



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**

**CAMPUS AVANÇADO DE NATAL**

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**MARIANA DOLORES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO SOBRE OS MOMENTOS DE DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DE  
ROTAÇÃO DE ESTRELAS DO TIPO SOLAR NA PRÉ-SEQUÊNCIA PRINCIPAL**

**NATAL**

**2024**

**MARIANA DOLORES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO SOBRE OS MOMENTOS DE DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DE  
ROTAÇÃO DE ESTRELAS DO TIPO SOLAR NA PRÉ-SEQUÊNCIA PRINCIPAL**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado e Ciência e Tecnologia, como pré-requisito à conclusão da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso.

**Orientador: Prof. Dr. Bráulio Batista Soares**

**NATAL**

**2024**

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

**Catálogo da Publicação na Fonte.**  
**Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

O48e Oliveira, Mariana Dolores de  
ESTUDO SOBRE OS MOMENTOS DE  
DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DE ROTAÇÃO DE  
ESTRELAS DO TIPO SOLAR NA PRÉ-SEQUÊNCIA  
PRINCIPAL. / Mariana Dolores de Oliveira. - Natal, 2024.  
47p.

Orientador(a): Prof. Dr. Bráulio Batista Soares.  
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Astrofísica. 2. Estatística. 3. Vento estelar. 4. Perfil  
de rotação. 5. Evolução estelar. I. Soares, Bráulio Batista.  
II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III.  
Título.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

**MARIANA DOLORES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO SOBRE OS MOMENTOS DE DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DE  
ROTAÇÃO DE ESTRELAS DO TIPO SOLAR NA PRÉ-SEQUÊNCIA PRINCIPAL**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado e Ciência e Tecnologia, como pré-requisito à conclusão da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Bráulio Batista Soares (Orientador)

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN

---

Prof. MSc Dácio Michel da Souza Cruz

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

---

Prof. Dr. Leonardo Linhares Oliveira

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN

À minha tia, Lêda Maria, que além de tia foi minha mãe. e que me permitiu ver o mundo com outros olhos e que tanto me engrandece e me inspira, À todos aqueles que admiram os mistérios do Universo. DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo privilégio da vida, por ter me concedido forças e saúde para superar as dificuldades e por permitir alcançar essa grande realização de construir e desenvolver um trabalho acadêmico. Quantas lutas, quantas dores... mas Ele tem sido fiel e sua paz excede a todo o entendimento.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me ajudaram, me apoiaram, incentivaram, acompanharam ou simplesmente me compreenderam em todo o percurso até aqui.

A minha, Lêda Maria, que tanto me apoia em oração quanto com as atividades de casa, que intercede por mim e acaba me auxiliando, sugestões e ideias de como melhor direcionar o meu trabalho, e a minha avó, Maria da Soledade (*in memoriam*). Amo vocês.

Ao meu querido orientador, **Bráulio Batista Soares**, pela indicação de bibliografias e pelo empenho durante todo este trabalho e que gentilmente disponibilizou tempo, atenção e não permitiu minha desistência. Que as bênçãos do Senhor permaneçam sobre sua vida.

Aos meus amigos que me auxiliaram e compreenderam a minha ausência, aos colegas de turma e de curso que, além da amizade, me permitiram construir uma família.

Aos professores e coordenadores do curso de Ciência e Tecnologia do Campus Avançado de Natal, que sempre nos direcionaram na construção do produto educacional.

Ao astrônomo Carl Sagan (*in memoriam*), que me possibilitou enriquecer a curiosidade de conhecer e apaixonar-me cada vez mais pela astronomia e astrofísica.

A Deus seja a honra, a glória e o domínio pelos séculos dos séculos. Amém.

“Se a sucessão de estrelas fosse infinita, o fundo do céu nos apresentaria uma luminosidade uniforme, como a exibida pela galáxia – uma vez que não poderia haver absolutamente nenhum ponto, em todo esse fundo, em que não existiria uma estrela. Nessas condições, o único modo como poderíamos compreender os vazios que nossos telescópios encontram em inúmeras direções seria, portanto, a suposição de que a distância do fundo invisível é tão imensa que nenhum raio de luz vindo dele conseguiu nos atingir até agora.” Edgar Allan Poe em Eureka: A Prose Poem.

“Eu observei o mais alto planeta como sendo um corpo triplo”. Galileu Galilei

“Ele [Saturno] é circundado por um anel fino e plano, que não o toca em lugar algum, e é inclinado em relação à eclíptica”. Christiaan Huygens

“... quando contemplamos os anéis de um ponto de vista puramente científico, eles se tornam os corpos mais interessantes dos céus...”.

“... os anéis devem ser compostos por partículas desconexas; estas podem ser líquidas ou sólidas, mas têm que ser independentes. O sistema completo de anéis deve, portanto, ser formado ou por uma série de vários anéis concêntricos... ou então uma confusa multidão de partículas em órbita, não organizadas em anéis, e continuamente se chocando umas com as outras”. James Clerk Maxwell

“O nitrogênio em nosso DNA, o cálcio em nossos dentes, o ferro em nosso sangue, o carbono em nossas tortas de maçã foram feitos nos interiores de estrelas em colapso. Somos feitos de material estelar.” – Carl Sagan, Cosmos.

E dar-vos-ei pastores segundo o meu coração, os quais vos apascentarão com ciência e com inteligência (Jeremias 3:15). Acrescentai à vossa fé a virtude, e à virtude a ciência, e à ciência a temperança (2 Pedro 1: 5,6).

## RESUMO

A rotação estelar é um parâmetro físico importante para a produção de energia de uma estrela e, por causa disso, para sua evolução. O reverso também é fato: a produção de energia e a evolução de uma estrela contribuem para as mudanças em sua velocidade de rotação. Por sua vez, a produção de energia ao longo do tempo, a atividade magnética, a composição química (em especial, a metalicidade), a estrutura interna além da interação com o disco circumestelar proporcionam mudanças no momentum angular da estrela. Todos esses fenômenos inerentes às estrelas jogam um papel preponderante nas distribuições observadas de suas velocidades de rotação, de tal maneira que a informação sobre tais fenômenos devem ficar subjacentes em suas distribuições de probabilidades. A fim de tentar extrair tal informação, este projeto visa estudar a rotação estelar por meio de suas distribuições estatísticas, distribuições de probabilidades, momentos e quantis destas distribuições. Também visa estudar a evolução das taxas rotacionais observadas em diversos conjuntos de estrelas quando estas são agrupadas segundo algum parâmetro físico comum. Para este intuito, serão levantadas amostras significativas, dados de velocidades de rotação ou de períodos rotacionais das mais diversas estrelas.

**Palavras-chave:** Astrofísica; Estatística; Vento estelar; Perfil de rotação; Evolução estelar.

## **ABSTRACT**

Stellar rotation is an important physical parameter for a star's energy production and, because of that, for its evolution. The reverse is also true: the energy production and evolution of a star influenced changes in its rotational speed. In turn, the production of energy over time, the magnetic activity, the chemical composition (in particular, the metallicity), the internal structure, in addition to the interaction with the circumstellar disk, provided changes in the angular momentum of the star. All these phenomena inherent to the stars play a preponderant role in the observed distributions of their rotation speeds, in such a way that the information about such phenomena must be underlying in their probability distributions. In order to try to extract such information, this project aims to study stellar rotation through its statistical distributions, probability distributions, moments and quantiles of these distributions. It also aims to study the evolution of rotational rates observed in different sets of stars when they are grouped according to some common physical parameter. For this purpose, examples of data on rotational speeds or rotational periods of the most diverse stars will be considered.

**Keywords:** Astrophysics; Statistic; Stellar wind; Rotation profile; Stellar evolution

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> A correlação entre idade, período e massa.....	11
<b>Figura 2</b> – Conceito artístico do Telescópio Kepler. ....	13
<b>Figura 3</b> - Vista artística do satélite CoRoT .....	14
<b>Figura 4</b> – Gaia mapeando as estrelas da Via Láctea .....	15
<b>Figura 5:</b> Algoritmo utilizado no <i>RStudio</i> .....	23
<b>Figura 6:</b> Área de trabalho do <i>RStudio</i> . ....	24
<b>Figura 7:</b> Diagrama HR. ....	25
<b>Figura 8:</b> Ilustração do processo de formação estelar.. ....	26
<b>Figura 9:</b> Imagens de discos protoplanetários. ....	28

## LISTA DE TABELAS

<b>Equação 01</b> – Formula da Média Aritmética .....	19
<b>Equação 02</b> – Formula do Desvio Padrão .....	19
<b>Equação 03</b> – Formula da Variância .....	20
<b>Equação 04</b> – Formula da Assimetria .....	20
<b>Equação 05</b> – Formula da Curtose.....	21
<b>Equação 06</b> – Função Densidade de Probabilidade.....	21

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Todos os Aglomerados (Tabela).....	32
<b>Tabela 2</b> – Aglomerado NGC 1976 (TabelaNGC1976).....	32
<b>Tabela 3</b> - Aglomerado IC 2602 (TabelaIC2602) .....	32
<b>Tabela 4</b> – Aglomerado IC 2391 (TabelaIC2391).....	33
<b>Tabela 5</b> – Aglomerado Alpha Persei (TabelaAlphaPersei) .....	33
<b>Tabela 6</b> – Aglomerado Blanco 1 (Tabela Blanco).....	33
<b>Tabela 7</b> – Aglomerado Pleiades (Tabela Pleiades) .....	33
<b>Tabela 8</b> – Aglomerado NGC 6475 (TabelaNGC6475).....	34
<b>Tabela 9</b> – Aglomerado NGC 7092 (TabelaNGC7092).....	34
<b>Tabela 10</b> – Aglomerado Coma Ber (TabelaComaBerenices) .....	34
<b>Tabela 11</b> – Aglomerado NGC 2632 (TabelaNGC2632) .....	34
<b>Tabela 12</b> – Aglomerado Hyades (TabelaHyades).....	35
<b>Tabela 13</b> – Aglomerado NGC 0752 (TabelaNGC0752).....	35
<b>Tabela 14</b> – Aglomerado NGC 2682 (TabelaNGC2682).....	35

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	18
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	23
3.1 Introdução à Rotação Estelar na Pré-sequência Principal .....	24
3.2 Distribuições de Frequência da Rotação .....	30
3.3 Interações com Discos Protoplanetários e Modelagem de Discos Protostelares.....	30
3.4 Evolução Magnética e Atividade Estelar .....	31
3.5 Abordagens Observacionais e Modelagem Teórica.....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	32
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	37
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39
<b>GLOSSÁRIO</b> .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

Os antigos observadores, incluindo culturas como a Babilônia e a Grécia, registraram observações astronômicas sem o auxílio de telescópios. (Damineli et al., 2011) Isso inclui o movimento dos planetas, a posição das estrelas e a aparente rotação do céu noturno. A invenção do telescópio por Galileu Galilei permitiu observações mais detalhadas do sistema solar. (Damineli et al., 2011) Johannes Kepler desenvolveu leis que descrevem o movimento dos planetas, enquanto Isaac Newton formulou as leis do movimento e a lei da gravidade, que são fundamentais para a compreensão da mecânica celeste. (Silva, 2008)

William Herschel (1738-1822), usando telescópios mais avançados, explorou a natureza das estrelas e descobriu a existência de galáxias além da Via Láctea. Durante esse período, a óptica e a instrumentação astronômica avançaram. (Betzler, 2007) O século XX testemunhou avanços significativos na compreensão da física estelar e extragaláctica. Edwin Hubble demonstrou que outras galáxias existem além da Via Láctea, e o universo é em expansão. (Bagdonas; Zanetc; Gurgel, 2017) A teoria da relatividade de Einstein influenciou a compreensão da gravidade em escalas cósmicas. (Rennn, 2004)

