



Universidade Federal de Sergipe

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Departamento de Física

Programa de Pós-Graduação em Física

Nayara Isabelle Feliciano Souza

**Parâmetros orbitais estelares homogêneos a partir de
observações com grandes levantamentos espectroscópicos**

Dissertação de Mestrado

**São Cristóvão - SE
Brasil
2025**

Nayara Isabelle Feliciano Souza

Parâmetros orbitais estelares homogêneos a partir de observações com grandes levantamentos espectroscópicos

Dissertação apresentada ao Departamento de Física da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Física: Astrofísica

Orientador: Dr. Diogo Martins Souto

Coorientador: Dr. Hélio Dotto Perottoni

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
Programa de Pós-Graduação em Física

**“Parâmetros orbitais estelares homogêneos a partir de
observações com grandes levantamentos
espectroscópicos”**

por

Nayara Isabelle Feliciano Souza

Dissertação de mestrado **APROVADA** em sessão pública no dia dezessete de julho do ano dois mil e vinte e cinco perante a banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Documento assinado digitalmente
 **DIOGO MARTINS SOUTO**
Data: 23/07/2025 13:40:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Diogo Martins Souto
(DFI-UFS)



Prof. Dr. Hélio Dotto Perotoni
(ON-MCTI)

Documento assinado digitalmente
 **HELIO JAQUES ROCHA PINTO**
Data: 23/07/2025 11:58:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Helio Jaques Rocha Pinto
(OV-UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 **VERONICA LOAIZA TACURI**
Data: 17/07/2025 18:09:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Veronica Loaiza Tacuri
(PPGFI-UFS)

*Dedico este trabalho àquela que
segue vivendo um sonho até
torná-lo real.*

Agradecimentos

Início agradecendo à minha família, em especial à minha mãe, Chiara, que durante toda a minha vida me deu a base para que eu buscasse realizar os meus sonhos. Dar orgulho a ela sempre foi um dos maiores incentivos na minha trajetória acadêmica.

Quero agradecer também às melhores amigas que eu poderia ter, Letícia e Thawany, por estarem presentes desde sempre. Obrigada por manterem meus pés no chão quando minha cabeça estava nas estrelas.

Agradeço também à Prates e à Rafaella, por permanecerem e sempre estarem disponíveis para nossa amizade. Sou muito grata por comemorarem cada etapa vencida, mesmo sem terem a menor ideia do que eu estava fazendo. Estendo esse agradecimento também aos “agregados”, que são tão especiais quanto.

Meu “muito obrigada” a Gilson, por tudo. Por me ouvir, por se interessar, me apoiar e acreditar em mim. Pelos sacrifícios e pelos momentos felizes que me faziam perceber como tudo vale a pena.

Não posso deixar de agradecer também aos membros dos grupos SABER-SE e *Milky Way Brazilian Group*, além de todos os colegas que colaboraram comigo ao longo desse tempo. Obrigada pelas discussões, pela ajuda nas matérias e na pesquisa, e por cada contribuição que me deram quando precisei.

Agradeço aos meus orientadores, Diogo e Hélio, por me apresentarem e me permitirem trabalhar com um tema pelo qual me apaixonei imediatamente. A dificuldade intrínseca da pós-graduação foi diminuída por eu estar envolvida com algo que me motiva e me fascina.

Meus agradecimentos à CAPES pela bolsa que possibilitou o suporte financeiro necessário para permanecer no mestrado e evoluir profissionalmente.

Por fim, sei que a ciência não é feita individualmente, e que meus resultados se sustentam em vários resultados que vieram antes de mim. Por isso, minha profunda gratidão a todos que fizeram e fazem pesquisa, e aos que ainda farão. Que esse trabalho possa contribuir para alguém no desenvolvimento de sua ciência como minha maior forma de agradecimento.

*“Cedo pra parar
Tarde pra desistir.”*

(Gee Rocha)

Resumo

Os grandes levantamentos espectroscópicos, como APOGEE, GALAH, LAMOST, RAVE, SEGUE, entre outros, revolucionaram a forma como a astrofísica se desenvolveu nos últimos vinte anos. Em conjunto com os dados astrométricos da missão Gaia, incluindo as velocidades radiais obtidas pelo *Radial Velocity Spectrometer*, esses levantamentos vêm explorando diversas regiões da Via Láctea, como os discos fino e espesso, além do halo. A diversidade de comprimentos de onda utilizados e resoluções espectrais tem sido essencial para a composição do cenário e estado da arte da nossa Galáxia. Além dos dados oriundos desses levantamentos, a obtenção dos parâmetros orbitais dos objetos observados fornece um panorama cinemático indispensável para desvendar a história de formação e evolução da Via Láctea. Nesse contexto, este trabalho busca criar o maior catálogo de parâmetros orbitais já feito até hoje, utilizando os dados disponíveis mais recentes de oito diferentes levantamentos espectroscópicos, em conjunto com dados do Gaia e do código AGAMA para integração orbital. Este catálogo conterá parâmetros orbitais para mais de 47 milhões de fontes estelares, sendo mais de 40 milhões de objetos únicos, além de probabilidades de pertencimento a cada componente galáctica de acordo com a classificação cinemática. É esperado que diversas áreas da astrofísica se beneficiem com a disponibilização de um catálogo como esse, desde a astrofísica estelar e a arqueologia galáctica à ciência exoplanetária.

