respeito à clara tendência para uma diferença na rotação média das estrelas simples e binárias, em dois regimes distintos: para idades superiores a cerca de 2 Giga–anos as estrelas binárias apresentam uma velocidade média superior àquelas das estrelas simples; para idades inferiores a 2 Giga–anos observa-se o inverso, com as estrelas binárias agora apresentando uma rotação média inferior à rotação média das estrelas simples. Tal fato, em princípio, pode ser um reflexo dos efeitos de marés gravitacionais sobre a rotação das estrelas binárias, a partir de idades superiores a cerca de 2 Giga–anos.

O segundo passo nesta análise foi verificar se o comportamento da relação–rotação idade prevalece ponderando a massa, resultando na Fig. 4.2. Nela obtemos três regiões de massa que abrigam as menores médias (Região 1), as médias intermediárias (Região 2) e as maiores médias (Região 3) de  $\langle v \sin i \rangle$ . Isto aponta para o seguinte aspecto: As estrelas mais jovens (Região 3) são aquelas mais massivas; Na Região 1 onde se localizam as estrelas de massas menores a velocidade rotacional média varia muito pouco com a idade, com um eventual pico entre 2 e 2.5 Giga–anos.

O trabalho de Kraft (1967) mostra que o comportamento da rotação  $\langle v \sin i \rangle$  com  $M/M_{\odot}$  segue a mesma tendência aqui manifestada. Segundo ele, a velocidade rotacional média é mais elevada entre aquelas com emissão de CaII do que aquelas sem emissão. Deste modo, a relação rotação–idade possui uma dependência direta com a massa como solidamente mostrado na Fig. 4.2, indicando que, estrelas de massas diferentes tendem à dissipar momentum angular original de maneira distinta.

Em seguida realizamos três testes com a metalicidade: primeiro, selecionando estrelas com metalicidade  $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.5$ ; segundo, estrelas com metalicidade maior que a solar ( $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0$ ) e, em seguida, estrelas com metalicidade no intervalo  $-0.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0$ . O resultado obtido indicou que para qualquer intervalo de metalicidade a relação-rotação idade permanece inalterada. Tal aspecto era esperado devido ao fato que a amostra apresenta tipicamente uma metalicidade solar.

A Figura 4.3 apresenta o comportamento rotação *versus* idade apenas para estrelas com massas  $M = (1 \pm 0.25)M_{\odot}$ . Um importante aspecto se manifesta nesta figura, com o aparecimento de dois comportamentos bem distintos na relação rotação-idade: 1) estrelas com idades superiores a cerca de 2 Giga-anos apresentam uma relação rotação-idade seguindo uma lei do tipo  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^{\alpha}$ , onde o parâmetro  $\alpha$  parece estar compreendido entre  $-1/2$  e  $-3/2$ . Tal fato indica que, do ponto de vista qualitativo, tanto a relação de Skumanich (1972) quanto aquela de Barry et al. (1987) se adaptam aos presentes dados; 2) estrelas com idades inferiores a cerca de 2 Giga-anos não obedecem à lei  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^{\alpha}$ . Na realidade, neste intervalo, a rotação aumenta com a idade, seguindo uma lei do gênero  $\langle v_{rot} \rangle \propto t^{\beta}$ , onde  $\beta > 0$ .

É importante sublinhar que estrelas simples e binárias seguem os mesmos comportamentos acima descritos. Entretanto, há um aspecto particular a ser destacado: para idades maiores que cerca de 2 Giga-anos, a rotação média das estrelas binárias é superior à rotação média das estrelas simples. Para idades inferiores a cerca de 2 Giga-anos observa-se o inverso: a rotação média das estrelas binárias é inferior àquelas das estrelas simples.

A Figura 4.4 apresenta o comportamento da relação rotação–idade para estrelas com massa  $M=(1\pm 0.1)M_{\odot}$ . Tal tratamento oferece também a possibilidade de uma análise comparativa entre a rotação da presente sub-amostra e a rotação solar. Esta figura mostra claramente que, a partir da idade solar, cerca de 4.5 Giga–anos, a rotação varia muito pouco com a idade. Pode-se considerar mesmo que a rotação permanece constante com a idade, confirmando, portanto, o resultado obtido por Pace e Pasquini (2004).

Novamente, observa-se uma tendência para uma singularidade em torno de 2.5 Giga–anos, refletindo o mesmo comportamento observado para massas  $M=(1.0\pm 0.25)M_{\odot}$ . A Figura 4.4 mostra também uma clara diferença na relação rotação–idade para estrelas simples e binárias, como já sublinhado anteriormente, para idades superiores a cerca de 2 Giga–anos a rotação média das estrelas binárias mostra-se mais elevada do que a rotação média das estrelas simples.