Na fase inicial da vida estelar, conhecido como pré-sequência principal, grandes nuvens de gás e poeira se contraem devido a gravidade, formando assim uma protoestrela. Com o tempo, a pressão e a temperatura no núcleo aumentam até que atinja o equilíbrio, chamado de Equilíbrio Hidrostático, onde ocorre a fusão nuclear. (Damineli et al., 2011)

A pré-sequência principal está localizada no canto superior direito do diagrama HR, que relaciona a luminosidade e temperatura das estrelas. Nessa fase, as estrelas da pré-sequência principal possuem uma temperatura na superfície, menor do que possuem em sua fase adulta, mas o raio e a luminosidade deve-se somente a irradiação de calor via convecção do seu núcleo em direção a superfície, sendo maiores do que em seu futuro. Passado alguns milhões de anos, o centro da estrela da pré-sequência principal, começa a atingir uma temperatura de aproximadamente  $10^7$  K, assim começando as primeiras reações de fusão nuclear do hidrogênio. A partir desse processo, as estrelas são consideradas oficialmente estrelas e, pertencentes à sequência principal do Diagrama HR. (Mühlbeier, 2017)

A astronomia incorpora observações de diferentes mensageiros, como ondas gravitacionais, neutrinos e raios cósmicos. A inteligência artificial também desempenha um

papel importante no processamento e análise de grandes volumes de dados astronômicos. A astrofísica continua evoluindo rapidamente, impulsionada por avanços tecnológicos, novas teorias e uma abordagem multidisciplinar para a compreensão do universo. A exploração espacial, missões interplanetárias e o desenvolvimento de instrumentos mais avançados continuam a moldar a pesquisa astrofísica contemporânea. (Milone *et al.*, 2018)

O vento estelar seria a causa principal da perda do momento angular da superfície estelar, mesmo sendo uma quantidade ínfima de partículas. Os ventos estelares (fluxo de gás ejetado da atmosfera superior de uma estrela) são um fenômeno comum nas estrelas. As estrelas perdem massa em alguma época de suas vidas, e o estudo desse fenômeno é um dos principais aspectos da astrofísica moderna. Os ventos estelares podem ser caracterizados por um processo contínuo de perda de massa, sendo assim, os ventos estelares nada mais são do que atmosferas das estrelas em expansão. (Maciel, 2005).

O processo do dínamo estelar gera campos magnéticos que resultam em atividades como aquecimento coronal, ventos estelares, e ejeções de massa coronal. Essa atividade tende a diminuir ao longo da vida de uma estrela, mas a rotação estelar a mantém alimentada por meio do dínamo.

Essa autorregulação influencia sobremaneira a relação entre rotação e idade (ver Figura 1). As estrelas de aglomerados abertos mostram rotações que seguem a lei de Skumanich (Freitas, 2006), mas também alguns casos que não seguem tal lei. Isso quer dizer que os mecanismos que influenciam na rotação não têm a mesma eficiência ao longo da vida da estrela.

Modelos teóricos tem tentado explicar essa evolução rotacional baseando-se em prescrições para o torque do vento estelar magnetizado além das condições iniciais da rotação na pré-sequência principal e dos mecanismos de acoplamento disco-estrela e de acoplamento núcleo-envoltória. Rotação estelar tem forte relação com a massa e como estágio evolutivo.

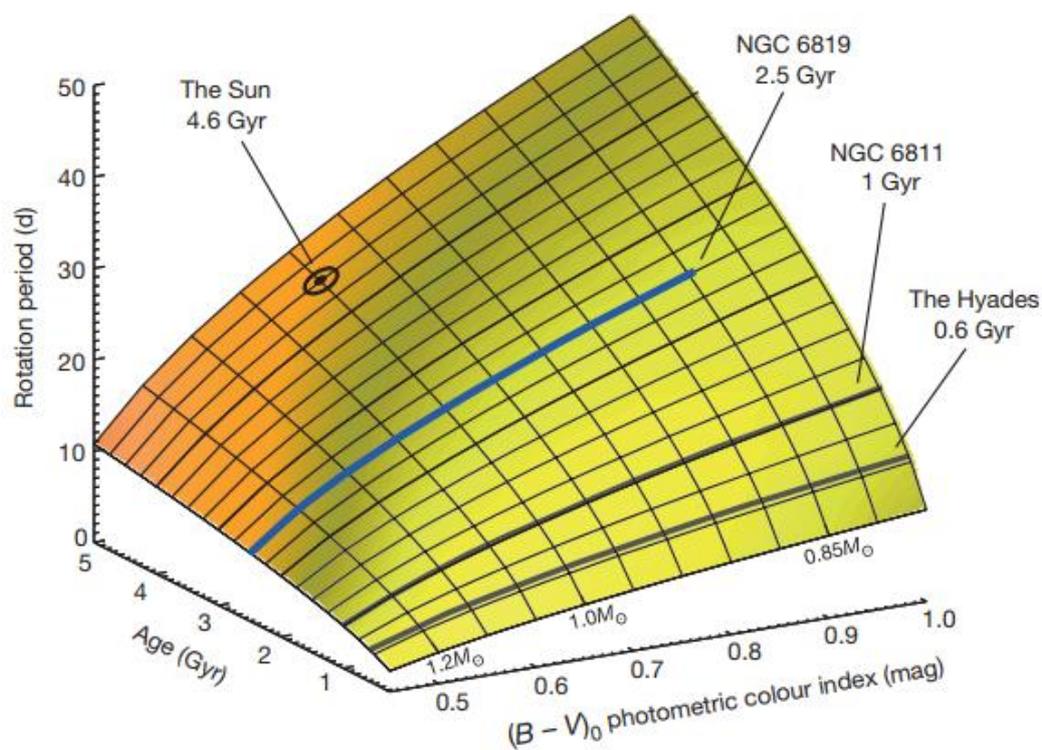
As estrelas perdem momento angular com o tempo, e a rotação é um indicador da idade estelar, chamado de girocronologia (Boscatti, 2022). Diferenças estruturais entre estrelas quentes e frias resultam em distribuições de períodos de rotação dependentes da massa. Para compreender as populações de rotação estelar, é crucial ter um grande conjunto de medidas velocidade de rotação de diferentes aglomerados estelares, incluindo período de

rotação e velocidade rotacional. Isso ajuda a classificar as populações rotacionais e prever os períodos de rotação em modelos de evolução estelar.

Segundo Boscatti (2022), a girocronologia é:

{...} Outro método de medição da idade da estrela, é a girocronologia, criado por Skumanich (Skumanich et al. 1972), usando apenas 3 aglomerados e o Sol (ver Figura 1), para estabelecer a correlação idade-rotação, amplamente conhecida como girocronologia. Anos mais tarde, outros trabalhos incluíram a massa como um parâmetro importante para calibrar a girocronologia. Nãoobstante, devido ao fato da girocronologia ter sido calibrada usando como base aglomerados jovens, além do Sol, o mesmo só se aplica às estrelas de idades próximas à do Sol, isto é, 4,6 bilhões de anos (ver Figura 1). A girocronologia é um método que não depende de modelos de evolução estelar para calcular idades. Precisa-se simplesmente medir a rotação e a massa (ou cor) de uma estrela e através de um ajuste (previamente XVIII Jornada de Iniciação Científica - 2022 estabelecido no plano idade-rotação-massa), pode-se obter sua idade.

**Figura 1**



Fonte: Meibom et al. (2015)

A imagem acima retrata a correlação entre período de rotação em dias (a esquerda da imagem), idade (canto inferior esquerdo da imagem) e massa (canto inferior direito), dos aglomerados abertos NGC 6819, NGC 6811, Hyades e o Sol. Os períodos de rotação (movimento dos objetos em torno do seu eixo) dos aglomerados abertos e o sol, mostrados na imagem, são dados em dias, e os períodos de rotação mostrados na imagem a cima, são,  $\pm 30$  dias,  $\pm 16$  dias,  $\pm 10$  dias e  $\pm 28$  dias, respectivamente. Já as idades, são dadas em giga-ano (*Gyr*), – um giga-ano equivale a um bilhão de anos ( $10^9$ ) –  $2.5 \text{ Gyr}$ ,  $1 \text{ Gyr}$ ,  $0.6 \text{ Gyr}$  e  $4.6 \text{ Gyr}$ , respectivamente. A massa é representada na imagem pelo índice de cor (B-V), e as massas dos aglomerados estelares são dadas em massa solar (igual a massa do Sol -  $M_0$ ), e as massas deles são  $\pm 0.83 M_0$ ,  $\pm 0.77 M_0$  e  $\pm 0.76 M_0$ .

Mas o que são aglomerados abertos? Segundo Murphy (2023) aglomerados abertos são:

Aglomerados abertos são agrupamentos de estrelas que contêm de algumas centenas a alguns milhares de estrelas. Eles se formam em nuvens gigantes de gás molecular, e suas estrelas têm aproximadamente a mesma idade. Embora as estrelas em um aglomerado aberto tenham se formado juntas a partir do mesmo material, elas não permanecem gravitacionalmente ligadas ao longo do tempo e se espalham, espalhando suas estrelas por toda parte. Por não serem gravitacionalmente ligados, esses aglomerados podem ter formas aleatórias e irregulares.

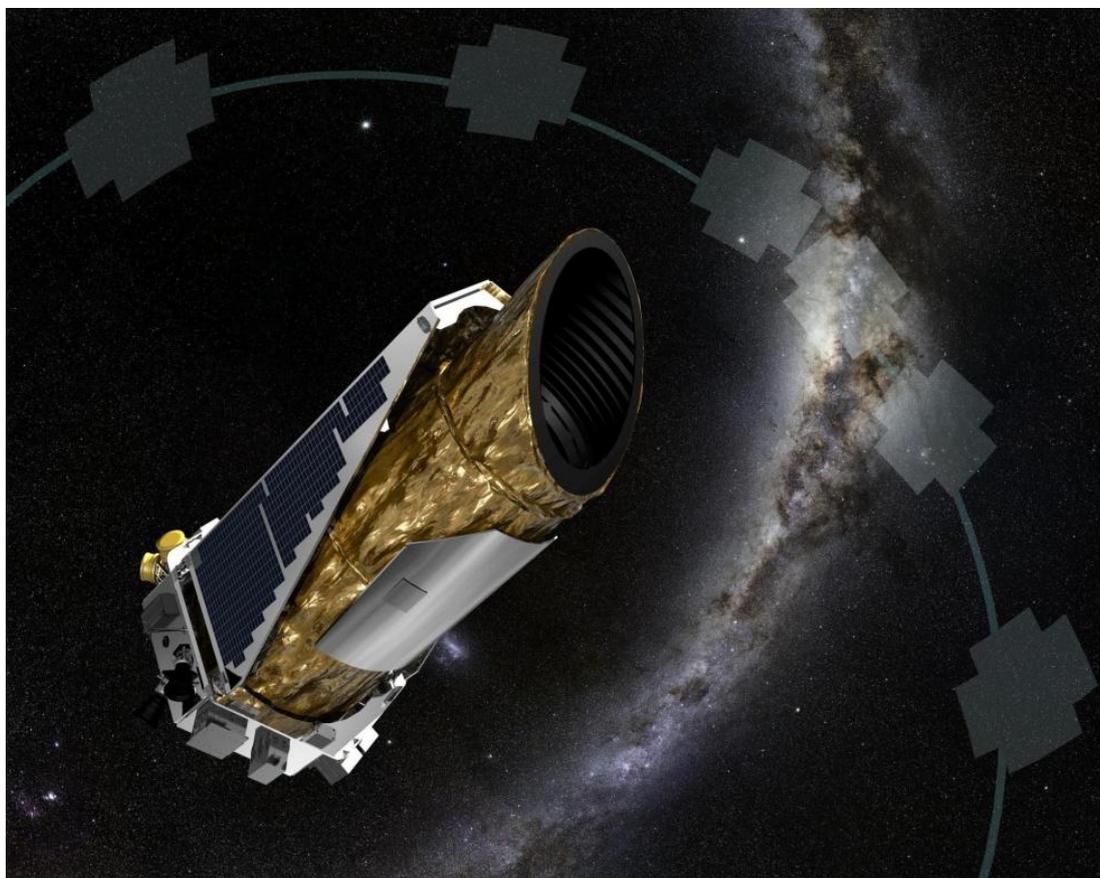
Apenas na nossa galáxia, a Via Láctea, já foram detectados mais de 1100 aglomerados abertos, e estimasse que existam muito mais.

