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

Adeildo Santos de Jesus

Velocidades Radiais Astrométricas

São Paulo
2023

Adeildo Santos de Jesus

Velocidades Radiais Astrométricas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientador: Prof. Dr. Ramachrisna Teixeira

São Paulo

2023

Agradecimentos

À minha família que sempre esteve ao meu lado e me incentivou continuamente ao longo de meus anos de estudo;

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Ramachrisna Texeira, pelo apoio continuo, por sua paciência, motivação, entusiasmo e imenso conhecimento;

Aos professores da graduação pelos ensinamentos, em especial à Prof^a. Dr^a. Jane Cristina Gregorio Hetem, com quem tive mais contato fora da sala de aula durante a minha participação no projeto Mania de Ensinar;

Aos amigos pelo apoio, ajuda e companheirismo;

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP) e à Universidade de São Paulo (USP) pelo apoio institucional;

À Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo, pelo apoio financeiro, sob o projeto n^o: 197 do Programa Unificado de Bolsas de Estudo 2022;

À Agência Espacial Europeia (ESA), pois este trabalho utilizou dados da missão Gaia e HIPPARCOS da ESA e ao Consórcio Gaia de Processamento e Análise de Dados (DPAC);

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*E pur si muove!*"

Frase atribuída a Galileu Galilei

"*That's one small step for a man, one giant leap for mankind*"

Neil Armstrong

Resumo

O presente trabalho tem como tema central a determinação astrométrica de velocidades radiais. Trata-se de uma grandeza fundamental da Astronomia que pode tanto revelar companheiras estelares e subestelares não diretamente observáveis, quanto, de maneira mais geral, compor a velocidade espacial de estrelas e com isso embasar o conhecimento da história da Via Láctea. A velocidade radial é comumente obtida por meio de observações espectroscópica, entretanto, o objetivo deste trabalho é obter a velocidade radial de um astro sem necessitar da informação do deslocamento de raias espectrais. A possibilidade de obter a mesma grandeza independentemente dos espectros nos livra de algumas dificuldades como, por exemplo, a assimetria das raias espectrais, o *redshift* gravitacional e os deslocamentos na atmosfera das estrelas e ao mesmo tempo, se for o caso, nos permite melhor compreender essas perturbações no espectro estelar. Neste trabalho, nós determinamos as velocidades radiais astrométricas de 41 estrelas em comum entre os catálogo Gaia DR3 e HIPPPARCOS a partir da variação anual do movimento próprio, chamada de aceleração perspectiva. Essa variação é função do movimento próprio, da paralaxe e da própria velocidade radial. Essas estrelas apresentaram valores coerentes com as velocidade radiais espectroscópicas (Gaia DR3), principalmente quando o valor do produto entre o movimento próprio e a paralaxe é elevado. No entanto, apesar do número limitado de estrelas para as quais a velocidade radial foi obtida neste trabalho, já constata-se que, com a Missão Espacial Gaia, a Astrometria entrou na era do microssegundo de grau, o que abre uma excelente perspectiva futura de determinação significativa dessa variação temporal e obtenção da velocidade radial apenas com dados astrométricos.

Abstract

The central theme of this present work is the astrometric determination of radial velocities. This fundamental quantity in Astronomy enables us to reveal both stellar companions and exoplanets that are not directly observable, and, more generally, compose the space velocity of stars and therefore underpin the knowledge of the history of the Milky Way. Radial velocity is commonly obtained from spectroscopic observations, however, this work aims to determine the astrometric stellar radial velocities, that is, to obtain the radial velocities of stars without using the displacement of spectral lines information. The possibility of obtaining the same physical quantity irrespective of the spectra allows us to better model possible displacements of the spectral lines caused by the star's gravity, by invisible companions, by mass movement on the surface of the target star, etc. In this work, we determined the astrometric radial velocities of 41 stars found in both the Gaia DR3 and the HIPPARCOS catalogs based on the proper motion variation with respect to time, which is also referred to as perspective acceleration. This variation is a function of the displacement, the distance and the radial velocity. These stars showed consistent values with the spectroscopic radial velocities (Gaia DR3), especially when the value of the product of the proper motion by the parallax is high. However, despite the limited number of stars for which the radial velocity was obtained in this work, it can already be said that this radial velocity determination strategy is becoming a reality with the increasing accuracy of astrometric observations using the Gaia satellite, which opens an excellent future perspective for significant determination of this temporal variation and obtaining radial velocity only from astrometric data.

Lista de Figuras

2.1 Alteração das componentes nas direções radial e transversal da velocidade espacial de uma estrela devido à mudança de perspectiva. 17

4.1 Histograma da aceleração perspectiva das estrelas comuns aos catálogos Gaia e HIPPARCOS. 21

4.2 Gráfico da aceleração perspectiva de todas as estrelas anteriores à filtragem, em vermelho, e das selecionadas para o trabalho, em azul, em função da distância das estrelas. 22

4.3 Gráfico dos erros relativos em aceleração perspectiva em função da distância. 23

4.4 Ampliação do gráfico apresentado na Figura 4.3. 23

5.1 Histograma do erro em movimento próprio das estrelas após a filtragem descrita na Seção 3.2 no catálogo Gaia, em vermelho, e no catálogo HIPPARCOS, em azul (mas/ano). 27

5.2 Histograma das velocidades radiais astrométricas para estrelas com velocidades radiais astrométricas até 1200 km/s. 29

5.3 Velocidades radiais astrométricas em função das velocidades radiais espectroscópicas (Gaia DR3) 31

5.4 Velocidades radiais astrométricas em função das velocidades radiais espectroscópicas (Gaia DR3) de 7 estrelas que possuem erros relativos em aceleração perspectiva menores do que 20%. 32

Sumário

1. Introdução 15

2. Aceleração devido à mudança de perspectiva 17

3. Base de dados 19

3.1 Fonte de dados 19

3.2 Seleção dos objetos alvos 20

4. Panorama dos dados 21

5. Análise 25

6. Conclusões 33

Referências 35

Capítulo 1

Introdução

A velocidade radial é uma das grandezas observáveis fundamentais no estudo da cinemática e da dinâmica da Via Láctea. Sua determinação possibilita a detecção de companheiras estelares e subestelares não diretamente observáveis, grupos estelares, etc. Normalmente, ela é determinada a partir das medidas dos deslocamentos de raias espectrais para o azul (aproximação) ou vermelho (afastamento).