#### 4.1.1 Tratamento estatístico das distribuições da rotação em função da idade

Vejamos, em ordem de apresentação das figuras, os resultados quanto ao teste do  $\chi^2$ , comparando as duas distintas leis de potência dados por Skumanich (1972) e Barry et al. (1987):

- Figura 4.1: Aplicando o teste do  $\chi^2$  encontramos que  $a_1 = -2.9$  e  $a_2 = 24.3$ , para o perfil que representa a lei de Skumanich, e  $b_1 = -0.1$  e  $b_2 = 21.7$  para a lei de Barry.

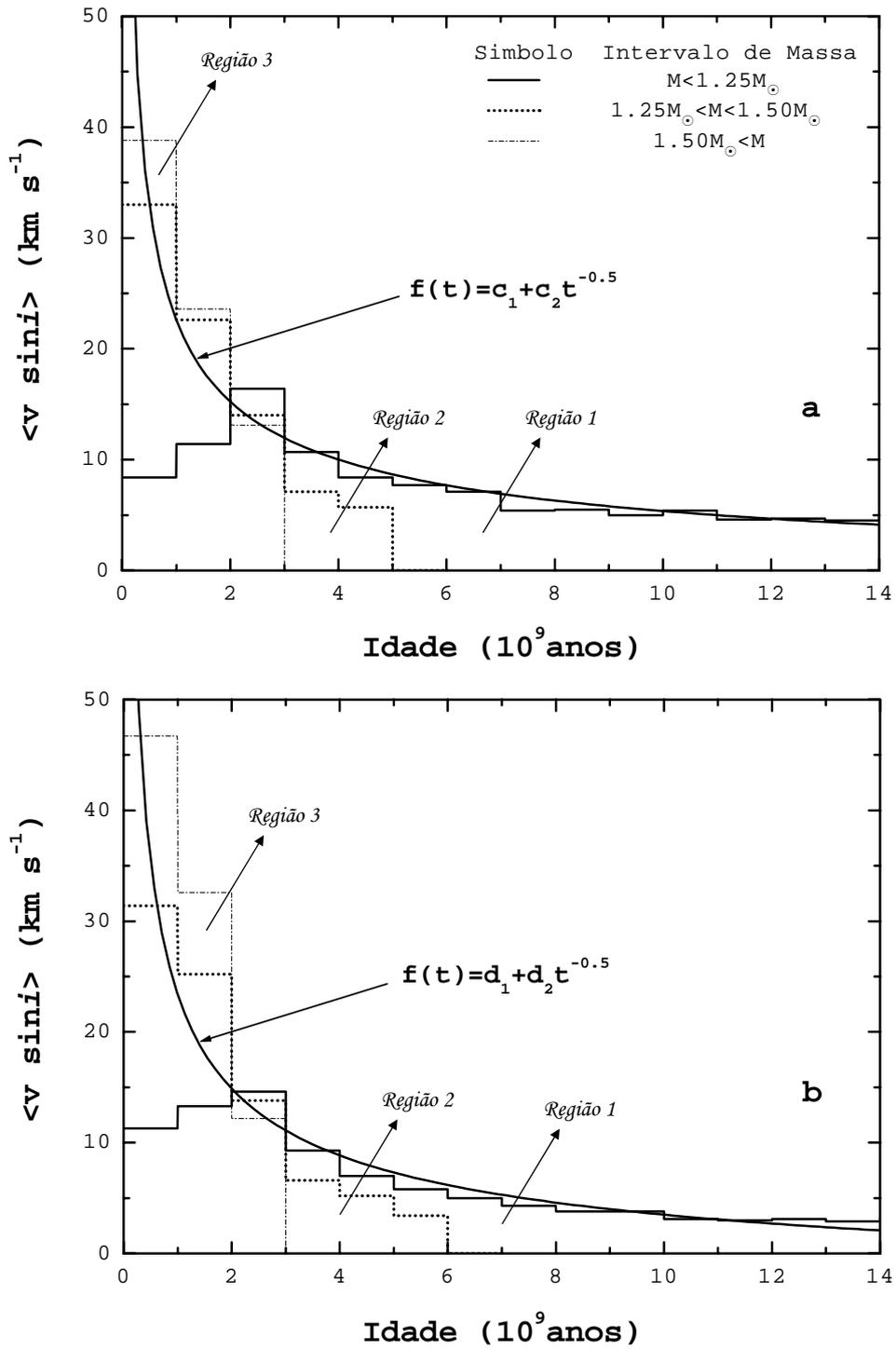


Figura 4.2: A distribuição da velocidade rotacional  $\langle v \sin i \rangle$  por intervalo de idade, para diferentes faixas de massa: (a) painel das estrelas binárias (b) para estrelas simples.