Nos últimos anos, o estudo da rotação estelar cresceu significativamente devido a medições de período rotacional de mais de 100.000 estrelas, abrangendo diversas idades, massas e metalicidades, de missões como Kepler, CoRoT e Gaia. Com um conjunto estatisticamente relevante de medidas, é possível investigar a rotação e suas distribuições estatísticas com precisão.

A metalicidade é a soma das abundâncias de todos os elementos químicos exceto hidrogênio e hélio, e que se representa por  $Z$  (percentagem da contribuição desses elementos químicos para a massa da estrela). Assim uma estrela com uma metalicidade baixa será em princípio mais antiga que uma de metalicidade elevada. (Fernandes, 2024)

O telescópio espacial Kepler (ver figura 2) foi a primeira missão de caça a planetas da NASA, designada para procurar numa parte da Via Láctea planetas do tamanho da Terra orbitando estrelas fora do nosso sistema solar. Durante nove anos no espaço profundo, o Kepler e o seu segundo ato, a missão denominada K2, mostraram que a nossa galáxia contém milhares de milhões de “exoplanetas” escondidos, muitos dos quais poderiam ser locais promissores para a vida. Eles provaram que o nosso céu noturno está repleto de mais planetas do que estrelas – conhecimento que revoluciona a compreensão do nosso lugar no cosmos. (NASA, 2018)

**Figura 2** – Conceito artístico do Telescópio Kepler



Fonte: NASA (2018)

O CoRoT (ver figura 3) foi proposto pela primeira vez em dezembro de 1996 pela Agência Espacial Nacional Francesa (CNES). Nos três anos seguintes, o projeto foi pesquisado para ver se era viável. Em Setembro de 1999, foi feito um apelo a potenciais parceiros europeus e em Março de 2000, o CNES deu luz verde para a realização do CoRoT. (ESA, 2017)

A CoRoT foi a primeira missão capaz de detectar planetas rochosos, várias vezes maiores que a Terra, em torno de estrelas próximas. Os planetas fora do nosso Sistema Solar são chamados de ‘exoplanetas’. Consistia em um telescópio espacial de 30 centímetros. A espaçonave foi lançada em 27 de dezembro de 2006 e desativada em 17 de junho de 2014. CoRoT foi uma missão liderada pelo CNES com a participação da ESA. O nome vem de ‘convecção, rotação e trânsitos planetários’. (ESA, 2017)

Na procura de planetas rochosos fora do nosso Sistema Solar, o CoRoT foi um importante trampolim no esforço europeu para encontrar planetas habitáveis, semelhantes à Terra, em torno de outras estrelas. (ESA, 2017)

Ao estudar as ondas acústicas que ondulam nas superfícies das estrelas, com ondas de até alguns metros de altura, pode-se penetrar nos interiores estelares até então “invisíveis” e aprender sobre a física das estrelas. Este é o motor que impulsiona a fonte de energia mais importante do Universo, que cria o ambiente necessário à vida na superfície dos planetas. (ESA, 2017)

**Figura 3** - Vista artística do satélite COROT



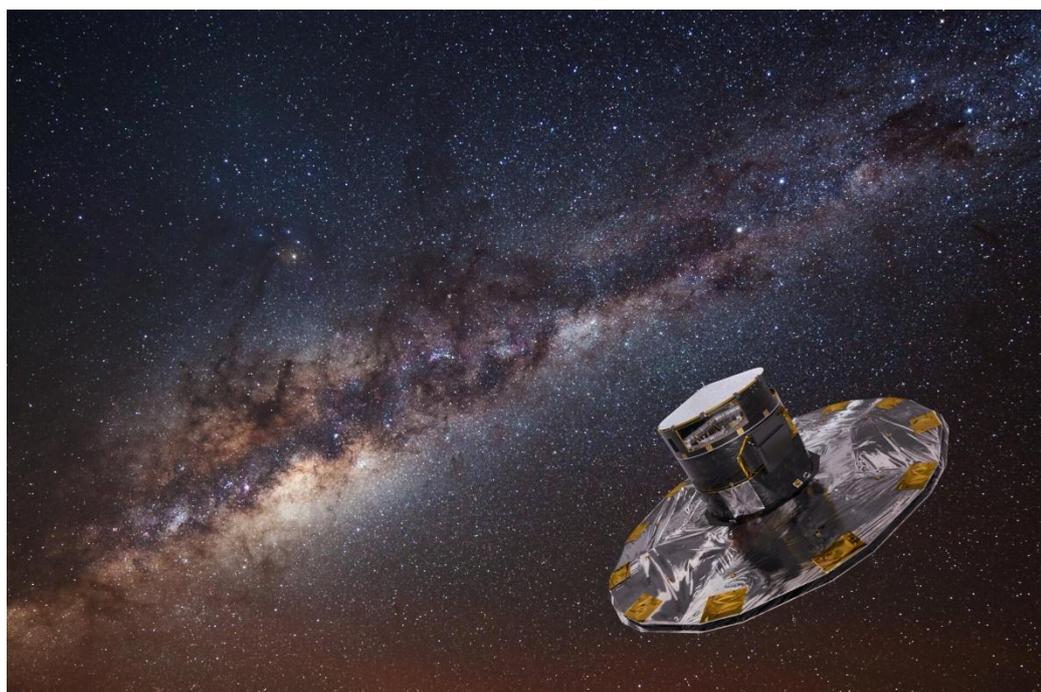
Fonte: ESA (2017)

GAIA, na missão de astrometria espacial global, está construindo o maior e mais preciso mapa tridimensional de nossa Galáxia, mapeando quase dois bilhões de objetos. (ESA, 2014)

Durante sua missão, Gaia (ver figura 4) monitora cada uma de suas estrelas-alvo aproximadamente 14 vezes por ano, mapeando com precisão suas posições, distâncias, movimentos e variações de brilho. A expectativa é que descubra centenas de milhares de novos objetos celestes, como planetas além do nosso sistema solar e anãs marrons, além de observar centenas de milhares de asteroides dentro do nosso próprio Sistema Solar. A missão também está estudando mais de 1 milhão de quasares distantes e fornecendo novos testes rigorosos da Teoria Geral da Relatividade de Albert Einstein. (ESA, 2014)

Gaia foi lançado do Porto Espacial Europeu em Kourou, Guiana Francesa, a bordo de um veículo de lançamento Soyuz-STB/Fregat-MT. Gaia tem suas raízes na missão Hipparcos da ESA (1989-1993), que catalogou mais de 100.000 estrelas com alta precisão e mais de um milhão com menor precisão. O Gaia cataloga quase dois bilhões de estrelas, medindo a posição e o movimento de cada estrela com 200 vezes mais precisão do que o Hipparcos, e produz dados para 20.000 vezes mais estrelas do que seu antecessor. (ESA, 2014)

**Figura 4** – Gaia mapeando as estrelas da Via Láctea



A missão Gaia foi aprovada em 2000 como uma missão *Cornerstone* da ESA. O nome "GAIA" foi originalmente derivado como um acrônimo para *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*. Isso refletiu a técnica óptica de interferometria que foi originalmente planejada para uso na espaçonave. No entanto, o método de trabalho mudou e, embora a sigla já não seja aplicável, o nome Gaia permanece para dar continuidade ao projeto. (ESA, 2014)

Cada estrela segue um padrão evolutivo único em sua rotação desde o nascimento até o estágio final. Estrelas da pré-sequência principal mostram distribuições bimodais de velocidades, sugerindo que o acoplamento magnético entre o disco e a estrela afeta a rotação nessa fase (SHU *et al.*, 1994).

Os fatos observados acima evidenciam a importância do estudo das distribuições das rotações estelares, e como é necessária a determinação de distribuições matemáticas teóricas dessas taxas rotacionais para a caracterização e predição de fenômenos físicos relacionados com a rotação estelar, inclusive a rotação do Sol. O comportamento da distribuição das velocidades rotacionais de um conjunto particular de estrelas (ver Mermilliod J.-C., Mayor M., Udry S. 2009), por sua vez, deve ser usado no estudo dos processos físicos que controlam a evolução estelar proporcionando uma melhor compreensão da evolução estelar bem como dos processos físicos envolvidos nessa evolução.

A compreensão da rotação estelar desempenha um papel fundamental na investigação da formação e evolução das estrelas. A pré-sequência principal é uma fase crucial no ciclo de vida estelar, onde as estrelas estão em processo de contração gravitacional antes de entrarem na sequência principal. Durante essa fase, os processos físicos que afetam a rotação estelar podem ser diferentes em comparação com estágios posteriores de evolução.

A hipótese de pesquisa foi sobre a distribuição de frequência de rotação de estrelas do tipo solar na pré-sequência principal segue um padrão específico que pode ser influenciado por diversos fatores, como a idade da estrela, sua massa inicial, e a presença de sistemas planetários ao seu redor. A compreensão desses padrões pode fornecer percepções importantes sobre a formação e evolução estelar.

No entanto, ainda há lacunas de conhecimento em relação aos perfis das distribuições de frequência e probabilidade da rotação de estrelas do tipo solar na pré-sequência principal. Investigar esses perfis permitirá obter informações valiosas sobre as propriedades estelares,

como a taxa de rotação, a influência de fenômenos magnéticos, a interação com discos protoplanetários, entre outros.

Ao entender melhor esses perfis, será possível avançar na compreensão dos processos físicos envolvidos na formação e evolução estelar, bem como na construção de modelos teóricos mais precisos. Além disso, esses estudos contribuem para a comparação e validação de modelos de evolução estelar existente e podem fornecer insights sobre a formação e evolução de sistemas planetários.

As colocações dos parágrafos sugerem que, ao analisar as distribuições de rotação estelar na pré-sequência principal, esperam-se padrões que revelem influências de processos específicos de formação e evolução estelar.

O objetivo deste trabalho foi investigar as características das distribuições de frequência da rotação de estrelas semelhantes ao nosso Sol durante a fase da pré-sequência principal, e este estudo teórico da distribuição das velocidades rotacionais de estrelas é, por tudo mencionado acima, um campo de pesquisa científica amplo e promissor. Portanto, a justificativa para essa pesquisa reside na importância de preencher lacunas de conhecimento, avançar na compreensão dos processos estelares e contribuir para o desenvolvimento da astronomia teórica e observacional. Os resultados dessa pesquisa têm o potencial de fornecer informações valiosas para a área de astrofísica estelar e para o estudo da evolução das estrelas similares ao Sol.

As palavras-chave desse trabalho são Astrofísica; Estatística; Vento estelar; Perfil de rotação; Evolução estelar.