Palavras Chaves: Catálogos, *surveys*, Galáxia: cinemática e dinâmica

Abstract

Large-scale spectroscopic surveys, such as APOGEE, GALAH, LAMOST, RAVE, SEGUE, and others, have revolutionized the way astrophysics has developed over the past twenty years. Combined with astrometric data from the Gaia mission and its radial velocity measurements provided by the Radial Velocity Spectrometer, these surveys have been exploring a wide range of Galactic regions, like the thin and thick disks, and the halo. This multi-faceted approach is imperative for building a comprehensive picture and state-of-the-art of the Milky Way. Beyond the spectroscopic and astrometric data, the derivation of orbital parameters for observed stars offers a crucial kinematic framework for unraveling the Galaxy's formation and evolutionary history. In this context, the present work aims to construct the largest catalog of orbital parameters ever compiled to date, using the most up-to-date data from eight different spectroscopic surveys, combined with Gaia data and the AGAMA code for orbital modeling. The resulting catalog will include orbital parameters for more than 47 million stellar sources, among which more than 40 million are unique objects, along with probabilities of belonging to specific Galactic components based on kinematic classifications. We expect that this catalog will benefit a broad range of research areas, from stellar astrophysics and Galactic archaeology to exoplanetary science.

Keywords: Catalogs, Surveys, Galaxy: kinematics and dynamics.

1	Introdução	1
1.1	A Via Láctea	3
1.1.1	Componentes galácticas	5
1.2	Arqueologia galáctica	9
1.3	Parâmetros astrofísicos e orbitais	12
2	Levantamentos estelares	22
2.1	Gaia	22
2.2	APOGEE	24
2.3	DESI	25
2.4	Gaia-ESO	26
2.5	GALAH	27
2.6	LAMOST	28
2.7	RAVE	30
2.8	SEGUE	31
2.9	Distâncias	32
3	Metodologia	34
3.1	Cruzamento entre os dados	34
3.2	Normalização da velocidade radial	35
3.3	Código AGAMA	38
3.3.1	Número de realizações Monte Carlo	39
3.4	Modelo de Potencial e Sistema de Referência	41
3.5	Classificação cinemática das componentes galácticas	44
3.6	Criação das <i>flags</i>	45
3.7	Amostra final	46
4	Resultados e discussões	48
4.1	O catálogo	48

4.2	Parâmetros orbitais dos levantamentos espectroscópicos	50
4.3	Parâmetros orbitais do catálogo desenvolvido neste trabalho	56
5	Conclusões	62
5.1	Perspectivas futuras	64
	Referências	67
	Apêndice A Colunas presentes no catálogo	76
	Apêndice B Comparação com a literatura	78

Lista de Figuras

1.1	Mapa estelar de Herschel	4
1.2	Anatomia da Via Láctea	5
1.3	Evolução química da Galáxia	6
1.4	Diagrama Cor-Magnitude para estrelas do halo	9
1.5	Diagrama Momento-Energia	10
1.6	Diagrama [Fe/H] vs. [Mg/Fe]	11
1.7	Sistema de coordenadas celeste	12
1.8	Paralaxe de uma estrela	14
2.1	Telescópios da missão Gaia	23
2.2	Telescópios utilizados no SDSS	24
2.3	Espectrógrafo do DESI	25
2.4	Complexo de telescópios do VLT	27
2.5	Espectrógrafo HERMES	28
2.6	Telescópio LAMOST	29
2.7	Telescópio UKST	31
3.1	Desvio entre as velocidades radiais do Gaia e do LAMOST MRS	36
3.2	Desvio entre as velocidades radiais do Gaia e de cada levantamento espectroscópico	37
3.3	Distribuição da dispersão dos parâmetros orbitais para 30 mil estrelas do SEGUE.	40
3.4	Representação esquemática da seleção para a <i>flag Unique</i>	45
4.1	Distribuição espacial para as estrelas de cada levantamento espectroscópico	51
4.2	Diagrama de Toomre para os levantamentos espectroscópicos	52
4.3	Distribuição da excentricidade dos levantamentos espectroscópicos	53
4.4	Parâmetros orbitais de cada levantamento espectroscópico	55
4.5	Distribuição espacial para as estrelas do catálogo.	57
4.6	Parâmetros orbitais para as estrelas do catálogo	59
4.7	Distribuição de excentricidade para as estrelas do catálogo	59