Entretanto, esses deslocamentos podem ser afetados por outros fenômenos como *redshift* gravitacional, perturbações por companheiras estelares não diretamente observáveis, exoplanetas e deslocamentos de matéria na superfície da estrela. Naturalmente, a possibilidade de determinação independente do deslocamento das raias nos leva a uma maior compreensão e modelização desses fenômenos e maior acurácia na velocidade radial obtida.

A outra componente da velocidade espacial é a velocidade transversal responsável pelo deslocamento de um astro no céu, ou seja, pelo movimento do astro perpendicular à linha de visada. Essa componente é obtida pelo movimento próprio, que corresponde ao deslocamento angular anual do astro no céu, ou seja, à mudança de sua posição com o tempo, e pelo conhecimento da distância, determinada pela paralaxe estelar. Tanto o movimento próprio quanto a paralaxe estelar são grandezas astrométricas que estão sendo medidas abundantemente e com grande precisão pela Missão Espacial Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016, 2021).

O objetivo desse projeto é obter a velocidade radial sem passar pelos deslocamentos das raias espectrais que não ocorrem única e exclusivamente pelo movimento na direção radial.

Capítulo 2

Aceleração devido à mudança de perspectiva

Medidas altamente precisas de movimentos próprios (μ) em épocas distintas permitem a determinação de suas variações temporais, ou seja, da aceleração perspectiva ($\dot{\mu}$), dada pela Equação 2.1, que é função da própria velocidade radial (V_r), do movimento próprio e da distância (r) da estrela alvo, vide Figura 2.1.

$$\dot{\mu} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{t_2 - t_1} \approx \frac{-2V_r\mu}{r}, \tag{2.1}$$

onde μ_1 e μ_2 correspondem aos movimentos próprios nas diferentes épocas. Neste trabalho, consideramos $t_1 = 1991{,}25$ (do catálogo HIPPARCOS - High Precision Parallax Collecting Satellite) e $t_2 = 2016{,}0$ (medido pela missão Gaia).

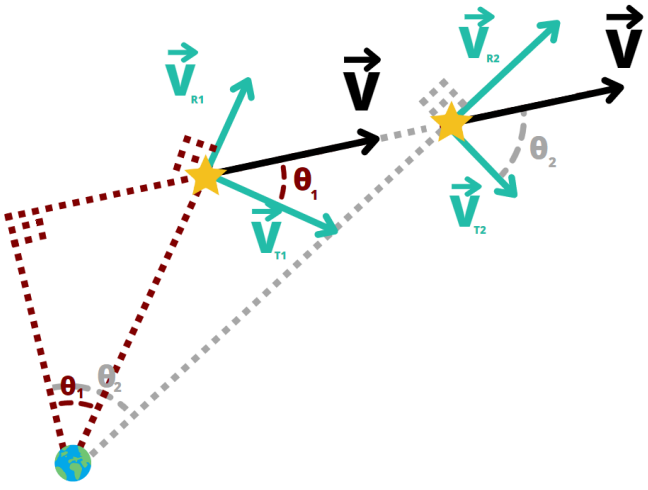

Figura 2.1: Observe que a medida que uma estrela se move com velocidade $\vec{V}$, suas componentes nas direções radial e transversal são alteradas. Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Recentemente, Lindegren e Dravins (2021) mostraram que é possível obter resultados significativos para algumas dezenas ou centenas de estrelas com a combinação dos movi-

mentos próprios Gaia (Gaia Collaboration et al., 2021) com aqueles do catálogo HIPPARCOS (ESA, 1997). Apesar desses resultados serem ainda bastante limitados, a perspectiva de novas missões espaciais astrométricas e outros instrumentos com medidas de altíssima precisão apontam para um futuro próximo com aumento significativo de velocidades radiais astrométricas.

Capítulo 3

Base de dados

3.1 Fonte de dados

As principais fontes de dados para a realização deste trabalho foram os dados astrométricos observados pelos satélites HIPPPARCOS e Gaia com épocas médias de 1991 e 2016, respectivamente.

O satélite HIPPARCOS mediu posições, movimentos próprios anuais e paralaxes com precisões de milissegundo de grau para aproximadamente 120 mil estrelas pré-selecionadas por seus interesses científicos.

O sucessor do satélite HIPPARCOS, o satélite Gaia, obteve dados astronômicos com precisão sem precedentes, incluindo dados astrométricos e fotométricos para aproximadamente 2 bilhões de objetos celestes e dados espectroscópicos para uma pequena fração desse valor, o que o torna o maior e mais preciso catálogo de objetos estelares da atualidade. A publicação de seus dados ocorreu em sucessivas versões com melhorias significativas a cada nova disponibilização. A primeira delas foi chamada de Gaia *Data Release* 1 (Gaia DR1) e foi publicada em Setembro de 2016 (Gaia Collaboration et al., 2016). A segunda versão do catálogo foi publicada em 2018 e chamada de Gaia *Data Release* 2 (Gaia DR2) (Gaia Collaboration et al., 2018). O terceiro lançamento foi realizado em duas partes. A primeira parte, chamada de Gaia *Early Data Release* (EDR3), foi publicada em 3 de dezembro de 2020 e abrange observações de julho de 2014 a maio de 2017 (Gaia Collaboration et al., 2021), contendo dados astrométricos e parte da fotometria. A segunda parte, chamada de Gaia *Data Release* (DR3), foi publicada em junho de 2022 (Gaia Collaboration et al., 2022) e contém espectros e soluções para objetos que receberam tratamentos especiais. Em comparação ao EDR3, o DR3 inclui, por exemplo, 33 milhões de velocidades radiais

espectrocópicas, além de parâmetros astrofísicos de 470 milhões de estrelas.