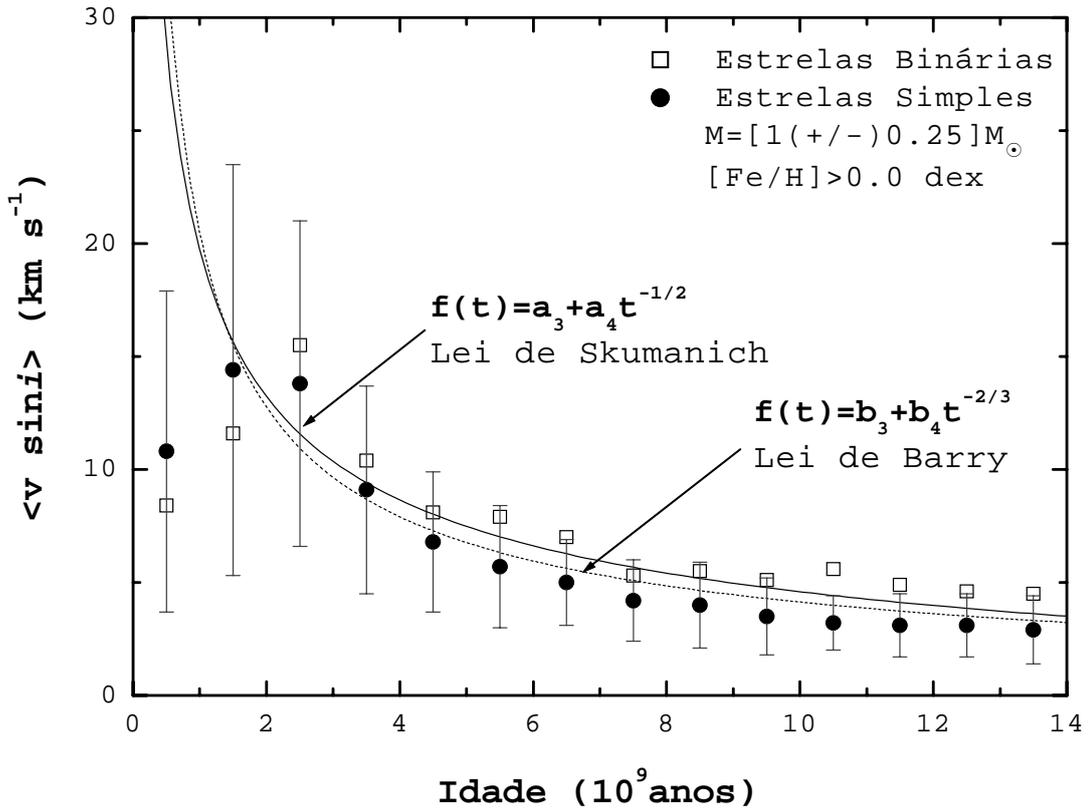


Figura 4.3: A velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$  por intervalo de idade para estrelas com massa  $M = (1 \pm 0.25)M_{\odot}$ . As estrelas simples são representadas pelos círculos sólidos e as estrelas binárias pelos quadrados abertos.

- Figura 4.2: Aplicando o teste do  $\chi^2$  encontramos que  $c_1 = -2.6$  e  $c_2 = 25.2$ , para o perfil que representa a lei de Skumanich para estrelas binárias, e  $d_1 = -5.7$  a  $d_2 = 29.1$  para estrelas simples.
- Figura 4.3: Da mesma forma que na Fig. 4.2, é aplicado o teste do  $\chi^2$  onde encontramos que  $a_3 = -2.4$  e  $a_4 = 22.1$ , para o perfil que representa a lei de Skumanich, e  $b_3 = -0.35$  a  $b_4 = 20.8$  para a lei de Barry.