4.8	Diagrama de Toomre para o catálogo em função das componentes galácticas . . .	61
B.1	Comparação entre os valores obtidos para V_r , V_ϕ e V_z	78
B.2	Comparação entre os valores obtidos para excentricidade, L_z e energia	79

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das principais informações dos levantamentos espectroscópicos empregados no trabalho.	33
3.1	Valores de velocidade elipsoidal para as componentes galácticas.	45
4.1	Prévia do catálogo desenvolvido neste trabalho.	49
4.2	Número de objetos presentes no catálogo final	49
A.1	Descrição do conteúdo do catálogo.	76

As últimas décadas do século XX e o início do século XXI podem ser interpretadas como um período de transição no modelo de desenvolvimento científico em astrofísica devido às transformações na astronomia observacional, impulsionadas pelo avanço tecnológico e pela crescente disponibilidade de grandes volumes de dados. Telescópios com maior abertura acoplados em instrumentos de maior resolução foram construídos (Baker, 1969; Code, 1973) como resultados de diversas tecnologias desenvolvidas nas últimas décadas, como o uso de dispositivos de carga acoplada (CCD, do inglês, *Charge-Coupled Device*; Janesick et al., 1987) e o uso de óptica adaptativa (Davies & Kasper, 2012). Em conjunto, satélites espaciais foram lançados em órbita e o poder computacional evoluiu consideravelmente com o desenvolvimento de novos *softwares* (por exemplo, Barstow, 1987) e ferramentas estatísticas (por exemplo, Sharma, 2017). Como consequência, estrelas cada vez mais tênues passaram a ser observadas, os levantamentos espectroscópicos adquiriram a capacidade de observar milhões de estrelas em diferentes comprimentos de onda ao longo do espectro eletromagnético, grandes volumes de dados passaram a ser armazenados e processados de maneira automatizada, e as medidas astrométricas tornaram-se cada vez mais precisas (Binney & Merrifield, 1998).

Nesse contexto, a astrofísica estelar entrou em uma era transformadora, a qual foi impulsionada por levantamentos espectroscópicos e astrométricos em grande escala que expandiram significativamente as capacidades observacionais. Projetos como o *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment* (APOGEE; Majewski et al., 2017), *Galactic Archaeology with HERMES* (GALAH; De Silva et al., 2015), *RAdial Velocity Experiment* (RAVE; Steinmetz et al., 2006), *Gaia-ESO Survey* (GES; Randich et al., 2013), *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration* (SEGUE; Yanny et al., 2009) e *Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope* (LAMOST; Cui et al., 2012), além do *Milky Way Mapper* (MWM; Kollmeier et al., 2017) – que promete expandir ainda mais a aquisição de dados no SDSS-V –, coletaram dados espectroscópicos de alta qualidade para milhões de estrelas em diferentes regiões da Via Láctea. Paralelamente, a missão Gaia (Gaia Collaboration et al., 2016, 2023) revolucionou a astrometria ao fornecer posições, paralaxes e movimentos próprios precisos para mais de um bilhão de estrelas. Em conjunto, esses levantamentos possibilitam estudos sem precedentes sobre a estrutura, formação e evolução da nossa Galáxia (Majewski, 1993; Bonaca & Price-Whelan, 2025). A combinação de parâmetros precisos da cinemática e química estelar abriu novos caminhos para a arqueologia galáctica (ver Seção 1.2), os estudos de populações es-

telares e a modelagem dinâmica em uma escala que, há poucas décadas atrás, era inimaginável. Com isso, a grande quantidade de dados produzida e o emprego desses de forma homogênea têm levado a um expressivo progresso da astronomia galáctica (Helmi, 2020; Deason & Belokurov, 2024).

Diante desse cenário, diversos estudos têm feito uso desses conjuntos de dados para obter parâmetros orbitais (como por exemplo, Koppelman et al., 2018; Lövdal et al., 2022; Ardern-Arentsen et al., 2024, para nomear apenas alguns) a fim de investigar as características cinemáticas e dinâmicas da Via Láctea e as diferentes regiões da Galáxia, como o bojo, disco, braços espirais, entre outras. No entanto, a maioria desses trabalhos faz uso dos dados de apenas um ou dois levantamentos espectroscópicos, e até o presente momento, não havia sido conduzido um esforço voltado à construção de um catálogo de parâmetros orbitais de maneira homogênea, abrangendo a grande maioria dos levantamentos espectroscópicos disponíveis.