3.2 Seleção dos objetos alvos

Os dados do catálogo GAIA DR3 e HIPPARCOS estão disponíveis no repositório de dados da missão Gaia (*Gaia Archive*). Em um primeiro momento, realizamos uma busca dos alvos em comum nos dois catálogos, a partir da tabela $gaiadr3.hipparcos2_best_neighbour$, em que são listados os objetos com o identificador GAIA e o identificador HIPPARCOS, facilitando o *crossmatch* das tabelas. Dessa forma, nós obtivemos 99525 objetos com medidas de movimento próprio, paralaxe e velocidade radial espectroscópica obtidos pelo GAIA e pelo HIPPARCOS.

Após esta etapa, procedemos a um processo de filtragem dos dados necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, eliminamos estrelas com dados incompletos ou com paralaxe negativa tanto no catálogo GAIA, quanto no HIPPARCOS. Posteriormente, filtramos as estrelas com erros relativos nas paralaxes no catálogo Gaia maiores do que 10%, assim como as estrelas com erros relativos nos movimentos próprios nos catálogos HIPPARCOS e Gaia maiores do que 10%, o que resultou em 65981 estrelas. Em seguida, selecionamos apenas as estrelas com no máximo 100 pc de distância, ou seja, uma paralaxe mínima de 10 mas, o que resultou em 15553 estrelas. A adoção deste último critério é baseada no fato de que a aceleração perspectiva é fortemente dependente da distância: quanto mais distante é a estrela, menor é a sua aceleração perspectiva. Com esses critérios, garantimos a qualidade das medidas das estrelas que serão analisadas neste trabalho.

Capítulo 4

Panorama dos dados

Nas Figuras 4.1 e 4.2, encontram-se o histograma da aceleração perspectiva das estrelas comuns aos catálogos GAIA e HIPPARCOS e o gráfico da aceleração persepctiva dessas estrelas em função da distância. Em vermelho, estão representadas todas as 99525 estrelas comuns pré-filtragem, enquanto, em azul, estão representadas as 15553 estrelas após a filtragem descrita na Seção 3.2.

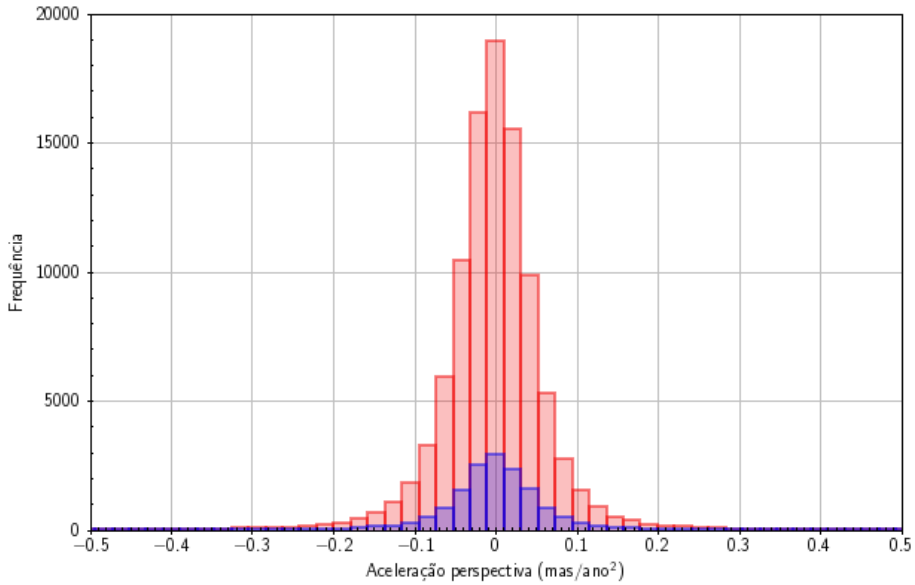

Figura 4.1: Histograma da aceleração persepectiva das estrelas comuns aos catálogos Gaia e HIPPARCOS. Todas as estrelas pré-filtragem estão representadas em vermelho e as selecionadas para o trabalho após processo de filtragem estão representadas em azul. A largura da barra é de 0,04 mas/ano^2.

Inicialmente, no que se refere aos dados pré-filtragem presentes no histograma da Figura 4.1, constata-se a presença de um pico muito proeminente em torno da aceleração perspectiva nula. Isso indica que mesmo a separação temporal de 24,75 anos entre as observações

foi insuficiente para produzir uma diferença significativa na variação do movimento próprio.

Observamos uma diminuição considerável no número total de estrelas em comparação com as estrelas filtradas mostradas em azul. Embora algumas dessas estrelas em vermelho apresentem aceleração perspectiva diferente de zero, elas não atendem aos critérios de qualidade descritos na Seção 3.2. Seria necessário um período de tempo mais longo para fornecer valores de aceleração perspectiva com maior precisão.

No que concerne ao gráfico da Figura 4.2, nota-se, como esperado, que as estrelas mais próximas geralmente apresentam uma maior aceleração perspectiva em relação às estrelas mais distantes. Dessa forma, a restrição de uma distância máxima de 100 *pc* em conjunto com os outros critérios na filtragem dessas estrelas garantiram que as acelerações perspectivas das estrelas analisadas fossem maiores e mais confiáveis.

Ademais, observou-se que as estrelas em vermelho com paralaxe negativa, que resultaria em distância negativa, foram retidas corretamente durante a seleção. As possíveis explicações para essas paralaxes negativas, que são relativamente raras no catálogo Gaia, são erros de medição, limitações observacionais e movimentos complexos astrométricos, por exemplo, sistemas estelares múltiplos.