Além da análise acima aplicamos o teste de Kolmogorov–Smirnov para

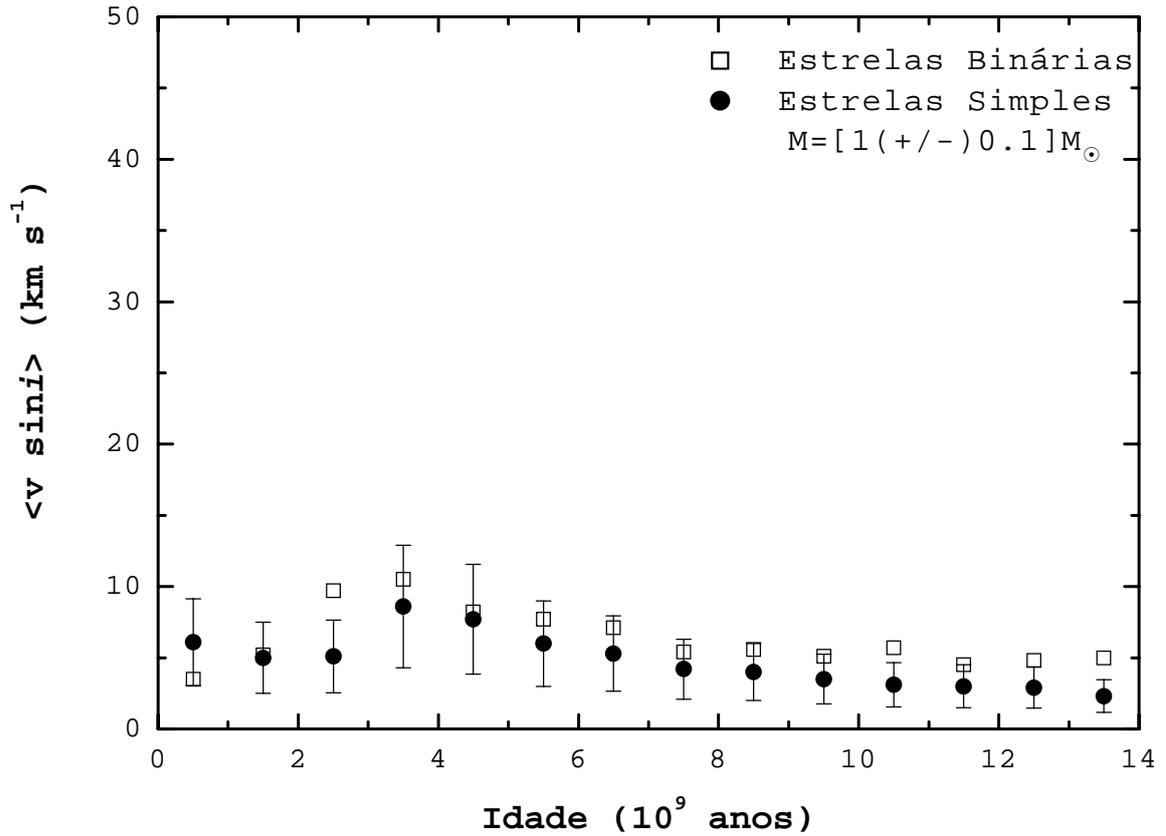


Figura 4.4: A velocidade rotacional média  $\langle v \sin i \rangle$  por intervalo de idade para estrelas com massa  $M=(1\pm 0.1)M_{\odot}$ . As estrelas simples são representadas pelos círculos e as estrelas binárias pelos quadrados.

checar a natureza das distribuições para as estrelas simples e binárias. Os resultados são apresentados na Tabela (4.4), que traz a probabilidade das duas distribuições serem iguais.

Através da Tabela (4.4) observa-se que as altas probabilidades referentes as Figs. (4.1) e (4.2), onde temos toda a amostra sem qualquer ponderação, apontam para a validade das leis de Skumanich (1972) e Barry et al. (1987). Em detrimento a este resultado, as baixas probabilidades referentes à Fig. (4.3) denotam que a ponderação da massa mostra uma tendência para que

Tabela 4.4: Na tabela, LS se refere a curva da Lei de Skumanich e LB a da Lei de Barry.  $P$  representa a probabilidade que as distribuições sejam iguais.

Figura	Curva	P(Binárias)	P(Simples)
	LS	86%	91%
4.1	LB	54%	56%
4.2a	LS	90%	92%
4.2b	LS	86%	87%
	LS	39%	19%
4.3	LB	10%	41%

as leis citadas percam sua validade para idades inferiores a cerca de 2 Giga-  
anos. Estes resultados tornam mais evidente a tendência de que a relação  
rotação *versus* idade dependa da massa estelar e do intervalo de idade.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 5.1 Conclusões

Podemos organizar as conclusões em duas categorias: teórica e observacional.

#### Teórica

- A principal contribuição dada pelos resultados teóricos são as distribuições de velocidade rotacional em função de diversos processos físicos que podem afetar o comportamento do momentum angular em diferentes fases da vida da estrela. Dois aspectos relevantes sobressaem-se desta análise:

1. A relação de Skumanich (1972), assim como aquela de Barry et al. (1987) são casos particulares de um processo evolutivo mais amplo. Assim, espera-se que tais leis empíricas tenham um domínio de validade restrito, o que é confirmado pelos nossos resultados observacionais;

2. É possível, a partir de um tratamento simples, como aquele proposto por Huang (1965, 1967), identificar qual processo físico é mais atuante num determinado estágio da evolução da rotação. Como exemplo, é possível introduzir a contribuição de planetas ou de uma componente estelar no comportamento evolutivo da rotação estelar ou, como consequência, do momentum angular.