É nesse contexto que este trabalho se insere, cujo principal objetivo é fornecer um catálogo de parâmetros orbitais que contempla oito levantamentos espectroscópicos distintos: APOGEE, *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI; DESI Collaboration et al., 2025), Gaia-ESO, GALAH, LAMOST *Low Resolution Survey* (LAMOST LRS; Zhao et al., 2012) e LAMOST *Medium Resolution Survey* (LAMOST MRS; Liu et al., 2020), RAVE, SEGUE e o *Gaia Radial Velocity Spectrometer* (Gaia RVS; Cropper et al., 2018). Além de buscar reunir o maior volume de dados possível, o uso de diversos levantamentos também permite explorar diferentes comprimentos de onda, resoluções espectrais e áreas de cobertura, o que possibilita acessar as populações estelares de diferentes componentes galácticas. Nesse sentido, por exemplo, o LAMOST LRS possui baixa resolução, mas é o segundo levantamento com maior número de objetos com determinação de velocidade radial. Já o SEGUE, apesar de possuir menor volume de dados em comparação com outros levantamentos, concentrou esforços na observação de objetos do halo galáctico. Assim, os levantamentos se somam e se complementam, permitindo que uma maior fração da Via Láctea seja acessada e populações estelares que compartilham as mesmas características dinâmicas (como as correntes estelares) possam ser ressaltadas ou identificadas, tornando este não apenas o maior, mas também um dos mais completos catálogos de parâmetros orbitais desenvolvido até o momento, quando comparado aos parâmetros orbitais obtidos através de um único levantamento espectroscópico (como por exemplo, o catálogo de distâncias, abundâncias e idades para estrelas do APOGEE¹, como mostrado no Apêndice B).

Além dos parâmetros orbitais, o nosso catálogo também fornecerá as probabilidades de pertencimento às componentes do disco fino, disco espesso e halo, calculadas a partir de critérios cinemáticos quantitativos. O catálogo ainda fornecerá, para cada objeto, a informação sobre qual levantamento o observou, bem como os identificadores originais desses levantamentos. Isso visa facilitar o cruzamento com os dados dos levantamentos originais, permitindo a

¹ https://data.sdss.org/sas/dr17/env/APOGEE_ASTRO_NN/

recuperação de informações adicionais que não foram disponibilizadas em nosso catálogo. O catálogo incluirá também o valor do sinal-ruído dos levantamentos espectroscópicos originais e algumas sinalizações (do inglês, *flags*) que indicarão o nível de confiabilidade dos parâmetros orbitais calculados. Para além do objetivo principal desta dissertação, que é a construção de um robusto catálogo de parâmetros orbitais, são também objetivos deste trabalho: a análise dos resultados obtidos individualmente para cada levantamento estelar a partir do catálogo completo; a criação de dois subcatálogos, um de objetos únicos, com a finalidade de evitar objetos repetidos, e outro constituído pelas fontes para as quais os parâmetros orbitais alcançam maior grau de confiabilidade; e a análise cinemática e dinâmica das componentes galácticas.

Espera-se que diversas áreas da astronomia galáctica sejam beneficiadas com a disponibilização de um catálogo como este. O produto final deste trabalho poderá ser amplamente utilizado em estudos de populações estelares (por exemplo, [Dodd et al., 2023](#); [Kim et al., 2025](#)), estrutura, formação e evolução da Via Láctea (por exemplo, [Carrillo et al., 2024](#); [Liu et al., 2024](#)), bem como em áreas mais particulares, como estudos de sistemas planetários em ambientes galácticos distintos ([Perotoni et al., 2021](#)). As próximas seções deste Capítulo têm como objetivo familiarizar o leitor com os conceitos astrofísicos e orbitais que serão utilizados ao longo desta dissertação, por meio de uma revisão da literatura.

1.1 A Via Láctea

A exploração da estrutura e da formação da Via Láctea teve como base inicial as contagens de estrelas ([Gilmore et al., 1989](#)). Um dos primeiros levantamentos estelares da Galáxia foi feito pelos irmãos William e Caroline Herschel em 1785. Nesse estudo, considerou-se que as estrelas tinham a mesma luminosidade e estavam uniformemente espalhadas por toda a Galáxia ([Herschel, 1785](#)). A análise levou à criação de um mapa com o possível formato da Via Láctea, como pode ser visto na Figura 1.1. Embora já tivessem sido produzidos catálogos contendo um grande número de objetos, como o Catálogo Messier ([Messier, 1781](#)) e *New General Catalogue* ([Dreyer, 1888](#)), a cobertura espacial e a profundidade desses levantamentos ainda eram restritas. A título de ilustração, até o início do século passado ainda se discutia se a Via Láctea era a única galáxia existente. Esse período foi marcado pelo Grande Debate entre Harlow Shapley e Heber Curtis ([Shapley & Curtis, 1921](#)) e pelas observações de Edwin Hubble de estrelas em NGC 6822 ([Hubble, 1925](#)), que contribuíram decisivamente para o reconhecimento das “nebulosas espirais” como outras galáxias além da Via Láctea.