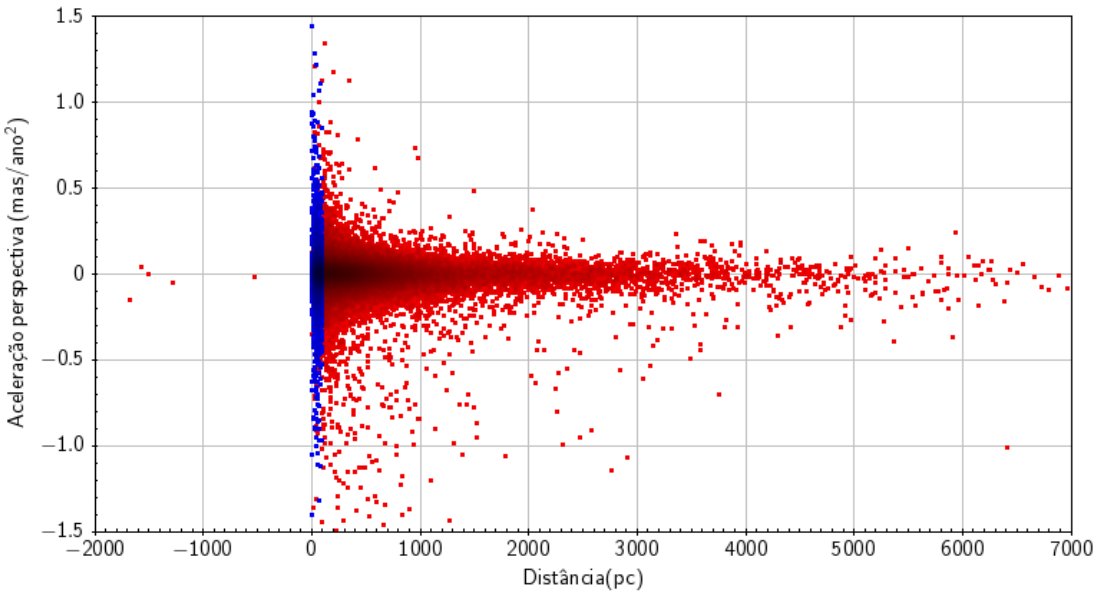

Figura 4.2: Gráfico da aceleração perspectiva de todas as estrelas pré-filtragem, em vermelho, e das selecionadas para o trabalho, em azul, em função da distância das estrelas.

O próximo passo consistiu na análise visual dos erros relativos da aceleração perspectiva. Com o objetivo de obter uma amostra precisa, os erros relativos em aceleração perspectiva

foram limitados a um valor máximo de 50%, o que resultou em 2060 estrelas. O gráfico dos erros relativos em aceleração persepctiva em função da distäncia encontra-se na Figura 4.3 e, de forma ampliada, na Figura 4.4. Nestas figuras, as estrelas pós-filtragem estão representadas em azul, enquanto as 2060 estrelas com erro relativo máximo de 50% estão representadas em amarelo.

Uma maior redução do limite dos erros relativos da aceleração perspectiva restringiria ainda mais o tamanho da amostra, o que poderia limitar a estatística e a robustez da amostra analisada. Por exemplo, erros relativos máximos de 20% e 10%, resultariam em 339 estrelas e 160 estrelas, respectivamente.

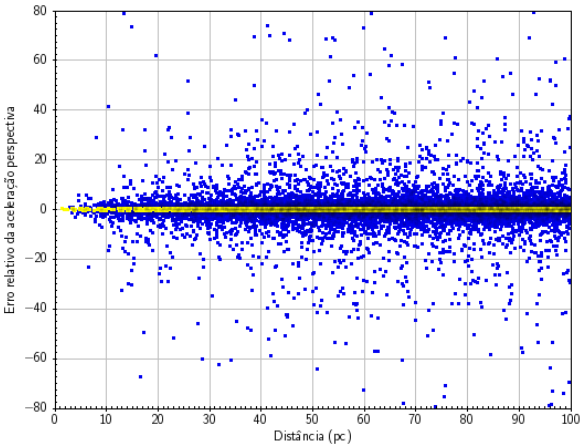

Figura 4.3: Gráfico dos erros relativos em aceleração perspectiva em função da distância.

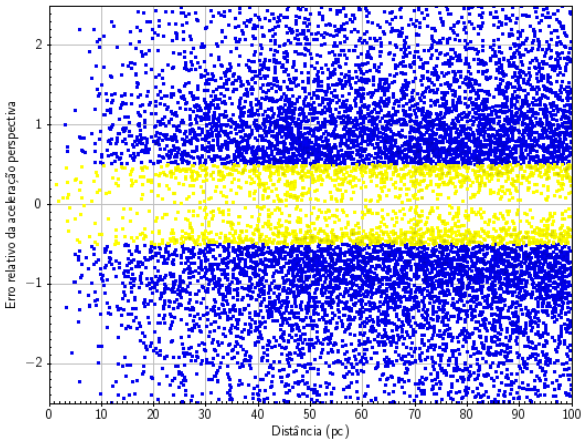

Figura 4.4: Ampliação do gráfico apresentado na Figura 4.3.

Capítulo 5

Análise

A partir da Equação 2.1, foram obtidas as velocidades radiais astrométricas para 339 estrelas. A título de ilustração, detalhamos aqui os resultados obtidos para a estrela de Barnard, identificada por HIP 87937 e por source ID 4472832130942575872 nos catálogos HIPPARCOS e Gaia, respectivamente.

Essa estrela possui movimento próprio igual a $(10357,7 \pm 1,3)$ mas/ano e época média de $1991,25$ no catálogo HIPPARCOS. Já no catálogo GAIA, essa mesma estrela possui movimento próprio igual a $(10393,349 \pm 0,036)$ mas/ano, paralaxe de $(546,976 \pm 0,040)$ mas e época média de $2016,0$.

A diferença de movimento próprio para essa estrela observada no intervalo de $24,75$ $anos$ foi de aproximadamente $35,7$ mas, resultando em uma aceleração perspectiva de $(1,44 \pm 0.05)$ mas/ano^2 e em uma velocidade radial astrométrica igual a $(-123,9 \pm 4,5)$ km/s. No catálogo GAIA DR3, essa mesma estrela possui velocidade radial espectroscópica igual a $(-110,46 \pm 0,13)$ km/s. A diferença entre essas velocidades radiais está dentro do intervalo de confiança de 3σ, o que sugere que os valores são estatisticamente coerentes.