## Observacional

Certamente os resultados mais relevantes do presente trabalho estão associados à análise dos dados observacionais que, em particular, pode ser considerada pioneira face à dimensão da amostra estelar e a qualidade das medidas de rotação aqui usadas. Como sublinhado no Capítulo 3 desta Dissertação, nossa base de dados é composta por 10 256 estrelas anãs de tipos espectrais F e G da vizinhança solar, completa em magnitude visual e limitada num volume de 40 pc, apresentando velocidades de rotação tão precisas quanto 1km/s e metalicidades típicas em torno do valor da metalicidade solar.

O primeiro aspecto marcante diz respeito à clara dependência da relação rotação *versus* idade sobre a massa estelar. Tal fato, na realidade, mostra que são necessárias diferentes leis para explicar a dependência da rotação com a idade, embora uma lei do gênero  $v_{rot} \propto t^\alpha$  explique o comportamento da rotação ao longo da maior parte da vida das estrelas. Como mostrado, independente do intervalo de idades, a relação rotação–idade para estrelas da vizinhança solar segue qualitativamente leis empíricas como aquelas

propostas por Skumanich (1972), Barry et al. (1987) ou Soderblom et al. (1991), desde que não sejam levados em conta os efeitos da massa estelar sobre tal relação.

Quando os efeitos da massa são levados em consideração, alguns aspectos marcantes começam a se sobressair:

- Estrelas com massas  $M=(1.0\pm 0.25)M_{\odot}$  apresentam dois comportamentos distintos para a relação rotação–idade: para idades superiores a cerca de 2 Giga–anos tal relação segue, qualitativamente, uma lei de potência como aquela sugerida por Skumanich (1972), Barry et al. (1987) ou Soderblom et al. (1991); entretanto, para estrelas com idades inferiores a cerca de 2 Giga–anos tal lei não é mais obedecida e a rotação mostra uma tendência para um crescimento com a idade.
- Estrelas com massas  $M=(1.0\pm 0.10)M_{\odot}$  apresentam também dois comportamentos distintos porém, diferentemente do caso anterior, a lei de potência  $v_{rot} \propto t^{\alpha}$  no intervalo de idades superiores a 2 Giga–anos não é mais válida. Aqui, a rotação decresce muito lentamente com o aumento da idade, mostrando, particularmente, uma tendência para um decrescimento linear. Tal tendência para uma relação linear entre rotação e idade, embora de forma mais grosseira, é também observada para estrelas com idades inferiores a cerca de 2 Giga–anos porém no sentido inverso, com a rotação diminuindo com a idade.
- Estrelas com massas  $M=(1.0\pm 0.10)M_{\odot}$  apresentam também um outro aspecto importante: A rotação média em torno da idade solar, cerca de 4.5 Giga–anos é cerca de 3 vezes superior à rotação atual do Sol cujo

valor é aproximadamente 2.5 Km/s. Este resultado pode ter fortes consequências, se levarmos em conta de que diferentes estudos tem apontado para a perspectiva de que estrelas com planetas exibiriam rotações inferiores a estrelas que não abrigam sistemas planetários.

Outro resultado relevante a partir dos dados observacionais aqui estudados, diz respeito à natureza da relação rotação *versus* idade, quando comparamos o comportamento apresentado pelas estrelas simples e pelas estrelas binárias. Independente do intervalo de massa, estrelas binárias e simples seguem a mesma lei ou tendência acima descritos, porém com um aspecto marcante: Para as idades superiores a 2 Giga-anos as estrelas binárias apresentam uma tendência para uma rotação média superior às estrelas simples. Para idades inferiores a cerca de 2 Giga-anos os dados mostram uma tendência exatamente para o comportamento inverso: A rotação média das estrelas binárias é inferior àquela para as estrelas simples. Tais fatos nos levam à seguinte reflexões: (i) Uma vez as estrelas formadas o momentum angular médio dentro de um determinado intervalo de idade parece evoluir sem distinção quanto ao status simples ou múltiplo da estrela o que levaria as estrelas simples ou binárias a seguirem uma mesma lei de evolução na relação rotação-idade e (ii) a rotação média mais elevada para estrelas binárias com idades superiores a cerca de 2 Giga-anos poderia ser uma manifestação dos efeitos de marés gravitacionais os quais, para períodos orbitais suficientemente adequados, induzem torques que podem levar a um aumento da rotação estelar.