No entanto, ainda havia muito o que ser estudado a respeito das estruturas internas da Galáxia. [Lindblad \(1927\)](#) foi quem primeiro propôs dividir a Via Láctea em diferentes subsistemas, em termos de seus movimentos e velocidades. [Baade \(1944\)](#) associou grupos cinemáticos às componentes estruturais da Galáxia, e [Roman \(1955\)](#) demonstrou que “deficiências metálicas” estavam relacionadas às altas velocidades, relacionando idade, cinemática e composição

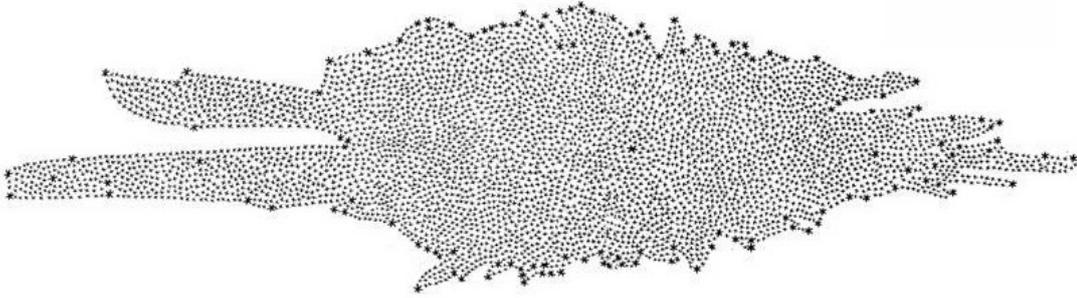


Figura 1.1: Mapa da Via Láctea derivado do trabalho de William e Caroline Herschel. Adaptado de [Herschel \(1785\)](#).

química, o que viria a ser conhecido como a relação idade-metalicidade ([Majewski, 1993](#)). A inclusão de dados cinemáticos e químicos tornou-se essencial para distinguir diferentes populações estelares e aprimorar os modelos de densidade estelar ([Gilmore et al., 1989](#)).

As primeiras bases teóricas da formação galáctica foram lançadas por [Eggen et al. \(1962\)](#), que analisaram os movimentos próprios, velocidades radiais e excesso ultravioleta de estrelas próximas ao Sol. O modelo, que ficou conhecido como modelo ELS, propunha a formação galáctica por meio de um colapso rápido da proto-Galáxia, seguido pela formação de um disco frio e enriquecido em metais, no qual a formação estelar segue até hoje ([Majewski, 1993](#); [Freeman & Bland-Hawthorn, 2002](#)). A rotação média das estrelas seria então um indicador direto do grau de colapso, considerando-se a conservação do momento angular ([Gilmore et al., 1989](#)). Nos anos seguintes, surgiram evidências contrárias ao modelo ELS. [Searle & Zinn \(1978\)](#) propuseram que o halo galáctico se formou por meio da fusão de pequenos fragmentos independentes, em vez de um colapso único. Essa ideia apontava para um cenário mais complexo e hierárquico, aproximando-se do conceito de formação galáctica por acreção que se acredita atualmente ([Deason & Belokurov, 2024](#)).

Com os avanços tecnológicos, principalmente a partir da década de 1980, passaram a ser produzidas grandes bibliotecas de espectros estelares, permitindo identificar sistemas binários e reconstruir órbitas detalhadamente ([Majewski, 1993](#)). Os modelos dinâmicos tornaram-se preferíveis aos cinemáticos, pois por serem mais robustos, permitem inferir o potencial gravitacional da Galáxia a partir da distribuição e dos movimentos das estrelas ([Trick et al., 2016](#)). Esta transição das modelagens cinemáticas (que ajustam movimentos locais sem coerência global) para as modelagens dinâmicas (que integram tais movimentos ao potencial gravitacional) é central para a evolução da modelagem galáctica, conectando densidade estelar, cinemática e potencial gravitacional ([Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016](#)). Desse modo, hoje sabemos que a Via Láctea se trata de uma galáxia espiral típica, como pode ser visto na [Figura 1.2](#), formada por diferentes componentes com características próprias. Na próxima sessão serão apresentadas em detalhes as componentes que formam a Galáxia.