Em relação as 339 estrelas da nossa amostra, obtivemos valores espúrios de velocidades radiais astrométricas, apesar dos filtros aplicados à amostra. Os valores espúrios já eram esperados, dado que o catálogo HIPPARCOS apresenta medidas de movimento próprio com erros grandes, em uma base de tempo curta.

Uma das explicações para altas velocidades radiais e suas incertezas é que elas são extremamente sensíveis a valores pequenos de movimentos próprios e paralaxes. Quando a paralaxe de uma estrela é pequena significa que ela está muito distante e, por causa disso, a sua distância geralmente é medida com menor precisão. Além disso, quando o movimento próprio dela é muito pequeno significa que a variação do seu movimento próprio é mal

medida.

Isso é consistente com o fato de que, se propagarmos a incerteza da velocidade radial astrométrica, σ_{Vr}, da Equação 2.1, considerando que os erros são devidos principalmente à menor precisão do satélite HIPPARCOS, podemos, para uma primeira estimativa, ignorar as incertezas das medidas do satélite Gaia e obter:

$$\sigma_{Vr} \approx \frac{A}{\pi pm_{gaia} \Delta t^2} \sigma_{x_{hip}}, \tag{5.1}$$

onde A é um fator de conversão de modo que o valor da incerteza da velocidade seja obtido em km/s e é dada por 9.7779222168×10^8 $mas \cdot km \cdot ano/s$, Δt é a representação da variação temporal, neste trabalho, dada por 24.75 $anos$, $\sigma_{x_{hip}}$ representa a precisão média da posição medida pelo satélite HIPPARCOS dada por 1 mas; pm_{gaia} e π representam o movimento próprio e a paralaxe medidos pelo satélite Gaia, repectivamente.

Substituindo os valores de A, Δt e $\sigma_{x_{hip}}$, obtemos:

$$\sigma_{Vr} \approx \frac{1.596 \times 10^6 (\text{km/s}) mas^2}{\pi pm_{gaia}}. \tag{5.2}$$

Com base nesses resultados, podemos inferir que para obtermos velocidades radiais astrométricas com incertezas menores que 10 km/s, por exemplo, seria necessário que a estrela possuísse ao menos um produto entre o movimento próprio e a paralaxe de no mínimo 159600 mas^2/ano. Esta estimativa é uma primeira aproximação que não leva em consideração os erros em movimentos próprios e em paralaxes medidos pelo satélite Gaia. No cruzamento entre os catálogos do satélite Gaia e do HIPPARCOS, apenas 67 estrelas apresentam produtos maiores que 159600 mas^2/ano.

Dessa forma, constata-se que a incerteza da velocidade radial é diretamente proporcional a A, um valor relativamente grande, e inversamente proporcional ao produto do movimento próprio e da paralaxe, que resulta em um valor pequeno para a maioria das estrelas.

O histograma dos erros em movimento próprio para as estrelas consideradas é apresentado na Figura 5.1, com as medidas obtidas pelo Gaia em azul e as medidas obtidas pelo HIPPARCOS, em vermelho. Nota-se que o pico dos dados do catálogo HIPPARCOS fica deslocado mais à direita no histograma e disperso em relação àquele do catálogo Gaia, indicando uma menor precisão e menor acurácia. Para esses dados, a média do erro

em movimento próprio HIPPARCOS é 1,10(20) mas/ano, enquanto a média do erro em movimento próprio Gaia é 0,0439(15) mas/ano.

Se os erros em movimento próprio HIPPARCOS da Equação 5.2 fossem da mesma ordem de grandeza dos erros em movimento próprio no catálogo Gaia, negligenciando as incertezas em movimento próprio e em paralaxe pelo satélite Gaia, teríamos em torno de 2466 estrelas com incertezas com valores máximos de 10 km/s.

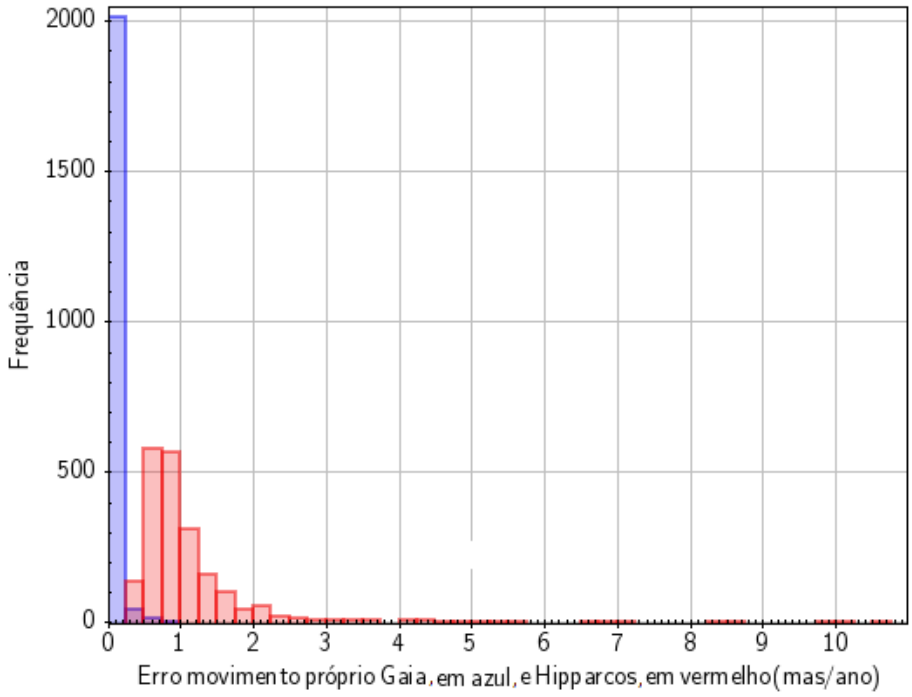

Figura 5.1: Histograma do erro em movimento próprio das estrelas após a filtragem descrita na Seção 3.2 no catálogo Gaia, em vermelho, e no catálogo HIPPARCOS, em azul (mas/ano). A largura da barra é de 0.25 (mas/ano).