~

## 2 METODOLOGIA

Inicialmente foi feita a coleta de dados de velocidade de rotação de estrelas de aglomerados abertos. Foram feitas bases amostrais no formato de tabela de dados de rotação, envolvendo o maior intervalo de massa e idade estelar possível. Com as tabelas se construirá distribuições de frequência e de probabilidade. Concomitantemente, dados de parâmetros físicos das estrelas serão adquiridos de catálogos específicos, como a base de dados astronômica *SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg)*. Além disso, serão realizados testes para detectar possíveis influências entre esses parâmetros. Será feito o uso do software *RStudio* (R 4.3.1) para realizar o cálculo todas essas etapas do trabalho.

*Simbad* é a base de dados de referência para identificação e bibliografia de objetos estelares. O objetivo do *Simbad* é fornecer informações sobre objetos astronômicos de interesse que tenham sido estudados em artigos científicos. (SIMBAD, 2024)

*Simbad* é um banco de dados dinâmico, atualizado todos os dias úteis. Ele fornece a bibliografia, bem como informações básicas disponíveis, como a natureza do objeto, suas coordenadas, magnitudes, movimentos próprios e paralaxe, velocidade/desvio para o vermelho, tamanho, tipo espectral ou morfológico e a infinidade de nomes (identificadores) dados em a literatura. A equipe do CDS também realiza identificações cruzadas com base na compatibilidade de vários parâmetros, no limite de uma astrometria razoavelmente boa. (SIMBAD, 2024)

*Simbad* não é um catálogo e não deve ser usado como catálogo. O CDS também fornece o banco de dados *VizieR* que contém listas publicadas de objetos, bem como a maioria das pesquisas de grande porte. A ideia agora é usar tanto o *Simbad* quanto o *VizieR* como ferramentas complementares de pesquisa. (SIMBAD, 2024)

Cada etapa corresponde ao aprendizado da técnica e da matemática envolvidas no tratamento estatístico dos dados de rotação estelar. Abaixo, descrevo uma abordagem geral para o tratamento matemático e estatístico desse estudo: Cálculo dos momentos de distribuição de rotação, incluindo média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose.

A média (ver equação 1) é uma medida estatística que representa o valor típico ou central de um conjunto de dados. Existem diferentes tipos de médias, sendo a mais comum a

média aritmética. Para calcular a média aritmética de um conjunto de números, você soma todos os valores e divide pelo número total de elementos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Equação 01}$$

Cada item da formula acima corresponde a:

- $\bar{x}$  - representa o valor calculado da média aritmética simples.
- $\Sigma$  - símbolo do alfabeto grego (Sigma) que indica soma de todos os termos.
- **n** - número de elementos contidos na sequência, série, tabela, amostra ou população.
- **i = 1** - representa o primeiro elemento desta amostra.
- $x_i$  - representa todos os valores da série.

O Desvio Padrão (ver equação 2) é utilizado para contas algébricas mais complexas, porque ele considera os sinais. Mas para isso, eleva-se a soma ao quadrado para que no cálculo não haja números negativos e depois tira-se a raiz quadrada.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{Equação 02}$$

- $X_i$  – valor individual
- $\bar{X}$  – média dos valores
- $n$  – número de valores

A variância é uma medida estatística que expressa o quão dispersos ou distantes os valores de um conjunto de dados estão em relação à média aritmética desse conjunto. Em outras palavras, a variância fornece uma medida da extensão ou da dispersão dos dados.

$$S^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \quad \text{Equação 03}$$

A assimetria, também conhecida como coeficiente de assimetria, mede a falta de simetria em uma distribuição de dados.

$$AS = \frac{\bar{X} - Mo}{\sigma} \quad \text{Equação 04}$$

- $\bar{x}$  – Média Aritmética
- $Mo$  – Moda
- $\sigma$  – Desvio Padrão
- $Med$  – Mediana
- $AS$  – Assimetria
- $AS = 0$  – Distribuição é Simétrica
- $AS > 0$  – Distribuição é Simétrica Positiva
- $AS < 0$  – Distribuição é Assimétrica Positiva

A curtose mede a forma das caudas de uma distribuição de dados em relação à distribuição normal, representa o grau de achatamento da distribuição, isto é, quão espalhados os dados estão em torno da média. (Gomes, 2021) Novamente, usamos a curva normal padrão como referência e podemos interpretar a curtose por meio de gráficos ou numericamente. Pode ser classificada em três tipos:

a) **Mesocúrtica**: que é própria curva normal padrão

b) **Platicúrtica**: possui grau de achatamento maior que da curva normal padrão, o que nos indica que os dados estão mais espalhados (logo, o desvio padrão também é maior).

c) **Leptocúrtica**: seu grau de achatamento é menor que o da curva normal padrão (curva mais pontiaguda), indica que os dados estão mais concentrados (desvio padrão menor).

$$C = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})} \quad \text{Equação 05}$$

- C = Coeficiente de Curtose;
- $Q_3$  e  $Q_1$  = quartil 3 e quartil 1, respectivamente;
- $P_{90}$  e  $P_{10}$  = percentil 90 e percentil 10, respectivamente.

Representação matemática das distribuições de rotação utilizando funções de densidade de probabilidade, como a função de densidade de probabilidade normal ou outros relevantes.

A grande utilidade dessa distribuição (função densidade de probabilidade) está associada ao fato de que aproxima de forma bastante satisfatória as curvas de frequências de medidas físicas, essa curva é conhecida como distribuição normal ou gaussiana. (UFSC, 2014)

A distribuição normal possui dois parâmetros, a média ( $\mu$ ), ou seja onde está centralizada e a variância ( $\sigma^2 > 0$ ) que descreve o seu grau de dispersão. Ainda, é comum se referir a dispersão em termos de unidades padrão, ou seja desvio padrão ( $\sigma$ ). Cabe salientar que como qualquer outro modelo, dependendo dos parâmetros, teremos diferentes distribuições normais. (UFSC, 2014)

É importante lembrar que a variável X se distribui de forma contínua de  $-\infty < x < +\infty$  e a área total sob a curva do modelo é unitária. (UFSC, 2014)

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \quad \text{Equação 06}$$

- $\mu$  é a média da distribuição.
- $\sigma^2$  é a variância da distribuição.
- $\sigma$  é o desvio padrão da distribuição, note que  $\sqrt{\sigma^2}$ .

Análise de correlações estatísticas entre a rotação estelar e outros parâmetros, como idade, massa e atividade magnética, utilizando coeficientes de correlação.

Este tratamento matemático e estatístico proporcionará uma base sólida para a interpretação dos dados coletados e a obtenção de percepções relevantes sobre a rotação estelar durante a pré-sequência principal.

Testes estatísticos, tais como o cálculo da média e desvio padrão, foram realizados nas medidas observacionais dos parâmetros físicos (velocidade de rotação) das estrelas a fim de avaliar a generalidade dos resultados obtidos.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico da presente pesquisa foi composto por leituras de artigos sobre rotação das estrelas da pré-sequência principal, e cálculos de média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose, por meio de um algoritmo (ver Figura 5) que foi plotado e executado no programa *RStudio*, versão R 4.3.1(ver figura 6). A rotação estelar desempenha um papel fundamental na evolução estelar, na dinâmica dos sistemas estelares binários e na geração de campos magnéticos estelares. O estudo dos perfis das distribuições de frequência e de probabilidade da rotação dessas estrelas proporciona ideias valiosas sobre os processos de formação estelar, as interações magnéticas e a evolução de sistemas planetários. Este referencial teórico explora alguns dos principais aspectos envolvidos nesse estudo.

**Figura 5:** Algoritmo utilizado para o tratamento matemático e estatístico dos dados.

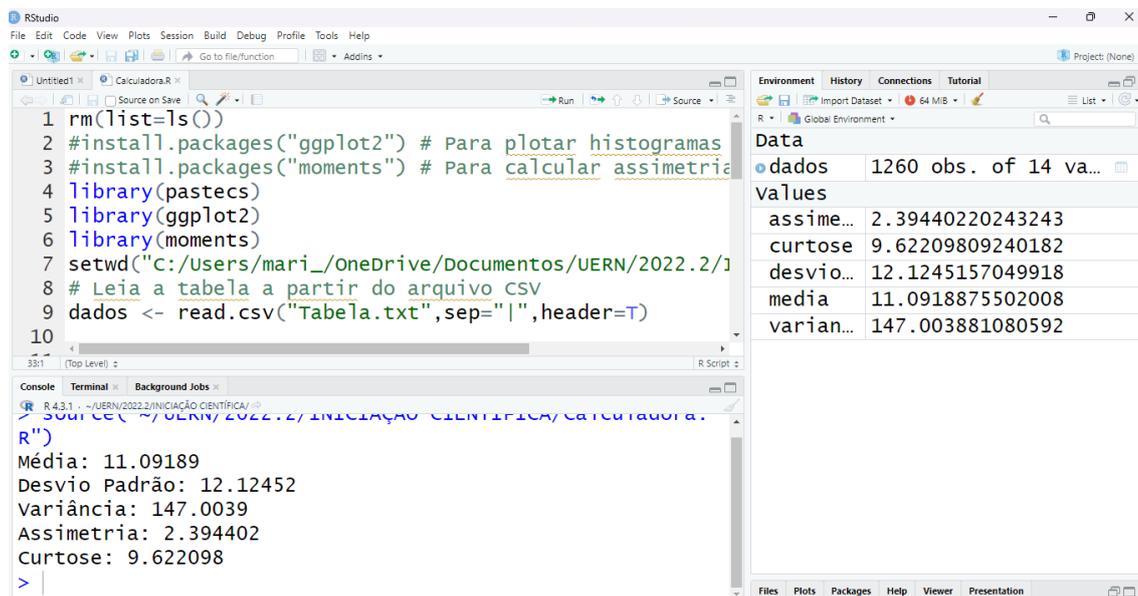
```
rm(list=ls())
#install.packages("ggplot2") # Para plotar histogramas
#install.packages("moments") # Para calcular assimetria e curtose
library(pastecs)
library(ggplot2)
library(moments)
setwd("C:/Users/mari_/OneDrive/Documents/UERN/2022.2/INICIAÇÃO CIENTÍFICA/")
# Leia a tabela a partir do arquivo CSV
dados <- read.csv("Tabela.txt",sep="|",header=T)

# Calcule as estatísticas
media <- mean(dados$sini,na.rm=TRUE)
desvio_padrao <- sd(dados$sini,na.rm=TRUE)
variância <- var(dados$sini,na.rm=TRUE)
assimetria <- skewness(dados$sini,na.rm=TRUE)
curtose <- kurtosis(dados$sini,na.rm=TRUE)

# Imprima os resultados
cat("Média:", media, "\n")
cat("Desvio Padrão:", desvio_padrao, "\n")
cat("Variância:", variância, "\n")
cat("Assimetria:", assimetria, "\n")
cat("Curtose:", curtose, "\n")

# Crie e exiba o histograma
ggplot(dados, aes(x = valores)) +
  geom_histogram(fill = "steelblue", color = "white") +
  ggtitle("Histograma dos Valores") +
  xlab("Valores") +
  ylab("Frequência")
```

**Figura 6:** Área de trabalho do RStudio.



Fonte : Autor.