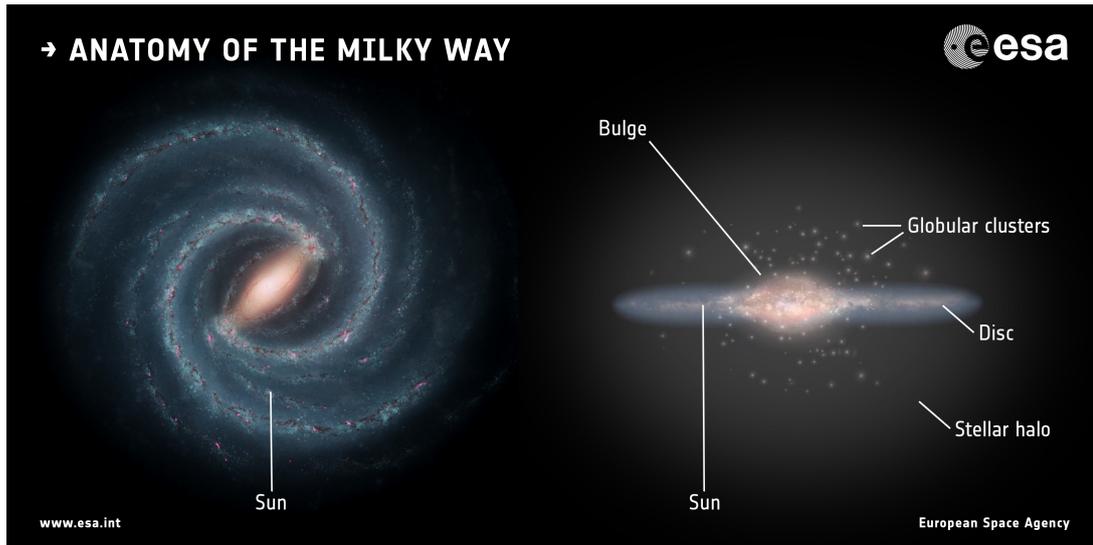


Figura 1.2: Anatomia da Via Láctea, considerando as visões *face-on* (à esquerda) e *edge-on* (à direita). Na imagem é possível ver a posição do Sol, deslocada em relação ao centro galáctico. Também são destacados o bojo, disco, halo estelar e aglomerados globulares. Créditos: NASA/JPL-Caltech; ESA; layout: ESA/ATG medialab.

1.1.1 Componentes galácticas

A Via Láctea é uma galáxia espiral barrada, com uma barra triaxial e um núcleo galáctico (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). Embora possa ser difícil separar as componentes da Via Láctea, algumas componentes luminosas são comumente referidas em estudos galácticos. Estas são: o disco, subdividido em disco fino e disco espesso, o halo estelar e o bojo. A Galáxia conta ainda com uma barra, aglomerados globulares, um halo de matéria escura e diversas correntes estelares (Mateu, 2023), que, embora não sejam o foco deste trabalho, representam a complexidade que esse tipo de estrutura abriga.

A Figura 1.2 mostra as visões de cima (do inglês, *face-on*) e uma visão de lado (do inglês, *edge-on*) da Via Láctea e de suas componentes. Cada uma delas apresenta características espaciais, cinemáticas, dinâmicas e químicas próprias, refletindo seus respectivos processos de formação e evolução, e que, na figura, também podem ser percebidas por meio da diferença de cores (azul para populações mais recentes, vermelho para populações mais antigas).

À medida que o Universo e a própria Via Láctea evoluíram, elementos químicos mais pesados foram sendo formados no interior das estrelas, por meio da nucleossíntese estelar. O enriquecimento químico da Via Láctea é representado na Figura 1.3, onde vemos que diferentes processos de enriquecimento do meio ocorreram em épocas distintas da história de formação da Galáxia. O diagrama de metalicidade da Figura 1.3(a), conhecido como Diagrama de Tinsley-Wallerstein (Wallerstein, 1962; Tinsley, 1979), representa a relação $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$, que marca a taxa de formação estelar da Galáxia, mostrando a diferença de tempo entre a produção de elementos α (O, Mg, Ca, Si, Ti) por supernovas do tipo II e de elementos do pico do ferro (Mn, Fe, Co, Ni) por supernovas do tipo Ia (Tinsley, 1979; Matteucci & Greggio, 1986).

Como pode ser observado na Figura 1.3(b), ao passo que os elementos α foram produzidos em explosões de supernovas do tipo II, o ferro, além de ter sido produzido nas supernovas do tipo II, também foi produzido em maiores quantidades nas supernovas do tipo Ia, que são explosões de estrelas anãs brancas menos massivas e mais compactas, ou seja, àquelas que atingiram o limite de Chandrasekhar, em torno de $1,38 M_{\odot}$ (Chandrasekhar, 1931; Mazzali et al., 2007). A mudança no mecanismo predominante de produção de ferro pode fornecer um diagnóstico da razão entre as taxas de dissipação e formação estelar na Galáxia, sugerindo que uma população estelar se formou rapidamente, seguida pela formação mais lenta dos componentes posteriores da Galáxia (Gilmore et al., 1989). Por este motivo, diferentes regiões da Via Láctea terão diferentes características químicas.