Portanto, para nossa análise nos ativemos apenas a estrelas com erros relativos na aceleração perspectiva limitados a um valor máximo de 50% e com velocidades radiais menores que 1200 km/s, reduzindo nossa amostra de 339 para 39 estrelas. Todas essas estrelas também possuíam velocidades espectrais no catálogo GAIA DR3. Todavia, o satélite Gaia mediu as velocidades radiais espectrais de estrelas com magnitude limite de 14 mag na banda G. Além destas, foram adicionadas na amostra três estrelas que não possuem velocidade radial espectroscópica no catálogo GAIA DR3, mas possuem essa medida no catálogo GAIA DR2 e no catálogo de entrada do *SPIRou*. Essas três estrelas obedecem aos critérios de seleção anteriormente discutidos, aumentando nossa amostra para 41 estrelas. A distribuição das velocidades radiais astrométricas que nós obtivemos

para essa amostra está apresentada no histograma da Figura 5.2. Na Tabela 5.1, essas velocidades estão listadas em conjunto com as velocidade radiais espectroscópicas obtidas pelo GAIA DR3. No gráfico da Figura 5.3, podemos observar a comparação das velocidades radiais astrométricas com as velocidade radiais espectroscópicas obtidas pelo GAIA DR3.

Na Tabela 5.1, também são apresentados os resultados de velocidades radiais astrométricas obtidas por Lindegren e Dravins (2021). Nesse trabalho, que também utiliza dados dos movimentos próprios e das paralaxes do catálogo Gaia (Gaia Collaboration et al., 2021) em conjunto com os movimentos próprios do catálogo HIPPARCOS (ESA, 1997), foi feita uma série de correções nesses dados levando em consideração diferenças entre as orientações dos sistemas de referência Gaia e HIPPARCOS. De forma geral, as velocidades radiais astrométricas obtidas por eles não destoaram tanto das velocidades obtidas no presente trabalho.

Para as 7 estrelas com velocidades radiais astrométricas mais próximas da velocidade da velocidade radial espectroscópica, verificou-se que elas possuem erros relativos em aceleração perspectiva menores do que 20%. Essas estrelas correspondem as 7 primeiras linhas da Tabela 5.1 e elas estão representadas no gráfico da Figura 5.4. Constatamos em relação a elas que o valor do produto entre o movimento próprio e a paralaxe estão entre os mais altos e as incertezas em velocidade são as menores.

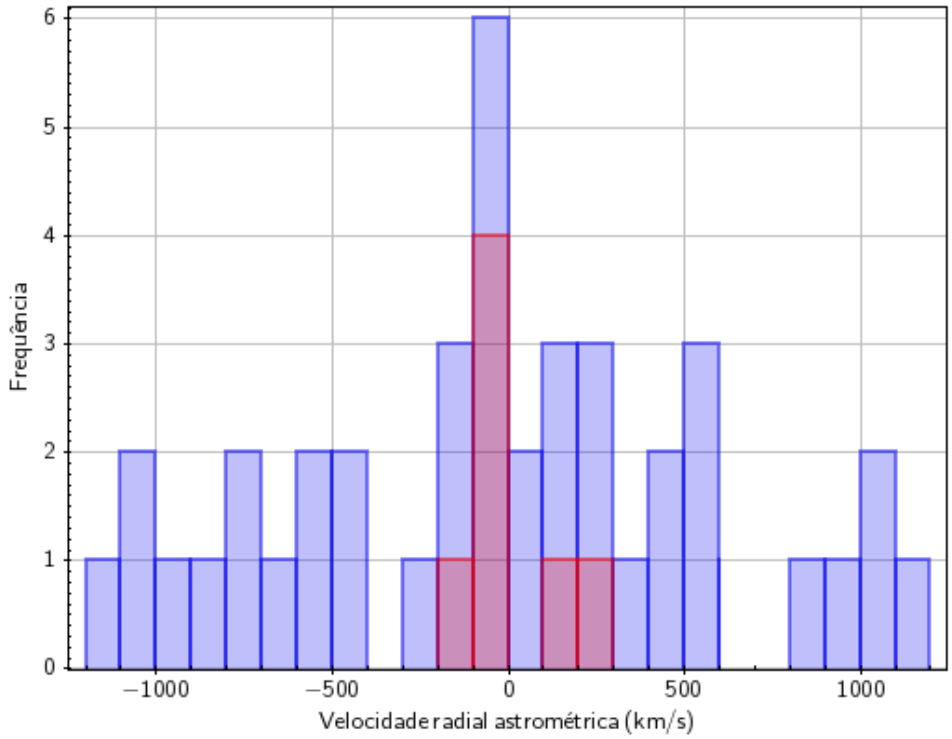

Figura 5.2: Histograma das velocidades radiais astrométricas para estrelas com velocidades radiais astrométricas até 1200 km/s. As barras em vermelhos indicam 7 estrelas que possuem erros relativos em aceleração perspectiva menores do que 20% . A largura da barra é de 100 km/s.