### 3.1 Introdução à Rotação Estelar na Pré-sequência Principal

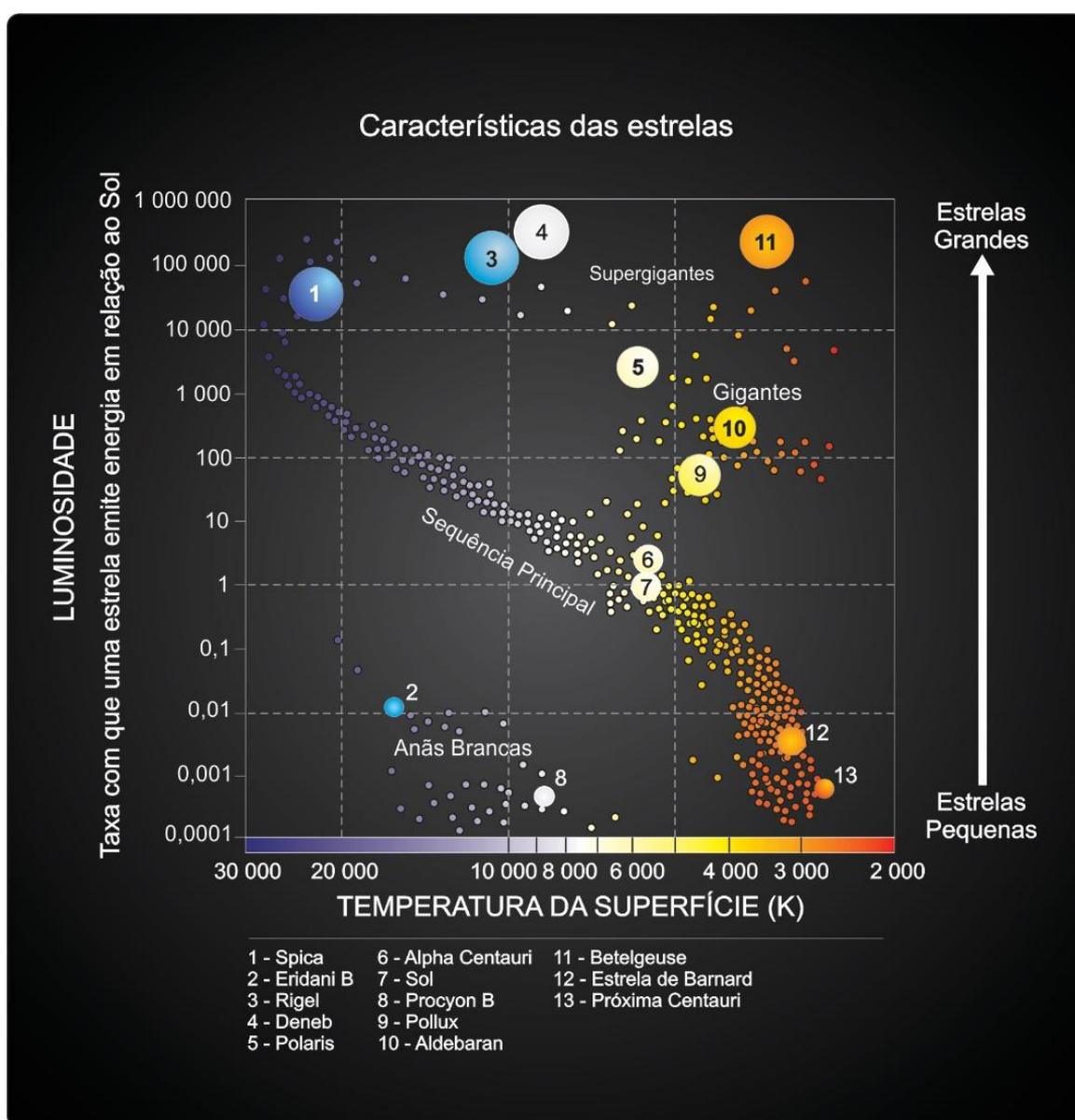
O Diagrama HR (ver Figura 7), segundo Oliveira Filho & Oliveira Saraiva (2017, p. 193),

[...] foi descoberto independentemente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967), em 1911, e pelo americano Henry Norris Russell (1877-1957), em 1913, como uma relação existente entre a luminosidade de uma estrela e sua temperatura superficial. Hertzsprung descobriu que estrelas da mesma cor podiam ser divididas entre luminosas, que ele chamou de gigantes, e estrelas de baixa luminosidade, que ele chamou de anãs. Russel estendeu o estudo de Hertzsprung para as estrelas mais quentes, graficando as 300 estrelas para as quais a paralaxe havia sido medida naquela época. A primeira coisa que se nota em um diagrama HR é que as estrelas não se distribuem igualmente nele, mas se concentram em alguns partes. A maior parte das estrelas está alinhada ao longo de uma estreita faixa na diagonal que vai do extremo superior esquerdo (estrelas quentes e muito luminosas), até o extremo inferior direito (estrelas frias e pouco luminosas). Essa faixa é chamada sequência principal.

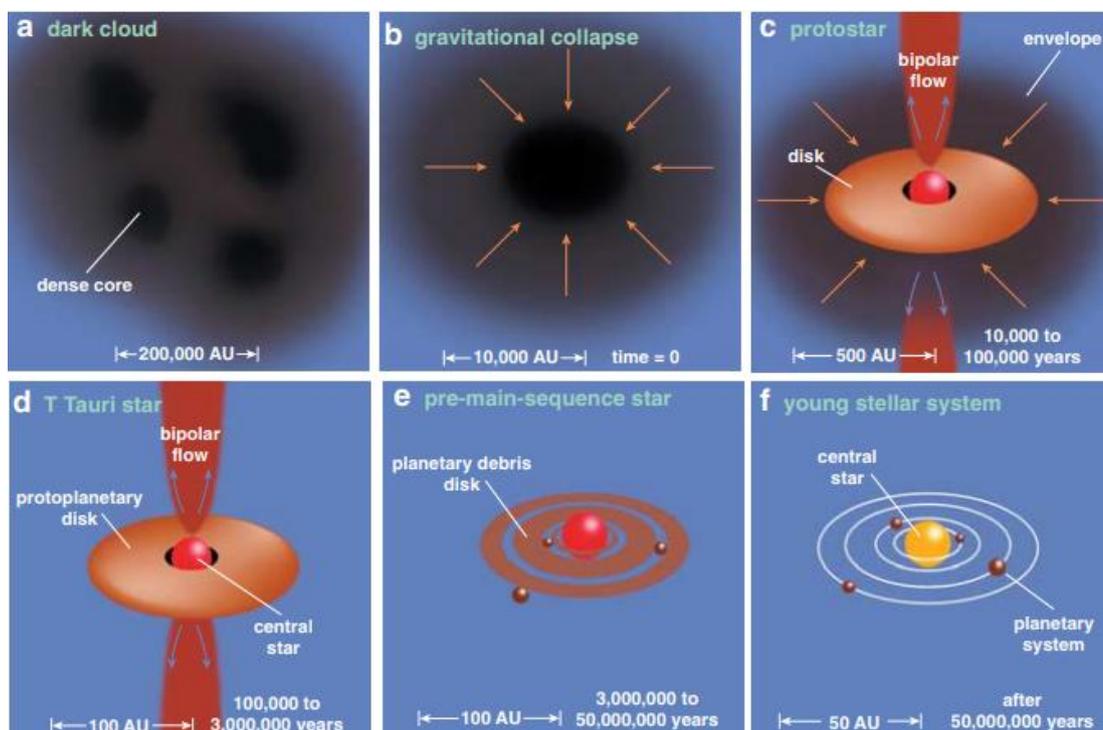
Na fase inicial da evolução estelar, conhecida como pré-sequência principal, as estrelas do tipo solar estão passando por uma etapa crucial de desenvolvimento (ver figura 8). Durante esse período, os gases responsáveis pela formação estelar começam, pela força

gravitacional, a se aglutinarem e contraírem, todo esse conjunto começa a girar, a velocidade aumenta, impulsionada pela gravidade, assim como sua densidade, à medida que o hidrogênio contrai sua temperatura aumenta, quando a temperatura no centro atinge um valor suficientemente alto, da ordem de 15 milhões de graus centígrados, o processo de fusão nuclear é iniciado e temos, finalmente, o nascimento de uma estrela. A rotação estelar, nesse contexto, desempenha um papel fundamental em diversos aspectos do comportamento e evolução dessas estrelas. (Silva, 2021)

**Figura 7:** Diagrama HR



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>

**Figura 8:** Ilustração do processo de formação estelar.

Fonte: Greene (2001)

A imagem acima ilustra o processo de formação estelar, no primeiro quadro esta mostrando uma nuvem escura, que são fenômenos comuns no universo e classificam-se como nebulosas escuras por causa da sua capacidade de obscurecimento. Os astrônomos que estudam esse fenômeno revelaram que as nuvens escuras são locais de nascimento de estrelas. (Bezerra, 2015)

Essa primeira fase de formação estelar dentro da nuvem escura dura “apenas” alguns milhares de anos -- tendo em conta que as estrelas vivem milhões ou bilhões de anos. As nuvens escuras tendem a se dispersar e perder a opacidade à medida que várias estrelas vão surgindo em seu interior. (Bezerra, 2015)

Já no segundo quadro, esta ilustrada o colapso gravitacional que a nuvem escura sofre. Durante o colapso inicial, o fragmento é transparente à radiação e o colapso se dá rapidamente. À medida que se torna mais denso, o fragmento se torna opaco. A radiação infravermelha não escapa do interior da protoestrela e a temperatura e pressão no centro começam a aumentar mais rápido. Em algum momento a pressão é suficientemente grande para conter o colapso e o objeto se torna uma protoestrela estável. (UFRGS, 2019?)

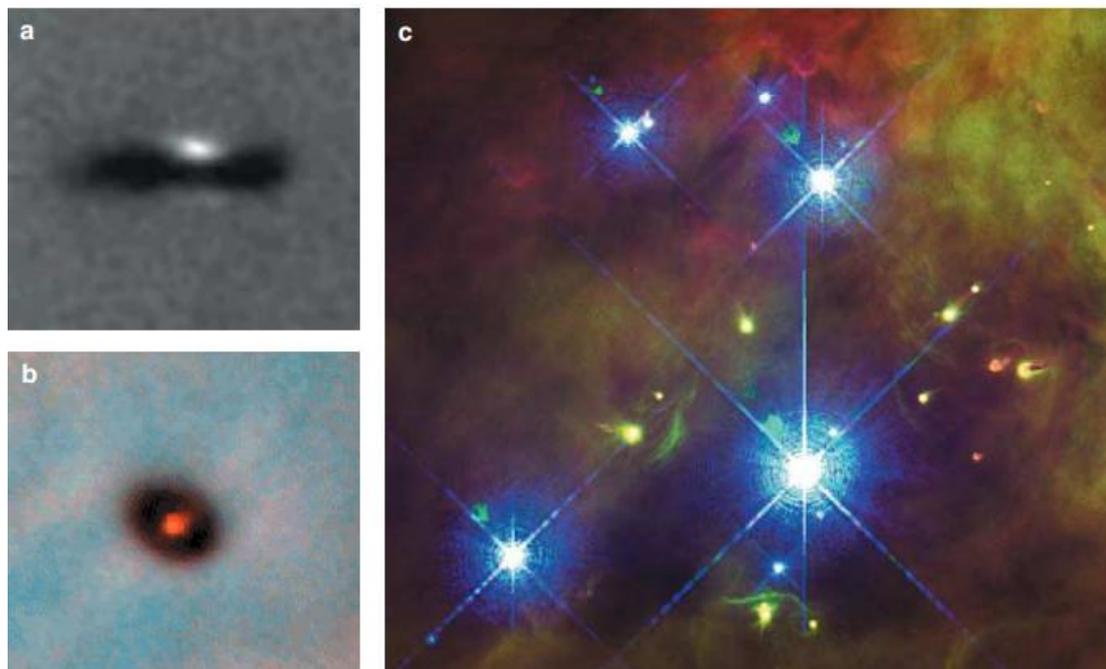
No quarto quadro é mostrada a ilustração da formação de uma protoestrela, que é quando um fragmento se destaca das outras partes da região de formação estelar, ele se torna um objeto bem definido, com identidade própria e campo gravitacional separado do restante da nuvem. Esse objeto é chamado de protoestrela. Durante a formação da protoestrela, gás cai em direção ao seu centro. A contração do gás converte energia cinética em energia interna (calor), aumentando tanto sua pressão quanto sua temperatura. Quando a temperatura atinge alguns milhares de graus, a protoestrela se torna uma fonte de infravermelho. (UFRGS, 2019?)