Finalmente, com base em uma ampla amostra de estrelas anãs de tipos espectrais F e G da vizinhança solar, completa em magnitude visual e limi-

tada em volume, concluímos que a lei de potência  $v_{rot} \propto t^\alpha$  é efetivamente dependente da massa estelar e do intervalo de idade onde a mesma está sendo aplicada. Assim, não é possível usar uma mesma lei para descrever a relação rotação *versus* idade quando a questão da massa estelar e do intervalo de idade são levados em conta. Este aspecto, na realidade, aponta para o fato de que diferentes mecanismos físicos devem influenciar a rotação ao longo da evolução, variando de natureza e intensidade em função da idade e da massa estelar.

## 5.2 Perspectivas

Várias questões permanecem em aberto dentro do estudo das relações rotação *versus* idade estelar. A primeira delas diz respeito ao domínio de validade da relação  $v_{rot} \propto t^\alpha$ , em particular sobre o espectro de valores que pode assumir o parâmetro  $\alpha$ . Um sólido teste para esta questão é a utilização de períodos de rotação, em vez do parâmetro  $v \sin i$ . Este último impõe a análise em função de médias, enquanto que o período de rotação ofereceria uma análise sem a presença de vínculos devido aos efeitos do  $\sin i$ . A missão especial *CoRoT*, que oferecerá medidas diretas do período de rotação estelar apresenta-se como um ótimo laboratório de trabalho para tal questão.

Uma análise comparativa entre estrela com planetas e estrelas sem planetas é um outro teste importante, podendo informar como a presença de sistemas planetários pode afetar o parâmetro  $\alpha$ .

Uma outra questão importante é o tratamento da relação rotação *versus*

idade de uma ampla amostra de estrelas binárias com períodos orbitais conhecidos. Através da quantificação do nível de sincronização em cada sistema será possível se estabelecer a real origem de uma tendência para diferenças entre a rotação média das estrelas simples e das estrelas binárias, como demonstrado na presente amostra.

Finalmente, é necessário se analisar a relação rotação-idade para um espectro mais amplo de valores de metalicidade do que aquele aqui utilizado. Tal fato poderá nos mostrar se estrelas de diferentes populações seguem as mesmas leis evolutivas para rotação.

# Apêndice A

## Extrato do Catálogo de *Geneva–Copenhagen*

Os extratos a seguir se referem ao catálogo de *Geneva–Copenhagen*. Foram escolhidas algumas estrelas, separadas em binárias e simples, com características diferentes marcantes, tais como, velocidade, massa e tipo spectral, devido a dimensão da amostra. As estrelas estão identificadas pelo respectivo número HD. A segunda coluna contém o tipo spectral (TE) obtidos do catálogo HIPPARCOS (ESA<sup>1</sup>, 1997). Na terceira coluna temos a velocidade rotacional projetada  $v \sin i$ . Na quarta coluna a idade em  $10^9$  anos. Na quinta e sexta colunas temos a massa (M) e a metalicidade ([Fe/H]). Em seguida, as colunas seguintes trazem a magnitude visual aparente ( $m_v$ ) e o índice de cor b–y de Strömgen. Por último, temos as colunas que se referem à paralaxe e o  $\log$  da temperatura efetiva ( $\log T_e$ ).

---

<sup>1</sup>European Space Agency.

Tabela A.1: Extrato contendo **Estrelas Binárias** da nossa amostra e seus respectivos parâmetros.