Tabela 5.1 - Tabela de velocidades radiais

HIP	**VRA (km/s)**	**VRE (km/s)**	**VRAL (km/s)**	**Produto** (mas^2/s)
87937	$-123,85 \pm 4,49$	$-110,46 \pm 0,13$	-110,92 ± 0,37	5684911
24186	$235,32 \pm 8,35$	$245,05 \pm 0,13$	244,11 ± 0,70	2197373
108870	$-64,2 \pm 7,9$	$-40,42 \pm 0,13$	-64,19 ± 2,55	1294002
104217	$-84,1 \pm 6,6$	$-64,59 \pm 0,12$	80,86 ± 0,74	1481138
54211	112 ± 20	$68,41 \pm 0,12$	80,97 ± 1,85	918576
57939	-86 ± 13	$-98,05 \pm 0,12$	-98,61 ± 0,99	769937
54035	$-98,4 \pm 8,1$	$-85,11 \pm 0,13$	-86,15 ± 0,68	1889801
70890	-41 ± 10	$-21,94 \pm 0,22$	-23,20 ± 0,74	2964143
1475	-66 ± 18	$11,36 \pm 0,12$	-57,57 ± 1,28	819860
23311	223 ± 106	$21,36 \pm 0,12$	37,02 ± 6,09	139859
70890	-41 ± 10	$-21,94 \pm 0,22$	-23,20 ± 0,74	2964143
99461	-166 ± 46	$-129.27 \pm 0,12$	-	273134
57544	-536 ± 170	$-111,50 \pm 0,15$	-	169304
57548	-202 ± 93	$-30,66 \pm 0,01$	-	404607
36208	54 ± 18	$17,35 \pm 0,19$	15,08 ± 1,87	986625
17651	-683 ± 310	$7,82 \pm 0,12$	-	31108
99232	-635 ± 307	$-22,10 \pm 0,12$	-	31759
2941	-589 ± 276	$-10,16 \pm 0,12$	-	30664
115562	-684 ± 297	$10 \pm 0,12$	-	23699
2121	-712 ± 309	$-7,96 \pm 0,12$	-	18463
16094	-734 ± 322	$-11,50 \pm 0,12$	-	18009
62345	-773 ± 336	$9,39 \pm 0,12$	-	17836
110109	561 ± 169	$-12,73 \pm 0,01$	-	54667
45202	-808 ± 371	$-17,10 \pm 0,12$	-	51640
56998	-800 ± 214	$13,54 \pm 0,13$	-	55040
110618	-495 ± 189	$32,34 \pm 0,12$	-	51563
50413	-834 ± 383	$-14,03 \pm 0,12$	-	51059
47293	-875 ± 399	$-17,97 \pm 0,12$	-	50943
28201	-884 ± 404	$-17,71 \pm 0,12$	-	50781
117106	-905 ± 413	$-18,56 \pm 0,12$	-	50694
47981	-956 ± 403	$-28,03 \pm 0,15$	-	63594
31709	-968 ± 445	$-15,41 \pm 0,12$	-	50457
6677	-975 ± 448	$-15,56 \pm 0,12$	-	50441
14328	-1000 ± 461	$-15,34 \pm 0,12$	-	50383
45343	-1034 ± 495	$10,64 \pm 0,12$	-	260073
51523	-1062 ± 406	$21,18 \pm 0,12$	-	21275
35296	-1099 ± 428	$-13,58 \pm 0,12$	-	50336
73284	-1124 ± 516	$-15,10 \pm 0,12$	-	50116
26078	-1180 ± 548	$-15,32 \pm 0,12$	-	50047

Legenda. Coluna: **1- HIP**: Identificador da estrela no catálogo HIPPARCOS. **2- VRA** (km/s): Velocidade radial astrométrica. **3- VRE** (km/s): Velocidade radial espectroscópica. **4- VRAL** (km/s): Velocidade radial astrométricas obtidas por Lindegren e Dravins (2021). **5- Produto**: Produto entre o movimento próprio e a paralaxe obtidos pelo Gaia.

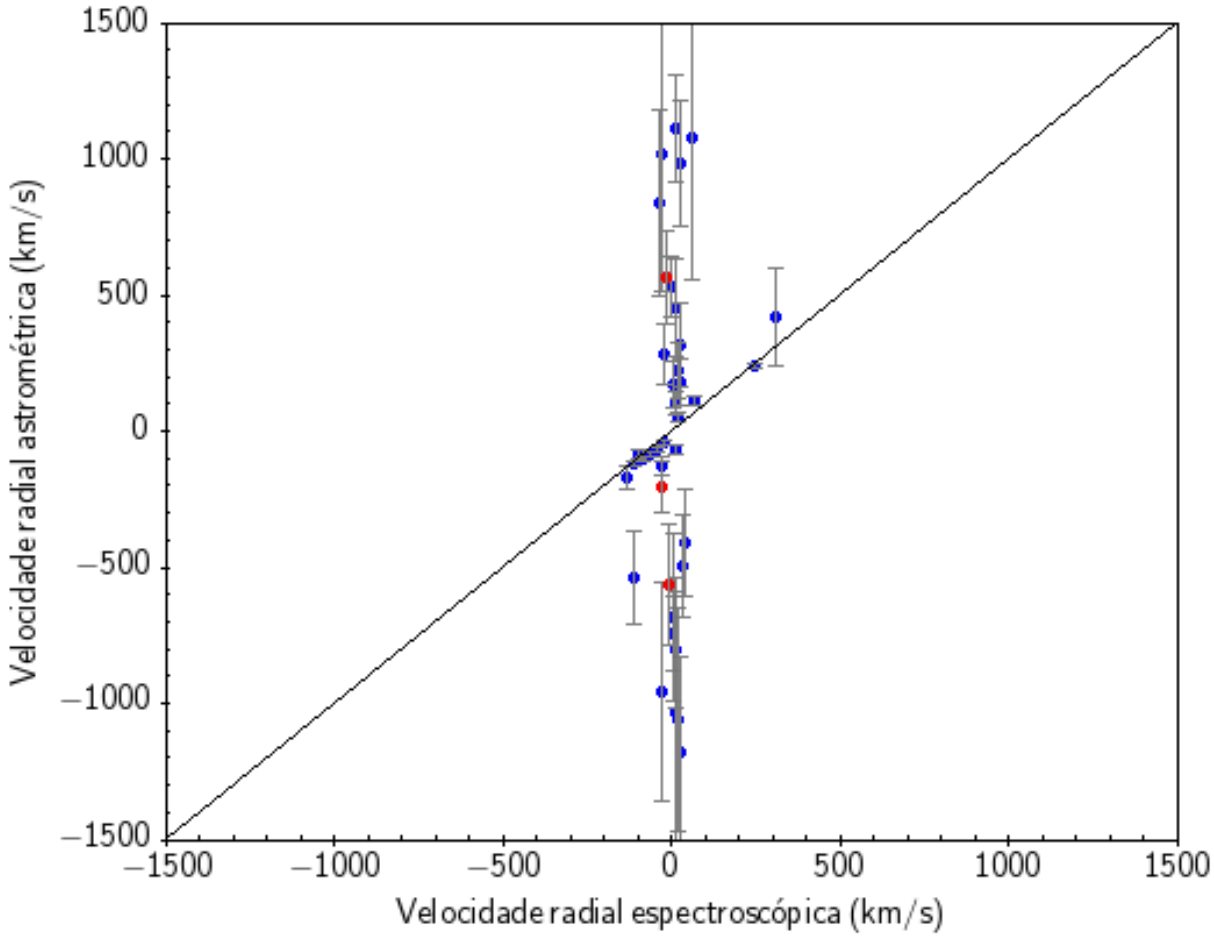

Figura 5.3: Velocidades radiais astrométricas em função das velocidades radiais espectroscópicas (Gaia DR3). Os pontos em vermelhos indicam estrelas que apresentam valores para velocidades radiais espectroscópicas que foram encontradas em outros catálogos.