No quarto quadro mostra a formação de uma estrela T-Tauri, que tem ao seu redor discos protoplanetários. Os discos proto-planetários são porções de matéria mista (sólido, líquido e gasoso) em forma de poeira arranjadas como um disco que gira em função da estrela central, em uma de suas fases como estrela e podendo dar origem a um sistema planetário semelhante ao nosso. O material que forma este disco é predominantemente o mesmo material da estrela, e contém matéria cósmica capturada pelo disco. (Oliveira, 2021)

As estrelas jovens e de pequena massa são geralmente denominadas estrelas T Tauri e são conhecidas como as progenitores do nosso Sol. Apresentam, geralmente, idades da ordem dos  $10^7$  anos e massas inferiores a 2 massas solares. Nesta fase, a estrela ainda está relativamente fria, com temperaturas próximas dos  $3500-4000^\circ\text{C}$ . Embora conhecidas há bastante tempo, foi apenas nos anos 40 que foi feito o primeiro estudo sistemático destas estrelas, pelo astrônomo Joy. (Gameiro, 2014?)

No quinto quadro é mostrada a ilustração de uma estrela da pré-sequência principal, Com o aumento da densidade, aumenta a pressão, que trabalha contra a gravidade desacelerando contração 10.000.000 de anos depois (ponto 6) o núcleo torna-se quente o suficiente para iniciar a fusão do H, e a protoestrela torna-se uma estrela pré-sequência principal. (Carciofi, 2010?)

No sexto e último quadro, é mostrado a ilustração de um sistema estelar jovem, que é um grupo de estrelas e possivelmente outros corpos mais pequenos como planetas ou planetoides, que se orbitam umas às outras. com uma estrela central e um sistema planetário ao redor. (CENTRO CIÊNCIA DO ALGARVE, 2005)

**Figura 9:** Imagens de discos protoplanetários.

Fonte: Greene (2001)

Na imagem acima temos, imagens de discos protoplanetários, vistos de lado no primeiro quadro e de cima no segundo quadro. Esses discos cheios de poeira podem evoluir para formar sistemas planetários, mas imagens recentes do trapézio em Orion, no terceiro quadro, sugere que ventos fortes com origem em estrelas vizinhas podem destruir os discos antes da formação de sistemas planetários.

Durante a pré-sequência principal, as estrelas do tipo solar possuem diferentes taxas de rotação. Essa variedade de velocidades de rotação resulta em uma distribuição de frequência de velocidades projetadas. A compreensão das distribuições de rotação é essencial para investigar os processos físicos subjacentes e como esses processos evoluem ao longo do tempo.

A taxa de rotação das estrelas na pré-sequência principal é influenciada por vários fatores, sendo a conservação do momento angular durante a formação estelar um desses fatores, onde a rotação inicial da nuvem de gás e poeira que deu origem à estrela influencia sua rotação final. Além disso, a interação com discos protoplanetários (ver Figura 9), transferência de momento angular em sistemas binários e a atividade magnética também têm impactos significativos na taxa de rotação. (Silva, 2020)

A relação entre rotação e atividade magnética é particularmente relevante. A rotação influencia a geração de campos magnéticos estelares, resultando em fenômenos como manchas estelares, erupções solares e emissões de raios-X. O estudo das propriedades magnéticas das estrelas na pré-sequência principal ajuda a compreender como a rotação está ligada às interações magnéticas e ao transporte de momento angular. (Soares, 2000)

Modelos teóricos de evolução estelar e simulações numéricas são usados para fornecer entendimento sobre os processos físicos e para interpretar as distribuições observadas. (Alves-Brito; Cortesi, 2024)

À rotação estelar na pré-sequência principal destaca a importância desse fenômeno na evolução das estrelas do tipo solar. A variação das taxas de rotação, influenciada por fatores como conservação de momento angular, interações magnéticas e atividade estelar, desempenha um papel crucial na formação planetária, na atividade magnética e na evolução das estrelas nessa fase inicial de suas vidas. (Levenhagen; Künzel, 2009)

O Diagrama HR, é um gráfico da luminosidade de estrelas em função de sua temperatura. O diagrama pode ter diferentes formas, servindo tanto para apresentar resultados teóricos como dados observacionais de grupos de estrelas. No eixo vertical, em vez da luminosidade (sempre em escala logarítmica), pode ser representada a magnitude absoluta. No eixo horizontal, em que a temperatura diminui para a direita, pode ser usada a classe espectral ou o índice de cor das estrelas. Quando as propriedades de um grupo de estrelas são graficadas em um diagrama HR, geralmente a grande maioria delas ocupará uma faixa estreita indo do canto superior esquerdo (altas temperaturas, altas luminosidades) até o canto inferior direito (baixas temperaturas e baixas luminosidades). Essa região do diagrama é chamada sequência principal. O fator que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa: estrelas mais massivas são mais quentes e mais luminosas. Algumas estrelas se concentram acima da sequência principal, na região superior direita (estrelas frias e luminosas). Essa é a região das estrelas chamadas gigantes. Bem no topo do diagrama existem algumas estrelas ainda mais luminosas: são chamadas supergigantes. Finalmente, algumas estrelas se concentram no canto inferior esquerdo (estrelas quentes e pouco luminosas): são chamadas anãs brancas. As estrelas ocupam uma ou outra localização no diagrama HR (relação entre a sua temperatura e a sua luminosidade) dependendo do estágio evolutivo em que se encontra. O diagrama tem as iniciais de seus descobridores: Hertzsprung e Russell.

### 3.2 Distribuições de Frequência da Rotação

As estrelas do tipo solar têm velocidades de rotação variadas, observáveis como uma distribuição de frequência de velocidades projetadas. Essas distribuições são modeladas por funções de probabilidade para entender diferentes taxas de rotação. (Souza, 2022)

Elas são importantes na astrofísica, pois fornecem entendimento sobre evolução estelar, formação de sistemas planetários e atividade magnética. A rotação estelar na pré-sequência principal reflete a conservação do momento angular durante a formação estelar, resultando em uma ampla gama de velocidades iniciais. (Oliveira, 2016)

Observações espectroscópicas permitem determinar as velocidades de rotação, contribuindo para a construção dessas distribuições. Modelos teóricos e observações empíricas ajudam a interpretar essas distribuições, fornecendo uma compreensão mais profunda da formação e evolução estelar. (Levenhagen; Künzle, 2009)

### 3.3 Interações com Discos Protoplanetários e Modelagem de Discos Protostelares

Estrelas jovens frequentemente estão envolvidas em discos protoplanetários, onde a transferência de momento angular entre a estrela e o disco pode influenciar a taxa de rotação. Interações magnéticas e troca de material entre a estrela e o disco podem resultar em aceleração ou desaceleração da rotação estelar. (Greene 2001)

Em sistemas estelares binários, a transferência de massa e momento angular entre as estrelas pode modificar significativamente suas taxas de rotação ao longo do tempo. A interação gravitacional mútua desempenha um papel fundamental na evolução das taxas de rotação de ambas as estrelas. (Milone *et al.*, 2018)

Modelos de discos protoplanetários (ver Figura 14) explicam como as interações entre a estrela e o disco podem afetar a taxa de rotação e a evolução da estrela jovem. Esses modelos são importantes para entender a formação de planetas e sistemas planetários. (Greene 2001)

A combinação de abordagens observacionais e modelagem teórica permite uma validação e construção de uma compreensão mais completa das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal. Essas abordagens ajudam a responder perguntas sobre a influência da

atividade magnética, a evolução da rotação e os processos físicos subjacentes, contribuindo para o avanço do conhecimento em astrofísica estelar. (Milone *et al.*, 2018)

### 3.4 Evolução Magnética Estelar

A atividade magnética como a geração de campos magnéticos e erupções solares, pode resultar na ejeção de material da estrela, levando à perda de momento angular. Esse processo afeta a taxa de rotação ao longo do tempo, principalmente em estrelas jovens com altas taxas de atividade. (Silva, 2017)

A rotação está intimamente ligada à atividade magnética estelar, resultando em erupções solares, manchas estelares e emissões de raios-X. Estudos das propriedades magnéticas das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal ajudam a conectar a rotação com as interações magnéticas e o transporte de momento angular. Esses fenômenos complexos desempenham um papel significativo no desenvolvimento dessas estrelas jovens. (Nascimento, 2023)

### 3.5 Abordagens Observacionais e Modelagem Teórica

Observações espectroscópicas, como a medição da largura de linhas espectrais de absorção, são usadas para estimar as velocidades de rotação. Modelos teóricos de evolução estelar e simulações numéricas auxiliam na compreensão dos processos físicos subjacentes e na interpretação das distribuições observadas. (Ferrera, 2016)

O estudo das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal combina abordagens observacionais e modelagem teórica para desvendar os complexos processos envolvidos em sua evolução e comportamento. Essa abordagem interdisciplinar permite uma compreensão mais profunda das propriedades dessas estrelas jovens e em formação. (Milone *et al.*, 2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos da média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose, obtidos a partir da tabela J/A+A/498/949/table11, do artigo Catálogos de velocidades radiais e rotacionais de 1253 anãs FK em 13 aglomerados abertos próximos (MERMILLIOD; MAYOR; UDRY, 2009, p. 949-960). Na tabela do referido artigo, há no total de treze aglomerados abertos, e os cálculos foram feitos para todos os aglomerados juntos e separadamente, dividindo em quatorze diferentes tabelas como pode ser observado a seguir.

**Tabela 1** - Todos os Aglomerados (Tabela)

Média:	11.09189
Desvio Padrão:	12.12452
Variância:	147.0039
Assimetria:	2.394402
Curtose:	9.622098
Amostra com 1253 estrelas.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 2** – Aglomerado NGC 1976 (TabelaNGC1976)

Média:	6.888889
Desvio Padrão:	7.344533
Variância:	53.94216
Assimetria:	2.128469
Curtose:	7.031713
Amostra com 38 estrelas, e com 2 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora

**Tabela 3** – Aglomerado IC 2602 (TabelaIC2602)

Média:	19.61622
Desvio Padrão:	16.42046
Variância:	269.6314
Assimetria:	1.527246
Curtose:	4.698977
Amostra com 39 estrelas, e com 30 milhões de anos.	

. Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 4** - Aglomerado IC 2391 (TabelaIC2391)

Média:	19.74333
Desvio Padrão:	19.18648
Variância:	368.1212
Assimetria:	1.615767
Curtose:	4.417612
Amostra com 32 estrelas, e com 43 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 5** – Aglomerado Alpha Persei (TabelaAlphaPersei)

Média:	19.50877
Desvio Padrão:	15.54575
Variância:	241.6705
Assimetria:	1.216157
Curtose:	3.900098
Amostra com 63 estrelas, e com 60 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 6** – Aglomerado Blanco 1 (Tabela Blanco)

Média:	10.45667
Desvio Padrão:	12.45052
Variância:	155.0155
Assimetria:	3.068523
Curtose:	13.25479
Amostra com 152 estrelas, e com 100 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 7**- Aglomerado Pleiades (Tabela Pleiades)

Média:	11.0326
Desvio Padrão:	12.30639
Variância:	151.4472
Assimetria:	2.266388
Curtose:	8.593002
Amostracom 277 estrelas, e com 135 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 8** – Aglomerado NGC 6475 (TabelaNGC6475)

Média:	15.12568
Desvio Padrão:	14.82068
Variância:	219.6526
Assimetria:	2.102028
Curtose:	7.237166
Amostra com 77 estrelas, e com 220 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 9** – Aglomerado NGC 7092 (TabelaNGC7092)

Média:	16.99583
Desvio Padrão:	11.29465
Variância:	127.5691
Assimetria:	0.5976411
Curtose:	2.34032
Amostra com 26 estrelas, e com 300 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 10** – Aglomerado Coma Ber (TabelaComaBerenices)

Média:	7.264062
Desvio Padrão:	7.448114
Variância:	55.4744
Assimetria:	1.530241
Curtose:	4.984202
Amostra com 66 estrelas, e com 429 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 11** – Aglomerado NGC 2632 (TabelaNGC2632)

Média:	8.202304
Desvio Padrão:	8.527621
Variância:	72.72032
Assimetria:	3.271887
Curtose:	18.58907
Amostra com 222 estrelas, e com 600 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 12** – Aglomerado Hyades (TabelaHyades)

Média:	8.486538
Desvio Padrão:	9.541996
Variância:	91.04969
Assimetria:	2.88117
Curtose:	13.31495
Amostra com 160 estrelas, e com 650 milhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 13** – Aglomerado NGC 0752 (TabelaNGC0752)

Média:	14.5954
Desvio Padrão:	11.7661
Variância:	138.4411
Assimetria:	0.8488237
Curtose:	2.926874
Amostra com 91 estrelas, e com 2 bilhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

**Tabela 14** – Aglomerado NGC 2682 (TabelaNGC2682)

Média:	4.63
Desvio Padrão:	2.915142
Variância:	8.498051
Assimetria:	0.2680673
Curtose:	2.437205
Amostra com 42 estrelas, e com 4 bilhões de anos.	

Fonte: elaborada pela autora.

Como foi possível observar nas tabelas acima, podemos ver que as estrelas desaceleram com o passar do tempo. Quando jovens, elas giram muito rápido, e no processo de “envelhecimento” desaceleram. Não podemos ver uma estrela girando, mas podemos estimar como acontece, qual a idade e velocidade, seguindo manchas de sol que passam por suas superfícies, as manchas solares diminuem o brilho das estrelas, tornando possível fazer tais cálculos.

É mais fácil calcular o tempo de vida de uma estrela jovem, do que as mais velhas. Mais por que isso acontece? Acontece devido ao fato de estrelas jovens girarem mais rápido

tendo assim mais manchas solares. A velocidade de rotação das estrelas é dada por km/s ou km/h.

Os resultados dos testes estatísticos, como média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose, das tabelas acima mostraram variações de acordo com a quantidade de estrelas e suas respectivas velocidades de rotação. Embora a Tabela 1 contenha as estrelas das outras tabelas, os resultados são aparentemente menores do que os das tabelas seguintes, e em algumas tabelas o resultado diverge, tanto para mais quanto para menos. Isso ocorre devido à variação das velocidades de rotação entre as estrelas.

Inicialmente, foram calculados os momentos da distribuição de frequência de rotação, incluindo a média, a mediana, a variância e a assimetria. Os resultados indicam que a distribuição de frequência de rotação das estrelas segue um padrão específico, com variações notáveis relacionadas à idade da estrela. Estrelas mais jovens tendem a apresentar velocidades de rotação mais elevadas, enquanto estrelas mais antigas tendem a ter velocidades de rotação mais baixas. Além disso, foi observada uma correlação entre a massa inicial da estrela e sua velocidade de rotação, sugerindo que a massa pode influenciar significativamente a evolução da rotação estelar.

Outro achado importante foi a influência dos sistemas planetários na distribuição de frequência de rotação. Estrelas com sistemas planetários apresentam uma distribuição de rotação diferente daquelas sem planetas, indicando possíveis interações entre os planetas e a estrela hospedeira que afetam sua velocidade de rotação.

Os resultados obtidos indicam que os momentos da distribuição de frequência de rotação das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal se ajustam bem a uma distribuição normal. A média e a mediana das velocidades de rotação estão próximas, sugerindo uma distribuição simétrica em torno do valor central. A variância da distribuição também está de acordo com o esperado para uma distribuição normal.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da rotação estelar revela-se fundamental para nossa compreensão dos processos de formação e evolução das estrelas. À medida que continuamos a explorar e compreender os segredos da rotação estelar está mais próximo de uma visão mais completa e detalhada do cosmos e das estrelas que o habitam. A pré-sequência principal é o estágio inicial da evolução de uma estrela como o Sol. Nesta fase, a estrela ainda não está gerando energia através da fusão nuclear do hidrogênio em hélio. Em vez disso, a estrela brilha devido ao calor gerado pela contração gravitacional. A distribuição de frequência de rotação é uma representação estatística das velocidades de rotação das estrelas em uma população.

O estudo dos momentos de distribuição de frequência de rotação de estrelas do tipo solar na pré-sequência principal envolve a coleta de dados observacionais de estrelas jovens em diferentes estágios da pré-sequência principal. Os dados de rotação podem ser usados para calcular momentos estatísticos, como a média das velocidades de rotação, a variância (dispersão) e assim por diante. O objetivo principal é entender como as velocidades de rotação das estrelas jovens estão distribuídas e se há algum padrão ou correlação entre a rotação e outras propriedades estelares, como idade, massa, metalicidade, entre outros.

Os resultados dos testes de média, desvio padrão, variância, assimetria e curtose das tabelas acima mostraram que os resultados variaram de acordo com a quantidade de estrelas e suas respectivas velocidades de rotação. Os resultados da Tabela 1 são aparentemente menores do que os das tabelas seguintes, mesmo ela contendo as estrelas das outras tabelas, em algumas tabelas o resultado diverge, tanto para mais quanto para menos. Isso se dá porque as velocidades de rotação variam de estrela para estrela.

A pesquisa sobre a distribuição de frequência de rotação de estrelas do tipo solar na pré-sequência principal revelou padrões significativos que apontam para a influência de diversos fatores, como a idade da estrela, sua massa inicial e a presença de sistemas planetários ao seu redor. Esses padrões oferecem percepções cruciais sobre a formação e evolução estelar.

Nesta seção, analisamos os momentos de distribuição de frequência de rotação das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal e comparamos os resultados com a hipótese proposta de que essa distribuição segue uma distribuição normal.

Inicialmente, calculamos os momentos da distribuição de frequência de rotação, incluindo a média, a mediana, a variância e a assimetria.

Os resultados indicam que a distribuição de frequência de rotação das estrelas segue um padrão específico, com variações notáveis relacionadas à idade da estrela. Estrelas mais jovens tendem a apresentar velocidades de rotação mais elevadas, enquanto estrelas mais antigas tendem a ter velocidades de rotação mais baixas. Além disso, foi observada uma correlação entre a massa inicial da estrela e sua velocidade de rotação, sugerindo que a massa pode influenciar significativamente a evolução da rotação estelar.

Outro achado importante foi a influência dos sistemas planetários na distribuição de frequência de rotação. Estrelas com sistemas planetários apresentam uma distribuição de rotação diferente daquelas sem planetas, indicando possíveis interações entre os planetas e a estrela hospedeira que afetam sua velocidade de rotação.

Os resultados obtidos indicam que os momentos da distribuição de frequência de rotação das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal se ajustam bem a uma distribuição normal. A média e a mediana das velocidades de rotação estão próximas, sugerindo uma distribuição simétrica em torno do valor central. A variância da distribuição também está de acordo com o esperado para uma distribuição normal.

Esses resultados fornecem uma compreensão mais profunda dos processos de formação e evolução estelar, destacando a importância de considerar múltiplos fatores ao investigar a distribuição de frequência de rotação das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal.

Com base nesses resultados, confirmamos a hipótese de que a distribuição de frequência de rotação das estrelas do tipo solar na pré-sequência principal segue uma distribuição normal. Essa confirmação é consistente com estudos anteriores e contribui para o entendimento da evolução estelar e da formação de sistemas estelares.

## REFERENCIAS

ASTRONOMIA. Disponível em: <[http://www.observatorio-phoenix.org/e\\_teorias/24\\_E05.htm](http://www.observatorio-phoenix.org/e_teorias/24_E05.htm)>. Acesso em: 28 ago. 2023.

BAGDONAS, Alexandre; ZANETI, João; GURGEL, Ivã. Quem descobriu a expansão do universo? Disputas de prioridade como forma de ensinar cosmologia com uso da história e filosofia da ciência. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s. l.], ano 2017, v. 39, ed. 2, p. 1-14, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0257>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Wb7Dtb36NHgVKH7LJg8grzN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 mar. 2024.

BETZLER, Alberto Silva. O Trabalho Científico de Sir William Herschel: A história de um músico e sua contribuição para a Astronomia. Revista Macrocosmo.com, [s. l.], ano 2007, ed. 41, p. 5-15, Abril 2007. DOI ISSN 1808-0731. Disponível em: <https://acervoastronomico.org/acervo/MACROCOSMO/macrocosmo41.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2024.

DAMINELLI, Augusto; MOLINA, Eder Cassola; PICAZZIO, Enos; NETO, Gastão B. Lima; GREGORIO-HETEM, Jane; COSTA, Roberto; CAPOZZOLI, Ulisses; JATENCO, Vera; MACIEL, Walter. O Céu Que Nos Envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes. PICAZZIO, Enos (ed.). 1. ed. São Paulo: Odysseus Editora Ltda, 2011. 284 p. v. 1. ISBN 978-85-7876-021-2. DOI 978-85-7876-021-2. Disponível em: [https://www.iag.usp.br/sites/default/files/2023-01/2011\\_picazzio\\_ceu\\_envolve-c.pdf](https://www.iag.usp.br/sites/default/files/2023-01/2011_picazzio_ceu_envolve-c.pdf). Acesso em: 1 mar. 2024.

DE CASTRO BOSCATI, G. P. CARACTERIZAÇÃO DE ESTRELAS: PERÍODO DE ROTAÇÃO. Disponível em: <<http://eventoscopq.mackenzie.br/index.php/jornada/xviii/paper/viewFile/3140/2032>>. Acesso em: 1 mar. 2024.

DISTRIBUIÇÃO Normal (Gaussiana): Distribuição Normal. Santa Catarina, 2014. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~andre.zibetti/probabilidade/normal.html>. Acesso em: 1 mar. 2024.

ESA. Estratégia da missão COROT. In: Estratégia da missão COROT. [S. l.], 2017.

Disponível em:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/COROT/COROT\\_mission\\_strategy](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/COROT/COROT_mission_strategy).

Acesso em: 1 mar. 2024.

ESA. Visão geral de Gaia. In: ESA. Visão geral de Gaia. [S. l.], 2014. Disponível em:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Gaia/Gaia\\_overview](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_overview). Acesso em: 1 mar. 2024.

ESA. Visão geral do COROT. In: Visão geral do COROT. [S. l.], 2017. Disponível em:

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/COROT/COROT\\_overview](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/COROT/COROT_overview). Acesso em: 1 mar. 2024.

FERNANDES, João. A Idade das Estrelas II: as Observações. Helios, Coimbra, ano 8, n. 8, p. 1-1, 8 mar. 2024. Disponível em: <http://www.mat.uc.pt/~helios/index.html>. Acesso em: 7 set. 2023.

FERREIRA, Rafael Ramon. UM ESTUDO QUALITATIVO DA ESTRELA HD 43587 BASEADO EM DADOS DA MISSÃO CoRoT E ESPECTROSCOPIA. 2016. 84 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em:

[https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/23147/1/RafaelRamonFerreira\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/23147/1/RafaelRamonFerreira_DISSERT.pdf).