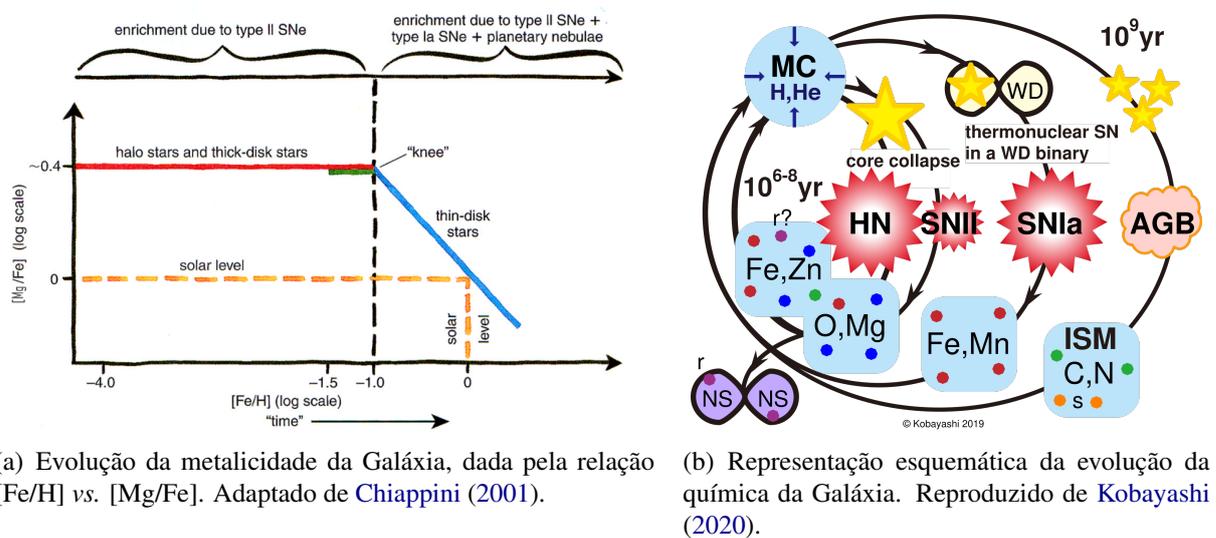


Figura 1.3: Evolução química da Galáxia, a partir de diferentes processos de enriquecimento do meio, causado principalmente pela explosão de supernovas tipo Ia e tipo II.

O bojo galáctico é a região central e também a mais concentrada e escurecida devido à presença de poeira interestelar e, por esse motivo, é também uma região pouco explorada (Helmi, 2020). O que se sabe até o momento é que se trata de uma região relativamente pequena, reunindo menos de 8% da massa presente no disco (Shen et al., 2010), com um formato de “caixa/amendoim” (McWilliam & Zoccali, 2010; Nataf et al., 2010; Wegg & Gerhard, 2013), típico de galáxias espirais entre os tipos Sb e Sc, com a presença de uma estrutura barrada. Embora essa barra esteja localizada na região do disco galáctico, e se argumente que ela tenha se formado a partir de um processo de instabilidade do disco, esse não é um processo necessariamente correlacionado, sendo possível observar galáxias luminosas com disco e barra, bem como galáxias esmaecidas com disco, mas sem barra (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002).

Quanto às populações estelares, o bojo abriga estrelas do tipo *RR Lyrae*, indicando a presença de estrelas antigas na região, o que sugere que o bojo tenha se formado de maneira rápida, nos primórdios da Via Láctea, conforme argumentado por Rich (2001). A formação do bojo provavelmente ocorreu a partir de instabilidades no disco interno, com rápido enriqueci-

mento químico e escala de tempo dinâmico menor quando comparada com a escala de tempo dinâmico do disco (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002). Além disso, o bojo é dominado por estrelas enriquecidas em elementos α (Queiroz et al., 2021), o que evidencia sua população antiga.

Uma outra componente galáctica clássica é a do disco, sendo considerada, na verdade, como duas componentes distintas: o disco fino e o disco espesso (Binney & Merrifield, 1998). Essas subdivisões foram anunciadas e tiveram o início de seu entendimento na década de 1980, possuindo características espaciais, cinemáticas e químicas distintas uma da outra (Gilmore & Reid, 1983; Bahcall & Soneira, 1984; Sandage & Fouts, 1987; Sandage, 1987).