HD	TE	$v \sin i$	Idade	M	[Fe/H]	$m_v$	b-y	plx	$\log T_e$
		km/s	$10^9$ anos	$M_\odot$	dex	mag		mas	K
HD 60063	F0	110	0.6	1.26	-0.34	6.961	0.245	20.3	3.834
HD 32306	F0	100	0.8	2.07	0.15	6.632	0.236	8.4	3.849
HD 14562	F0	60	0.9	1.54	0.14	7.697	0.242	6.3	3.844
HD 7471	F0	70	0.9	1.92	-0.04	7.221	0.237	6.5	3.846
HD 135631	F0	80	0.9	1.93	0.29	7.135	0.223	7.9	3.857
HD 71499	F0	70	0.9	1.95	0.08	6.831	0.223	8.2	3.854
HD 200370	F0	60	1	1.78	0.16	7.467	0.243	5.2	3.846
HD 214132	F0	70	1	1.79	0.27	7.021	0.252	6.6	3.854
HD 121444	F0	55	1	1.75	0.02	7.765	0.237	6.8	3.847
HD 2795	F0	70	1	1.46	0	8.1	0.241	9.2	3.842
HD 185580	F0	60	1.1	1.79	0.04	8.071	0.258	5.4	3.835
HD 117299	F0	10	1.1	1.68	-0.04	7.95	0.22	6.5	3.854
HD 55700	F0	90	1.1	1.6	-0.01	7.537	0.228	8.9	3.85
HD 8528	F0	120	1.2	1.68	-0.2	8.162	0.228	6.3	3.85
HD 121215	F0	55	1.2	1.55	-0.02	7.8	0.235	6.7	3.846
HD 222456	F0	70	1.2	1.52	-0.14	8.345	0.236	7.1	3.855
HD 28771	F0	50	1.3	1.71	-0.08	7.821	0.307	6.5	3.819
HD 211461	F0	50	1.4	1.45	0.03	7.653	0.266	6.9	3.829
HD 191317	F0	80	1.4	1.47	-0.27	8.262	0.261	8.1	3.853
HD 192017	F0	80	1.4	1.49	-0.17	8.06	0.229	8.1	3.847
HD 755	F0	70	1.4	1.56	-0.08	7.194	0.253	10.9	3.836
HD 78765	F0	60	1.4	1.45	-0.08	7.619	0.245	11.1	3.839
HD 39224	F0	110	1.5	1.56	-0.15	7.459	0.248	9.2	3.836

Tabela A.2: Extrato contendo **Estrelas Simples** da nossa amostra e seus respectivos parâmetros.

HD	TE	$v \sin i$	Idade	M	[Fe/H]	$m_v$	b-y	plx	$\log T_e$
		km/s	$10^9$ anos	$M_\odot$	dex	mag		mas	K
HD 5096	F2V	70	0.2	1.42	0	7.941	0.26	7.3	3.842
HD 100043	F2V	80	0.3	1.47	0.08	7.068	0.233	15.6	3.845
HD 56325	F2	20	0.4	1.24	-0.11	8.412	0.278	11.6	3.818
HD 129417	F3V	20	0.4	1.55	0.24	8.149	0.292	10.1	3.841
HD 199872	F0	110	0.7	1.36	-0.18	7.992	0.234	11.1	3.844
HD 195231	F2	90	0.8	1.49	-0.05	7.393	0.243	12.8	3.853
HD 98651	F3V	80	0.8	1.56	0.21	7.602	0.25	11.2	3.841
HD 113674	F0	100	0.9	1.65	0.22	8.352	0.233	5.5	3.851
HD 88020	F0	100	0.9	1.75	0.25	8.195	0.228	6.5	3.855
HD 71252	F0	110	0.9	1.93	0.22	6.939	0.224	8.7	3.857
HD 196195	F2	90	0.9	1.86	0.18	7.01	0.226	9.4	3.855
HD 156484	F2	110	0.9	1.8	0.2	7.854	0.239	5.2	3.862
HD 216419	F2	110	0.9	1.53	0	7.711	0.251	6.9	3.855
HD 81409	F2	80	0.9	1.93	0.25	7.284	0.227	6.6	3.856
HD 123544	F2III	90	0.9	1.65	0.23	8.271	0.261		3.849
HD 46601	F2III	100	0.9	2.01	0.14	7.496	0.246	5.2	3.844
HD 194595	F2IV	110	0.9	1.86	0.15	8.283	0.227	7	3.854
HD 33098	F2IV	120	0.9	1.97	0.15	8.05	0.245	4.9	3.844
HD 112618	F3V	70	0.9	1.56	0.04	8.058	0.256	8.6	3.854
HD 85030	F5	100	0.9	2.09	0.3	7.901	0.292	4.2	3.823
HD 15579	F2	80	1	1.82	0.02	7.012	0.229	8.6	3.851
HD 211968	F2IV	80	1	1.91	-0.01	8.405	0.248	5.2	3.841
HD 92800	F2V	70	1	1.41	-0.16	7.991	0.225	10.1	3.848
HD 70499	F2	110	1.2	1.68	-0.01	6.776	0.251	11.5	3.838
HD 16199	F2	130	1.2	1.74	-0.11	7.436	0.267		3.829
HD 175384	F2V	70	1.2	1.41	-0.19	8.268	0.253	9.1	3.849