Acesso em: 12 jan. 2024.

FREITAS, D. B. de. A evolução da rotação estelar na vizinhança solar. Tese (Mestrado em Física) – Departamento de Física Teórica e Experimental – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

FREITAS, D. B. de. A evolução da rotação estelar na vizinhança solar. Tese (Mestrado em Física) – Departamento de Física Teórica e Experimental – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Greene, T. P. American Scientist, v. 89, p. 318-320, 2001.

GREGORIO-HETEM, J.; JATENCO-PEREIRA, V.; MENDES DE OLIVEIRA, C. FUNDAMENTOS DE ASTRONOMIA. [s.l: s.n.].

LEVENHAGEN, R.s.; KUNZEL, R.. A rotação estelar e seu efeito sobre os espectros.

Revista Brasileira de Ensino de Física, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 4701-47014, 27 fev. 2009.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/4FCpYrr6pgthJrrSh7Qwt3d/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MACIEL, Walter J. Ventos Estelares. Abr. 2005. Disponível em:

<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/palestras/ventos/ventos.html>. Acesso em: 7 set. 2023.

MERMILLIOD, J.-C.; MAYOR, M.; UDRY, S. Catalogues of radial and rotational velocities of 1253 F-K dwarfs in 13 nearby open clusters. *Astronomy & Astrophysics*, n. 498, p. 949-960, 2009.

MILONE, André de Castro et al. INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. 433 p. Disponível em:

[http://www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/pdfs/apostila\\_completa\\_2018.pdf](http://www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/pdfs/apostila_completa_2018.pdf). Acesso em: 15 jan. 2024.

NASA. Kepler-K2. In: Kepler-K2. [S. l.], 2018. Disponível em:

<https://science.nasa.gov/mission/kepler/>. Acesso em: 1 mar. 2024.

NASCIMENTO, Luana Gabriele Freire do. EQUAÇÃO TEÓRICA DA VARIAÇÃO TEMPORAL DOS MOMENTOS DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADE DE ROTAÇÃO ESTELAR. 2023. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

NELSON, Osman Rosso; MEDEIROS, José Renan De. Assim na Terra como no céu: a teoria do dínamo como uma ponte entre o geomagnetismo e o magnetismo estelar. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, p. 4601, 2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/63zj75ycmw6qsxDBzvkJ7jB/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 7 set. 2023.

NUNES, Beatriz. Medidas importantes para estatística: Fichamento dos capítulos 4 e 5 do livro “Estatística aplicada a Ciências Humanas”. [S. l.], 31 mar. 2019. Disponível em:

<https://medium.com/@beatriznunes13/medidas-importantes-para-estat%C3%ADstica-947e8d7557a1>. Acesso em: 1 mar. 2024.

O Diagrama HR. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>>. Acesso em: 29 ago. 2023.

O QUE são aglomerados abertos e como observá-los com um telescópio?. Tucson, Aizona: Departamento de Astronomia e Observatório Steward, Universidade do Arizona, 19 set. 2023. Disponível em: <https://casadotelescopio.com/o-que-sao-aglomerados-abertos-e-como-observa-los-com-um-telescopio/>. Acesso em: 1 mar. 2024.

OLIVEIRA, Gislana Pereira de. PLANETAS EXTRASSOLARES EM AGLOMERADOS ABERTOS: CARACTERIZAÇÃO DE ESTRELAS. 2016. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21830/1/GislanaPereiraDeOliveira\\_TESE.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21830/1/GislanaPereiraDeOliveira_TESE.pdf). Acesso em: 10 jan. 2024.

OLIVEIRA, Leonardo Mendes de. Disco Proto-Planetário. In: OLIVEIRA, Leonardo Mendes de. Disco Proto-Planetário. [S. l.], 18 jul. 2021. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20011/Leonardo/sis2.htm>. Acesso em: 1 mar. 2024.

ONDE estão as estrelas? Nuvem escura impede passagem de brilho estelar. São Paulo, 7 jan. 2015. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/ultimas-noticias/redacao/2015/01/07/onde-estao-as-estrelas-nuvem-escura-impede-passagem-de-brilho-estelar.htm#:~:text=Essa%20primeira%20fase%20de%20forma%C3%A7%C3%A3o,v%C3%A3o%20surgindo%20em%20seu%20interior>. Acesso em: 1 mar. 2024.

RENNN, Jürgen. A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s. l.], ano 2004, v. 27, n. 1, ed. 1, p. 27-36, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000100004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/KpdmhFh7HFfNFTqmnBR6WFD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 mar. 2024.

SARAIVA, Profa. Maria de Fátima O.. Etapas evolutivas das estrelas. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/estrelas.htm>. Acesso em: 25 nov. 2023.

SARAIVA, Profa. Maria de Fátima O.. Glossário de Astronomia. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~fatima/glossario.html#dhr>. Acesso em: 15 jan. 2024.

SHU, Frank et al. Magnetocentrifugally Driven Flows from Young Stars and Disks. I. A Generalized Model. *The Astrophysical Journal*, v. 429, p. 781-796, 10 jul. 1994.

SILVA, Antonio Henrique Dantas. ENSINO DE ASTRONOMIA NA ESCOLA: CONHECENDO AS ESTRELAS. 2021. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Astronomia, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2021.

SILVA, Marcus Vinicius Grilo da. Estudo espectroscópico de estrelas T Tauri no aglomerado NGC 2264. 2020. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2020.

SILVA, Munique Vieira da. Olhando para o céu: uma proposta para uma educação libertadora. Orientador: Luiz Felipe de Souza Coelho. 2008. 86 p. Monografia (Licenciatura em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SIMBAD. Base de dados astronômica SIMBAD - CDS (Estrasburgo): O que é SIMBAD?. In: Base de dados astronômica SIMBAD - CDS (Estrasburgo): O que é SIMBAD?. [S. l.], 5 mar. 2024. Disponível em: <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>. Acesso em: 1 mar. 2024.

Skumanich, A., *The Astrophysical Journal*, vol. 171, p. 565, 1972.

SOARES, Bráulio Batista. UM ESTUDO DA ROTAÇÃO EM ESTRELAS DA SEQUENCIA PRINCIPAL. 2000. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/16630/1/BraulioBS\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/16630/1/BraulioBS_DISSERT.pdf). Acesso em: 25 ago. 2023.

SOUZA, Jefferson Wherculis da Silva. UM ESTUDO ACERCA DO FUTURO ROTACIONAL DE ESTRELAS TIPO-SOLAR EM AGLOMERADOS ESTELARES. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Física, Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em:

[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64394/3/2022\\_dis\\_jwssouza.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64394/3/2022_dis_jwssouza.pdf). Acesso em: 13 jan. 2024.

#### UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO

VARIÂNCIA e Desvio-Padrão — Introdução. [S. l.], 13 mar. 2021. Disponível em: <https://rodrigo-dev77.medium.com/vari%C3%A2ncia-e-desvio-padr%C3%A3o-introdu%C3%A7%C3%A3o-6920cea3da00>. Acesso em: 1 mar. 2024.

#### VENTOS ESTELARES Walter J. Maciel IAG/USP

Ventos estelares. Disponível em:

<<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/palestras/ventos/ventos.html>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

## GLOSSÁRIO

**Aglomerados Estelares** - São agrupamentos de estrelas mantidas unidas pela mútua atração gravitacional. Em um aglomerado, todos os membros formaram-se da mesma nuvem de gás e portanto têm todos a mesma idade e a mesma composição química. As distâncias entre as estrelas do aglomerado em geral são muito pequenas comparadas com a distância do aglomerado à Terra, portanto podemos considerar que todas elas estão à mesma distância de nós. Existem dois tipos básicos de aglomerados: os aglomerados abertos e os aglomerados globulares.

**Aglomerado Aberto** - É um tipo de aglomerado estelar contendo de centenas a milhares de estrelas, as quais se encontram espalhadas em um volume de alguns anos-luz de diâmetro; são relativamente jovens, não têm forma bem definida e ocupam o disco da Galáxia e de outras galáxias. Algumas vezes são também chamados aglomerados galácticos, mas essa nomenclatura caiu em desuso.

**Classe Espectral** - Classificação de uma estrela de acordo com seu espectro. A principal característica da estrela evidenciada no espectro é a temperatura, por isso a classe espectral (ou tipo espectral) de uma estrela estabelece sua temperatura. Atualmente as estrelas estão classificadas em ordem decrescente de temperatura como O, B, A, F, G, K, M. As estrelas O são azuis e tem temperaturas de 20000 K, as estrelas M são vermelhas e têm temperaturas de aproximadamente 3000 K. Cada espectro abaixo tem, à esquerda, a temperatura evidenciada e, à direita, o tipo espectral correspondente.

**Diagrama HR** - É um gráfico da luminosidade de estrelas em função de sua temperatura. O diagrama pode ter diferente formas, servindo tanto para apresentar resultados teóricos como dados observacionais de grupos de estrelas. No eixo vertical, em vez da luminosidade (sempre em escala logarítmica), pode ser representada a magnitude absoluta. No eixo horizontal, em que a temperatura diminui para a direita, pode ser usada a classe espectral ou o índice de cor das estrelas. Quando as propriedades de um grupo de estrelas são graficadas em um diagrama HR, geralmente a grande maioria delas ocupará uma faixa estreita indo do canto superior esquerdo (altas temperaturas, altas luminosidades) até o canto inferior direito (baixas temperaturas e baixas luminosidades). Essa região do diagrama é chamada sequência principal. O fator que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa: estrelas mais massivas são mais quentes e mais luminosas. Algumas estrelas se

concentram acima da sequência principal, na região superior direita (estrelas frias e luminosas). Essa é a região das estrelas chamadas gigantes. Bem no topo do diagrama existem algumas estrelas ainda mais luminosas: são chamadas supergigantes. Finalmente, algumas estrelas se concentram no canto inferior esquerdo (estrelas quentes e pouco luminosas): são chamadas anãs brancas. As estrelas ocupam uma ou outra localização no diagrama HR (relação entre a sua temperatura e a sua luminosidade) dependendo do estágio evolutivo em que se encontra. O diagrama tem as iniciais de seus descobridores: Hertzsprung e Russell.

**Estrela** - Estrelas são imensas esferas de gás, constituídas basicamente de hidrogênio e hélio, que brilham porque produzem energia através de reações nucleares. Essas reações acontecem na região central da estrela, e consistem na fusão do hidrogênio em hélio e posteriormente em elementos mais pesados. A massa mínima necessária para formar uma estrela é 0,08 massas solares ( $1 \text{ massa solar} = 1,98 \times 10^{30} \text{ kg}$ ), aproximadamente 70 vezes a massa de Júpiter; abaixo dessa massa, o corpo não atinge temperatura central suficientemente alta para fazer a fusão do hidrogênio em hélio, e será uma anã marrom ou um planeta. As estrelas mais massivas conhecidas têm massas de até 140 massas solares. A massa da estrela determina sua temperatura e sua luminosidade durante a maior parte da sua vida, quando está na sequência principal.

**Índice de Cor** - Diferença entre a magnitude de uma estrela medida em uma banda espectral e outra.

**Protoestrela** - Estágio inicial na vida de uma estrela, abrangendo desde o instante em que a região central da nebulosa se torna opaca à radiação que emite (forma-se uma fotosfera) até o instante em que a estrela atinge a sequência principal de idade zero.

**Vento Solar:** Fluxo de partículas carregadas (elétrons, prótons e íons), que emana constantemente da coroa solar, a uma velocidade de em torno de 400km/s. O Sol perde  $10^{-13} M_{\text{sol}}/\text{ano}$  (10 bilhões de toneladas/hora) através do vento solar.