.

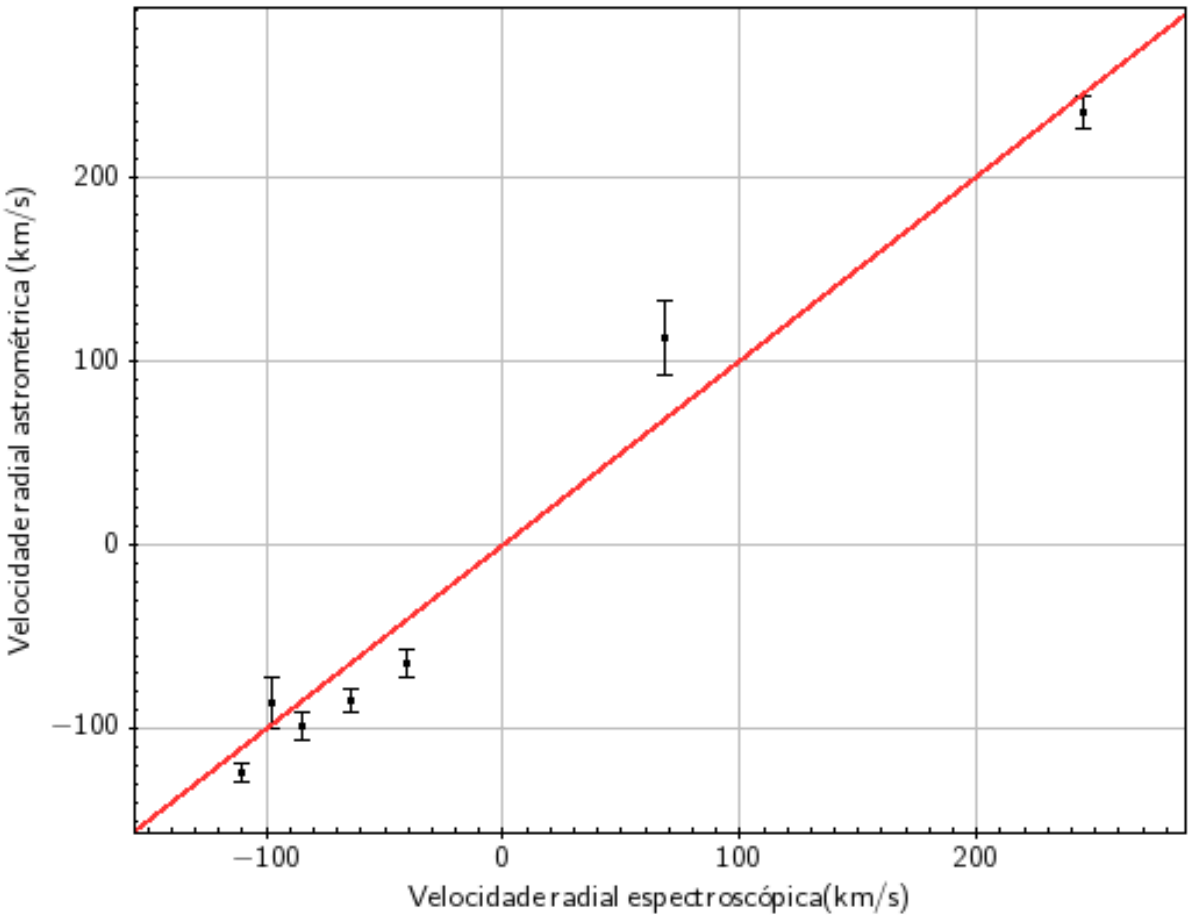

Figura 5.4: Velocidades radiais astrométricas em função das velocidades radiais espectroscópicas (Gaia DR3) de 7 estrelas que possuem erros relativos em aceleração perspectiva menores do que 20%.

Capítulo 6

Conclusões

Primeiramente, o trabalho consistiu na familiarização com conceitos e manipulação de grandes quantidades de dados observacionais. Após um processo de filtragem de objetos utilizando como critérios a qualidade da amostra e limitações físicas, obtivemos as velocidades radiais astrométricas de 41 estrelas. Para estrelas que apresentaram um valor de produto entre o movimento próprio e a paralaxe alto, obtivemos resultados próximos das velocidades radiais espectroscópicas obtidas pelo satélite Gaia, indicando uma consistência entre essas medidas. Contudo, este estudo se baseou em uma pequena amostra que atendeu os critérios de qualidades impostos. Por fim, os resultados obtidos nessa pesquisa já sugerem a possibilidade de obtenção de acelerações perspectivas e consequentemente das velocidades radiais astrométricas a partir dessas observações.

.

Referências Bibliográficas

ESA, The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission, VizieR Online Data Catalog, 1997, vol. 1200

Gaia Collaboration, Brown A. G. A., et al. Gaia Data Release 2: Summary of the contents and survey properties, A&A, 2018, vol. 616, p. A1

Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., et al. Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties., A&A, 2021, vol. 649, p. A1

Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J. H. J., et al. The Gaia mission, A&A, 2016, vol. 595, p. A1

Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A. G. A., et al. Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties, A&A, 2022

Lindegren L., Dravins D., Astrometric radial velocities for nearby stars, Astronomy &amp Astrophysics, 2021, vol. 652, p. A45

—