# Referências Bibliográficas

- [1] Chandrasekhar, S. & Münch, G. 1950, ApJ, 111, 142.
- [2] Collins, G. W. 1963, ApJ, 138, 1134.
- [3] Collins, G. W. 1965, ApJ, 142, 265
- [4] Barry, D. C., Crowell, R. H., Hege, E. K. 1987, ApJ, 315, 264.
- [5] Baranne, A., Mayor, M., & Poncet, J. L. 1979, VA, 23, 279.
- [6] Benz, W., & Mayor, M. 1980, A&A, 93, 235.
- [7] Benz, W., & Mayor, M. 1984, A&A, 138, 183.
- [8] De Medeiros, J. R., & Mayor, M. 1999, A&A, 139, 433.
- [9] De Medeiros, J. R., Da Silva, J. R. P., & Maia, M. R. G. 2002, ApJ, 578, 943.
- [10] Dicke, R. H. 1970, Ann. Rev. Astr. Ap., 8, 297.
- [11] Eddington, A. 1926, *The Internal Constitutions of the Stars* (New York: Dover Publications).
- [12] Endal, A. S., & Sofia, S. 1976, ApJ, 210, 184.

- [13] Frémat, Y., Zorec, J., Hubert, A.–M., Floquet, M. 2005, *A&A*, 440, 305.
- [14] Faulkner, J., Roxburgh, I. W., Strittmatter, P. A. 1968, *ApJ*, 151, 203.
- [15] Garrison, R. F., 1980, *Bull. AAS*, 12, 93.
- [16] Hardorp, J. 1978, *Astr. Ap.*, 63, 383.
- [17] Huang, S.–S., 1965, *ApJ*, 141, 985.
- [18] Huang, S.–S., 1967, *ApJ*, 150, 229.
- [19] Kraft, R. P. 1967, *ApJ*, 150, 551.
- [20] Kosovichev, A. G., Shou, J., Scherrer, P. H. et al., 1997, *Internal Structure and Rotation of the Sun*, ed. A.G.D. Philip & D. W. Latham (Schenectady, New York: L. Davis Press) *IAU Coll.*, 181, 203.
- [21] Latham, D. W. 1985, in *Stellar Radial Velocities*, ed. A.G.D. Philip & D. W. Latham (Schenectady, New York: L. Davis Press) *IAU Coll.*, 88, 21.
- [22] Mayor, M. 1985, in *Stellar Radial Velocities*, ed. A.G.D. Philip & D. W. Latham (Schenectady, New York: L. Davis Press) *IAU Coll.*, 88, 35.
- [23] Nordström, B., Mayor, M., Andersen, J., et al. 2004, *A&AS*, 418, 989.
- [24] Nordström, B., Andersen, J., & Mayor, M., 2005, *ESA SP-576: The Three–Dimensional Universe with Gaia*, ed. C. Turon, K.S. O’Flaherty & M. C. A. Perreyman, p. 183.

- [25] Pasquini, L., De Medeiros, J. R., Girardi, L. 2000, *A&A*, 361, 1011.
- [26] Pace, G., & Pasquini, L. 2004, *A&A*, 426, 1021.
- [27] Pizzo, V., Schwenn, R., Marsch, E., Rosenbauer, H., Mühlhäuser, K.-H., & Neubauer, F. M., 1983, *ApJ*, 271, in press.
- [28] Priest, E. R., & Pneuman, G. W., 1974, *Solar Phys.*, 34, 231.
- [29] Roxburgh, I. W., 1983, *Stellar Winds and Spindown in Solar Type Stars*, ed. A.G.D. Philip & D. W.
- [30] Roxburgh, I. W. 2004, *A&A*, 428, 171. Latham (Schenectady, New York: L. Davis Press) *IAU Coll.*, 102, 449.
- [31] Schatzman, E. 1962, *AnAp*, 25, 18.
- [32] Schuster, J. A., & Nissen, P. E., 1989, *A&A*, 221, 65
- [33] Silva, A. V. R. 2006 *Nossa Estrela: O Sol* (São Paulo, SP.: Editora Livraria da Física e Sociedade Brasileira de Física).
- [34] Soderblom, D. R. 1983, *ApJ*, 53, 1.
- [35] Soderblom, D. R., Duncan, D. K., Johnson, D. R. H. 1991, *ApJ*, 375, 722.
- [36] Skumanich, A. 1972, *ApJ*, 171, 565.
- [37] Skumanich, A., Smythe, C., & Frazier, E. N., 1975, *ApJ*, 200, 747.
- [38] Skumanich, A., & Eddy, J. 1981, in *Solar Phenomena in Stars and Stellar System*, ed. R. M. Bonnet and A. K. Dupree (Dordrecht: Reidel), p. 349.

[39] Smith, M. A., 1979, *Pub. A. S. P.*, 224, 584.

[40] Struve, O. 1945, *Pop. Astr.*, 53, 202.

[41] von Zeipel, H. 1924, *MNRAS*, 84, 665.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)