O disco fino é uma região da Galáxia com a presença de estrelas mais jovens quando comparada com à região do disco espesso, além de manter uma formação estelar contínua até os dias de hoje, com taxa estimada em cerca de $1,6 M_{\odot}$ por ano (Licquia & Newman, 2015). A formação do disco fino parece ter ocorrido de dentro para fora, com estrelas nascendo a diferentes distâncias do centro da Via Láctea e exibindo padrões químicos distintos (Queiroz et al., 2021).

A espessura do disco fino varia entre 220 e 450 pc² (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016), e suas estrelas apresentam órbitas com trajetórias quase circulares (Edvardsson et al., 1993; Reddy et al., 2003), majoritariamente confinadas ao plano galáctico, com valores baixos de momento angular vertical, o que indica uma forte ligação com o plano da Galáxia (Trick et al., 2019). Após grandes eventos de fusão, como o ocorrido com uma galáxia anã há 11 Gyr, foi proposto que o disco fino tenha sido formado em uma fase relativamente calma da evolução galáctica (Helmi et al., 2018; Grand et al., 2020). No entanto, estudos recentes sugerem que o disco fino pode ter passado por um período de coformação com o disco espesso, abrigando uma população estelar mais antiga do que se supunha anteriormente (veja Borbolato et al., 2025).

O disco espesso é definido por Gilmore et al. (1989) como uma estrutura química e cinematicamente distinta do disco fino, apresentando estrelas mais pobres em metais e idades comparáveis às de aglomerados globulares. Ele apresenta uma distribuição espacial com escala de altura em torno de 1,3 kpc e uma densidade local rarefeita, estimada em cerca de 2% da do disco fino (Gilmore & Reid, 1983). Além disso, há indícios de que o disco espesso se formou antes do fino, provavelmente a partir do aquecimento do disco primordial causado por processos complexos envolvendo fusões e acreções (Majewski, 1993), e a migração radial pode ter contribuído para uma transição química mais contínua entre os dois discos (Bensby et al., 2014). Essa componente apresenta dispersão vertical de velocidade que cresce com a idade, resultado do aquecimento dinâmico progressivo (Quinn & Goodman, 1986; Walker et al., 1996). Majewski (1993) (que chama essa população de “População Intermediária II”) destaca sua altura característica maior em comparação com o disco fino (~ 1 kpc) e um gradiente vertical relati-

² 1 pc \sim 3.26 anos-luz ou 3.09×10^{16} m.

vamente constante até cerca de 7 kpc do plano galáctico. Além disso, o disco espesso possui dispersões de velocidade médias em torno de 50 km s^{-1} , tanto na direção radial quanto vertical, maiores que as do disco fino (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016).

O disco espesso é composto por estrelas mais velhas e pobres em metais, com metalicidade entre $-2,2 \text{ dex}$ e $-0,5 \text{ dex}$ (Chiba & Beers, 2000), apesar de atingir metalicidades até $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0,2 \text{ dex}$, mais do que se imaginava anteriormente (Bensby et al., 2014). O disco espesso é identificado com alta abundância de elementos α para $[\text{Fe}/\text{H}] < -0,5 \text{ dex}$, e a presença dessas estrelas enriquecidas em elementos α indica uma formação rápida e turbulenta.

O halo estelar da Via Láctea é uma estrutura difusa e de grande extensão, representando cerca de 1% da massa estelar total da Galáxia (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002; Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). Ele se estende por mais de 100 kpc e é considerado um dos melhores traçadores do halo de matéria escura (Deason & Belokurov, 2024). Estudos baseados em estrelas *RR Lyrae* indicam uma distribuição geral esferoidal, embora evidências observacionais sugiram achatamento variável com o raio (Gilmore et al., 1989).

O halo contém estrelas muito antigas, com idades superiores a 12 Gyr (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002), e extremamente pobres em metais (Helmi, 2020). Sua estrutura é suportada pela dispersão de velocidades, com momento angular próximo a zero (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002). A cinemática local do halo é caracterizada por rotação estelar média de $V_\phi \sim 40 \text{ km s}^{-1}$ (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). Dados cinemáticos mostram que a maioria das estrelas do halo interno possui órbitas retrógradas³, coerentes com o processo de acreção (Queiroz et al., 2021; Deason & Belokurov, 2024). O halo, assim como o disco, é frequentemente dividido em duas componentes principais: o halo *in situ*, formado na Via Láctea progenitora, e o halo acretado, formado por subestruturas que se fundiram à proto-Galáxia (Deason & Belokurov, 2024). Essa distinção é reforçada por diferenças nas órbitas e nos diagramas cor-magnitude das estrelas, evidenciando as múltiplas origens do halo (Gaia Collaboration et al., 2018; Helmi, 2020), como pode ser visto pela Figura 1.4, em que o eixo x indica a diferença de magnitude entre os fotômetros azul e vermelho e o eixo y indica a magnitude na banda G, obtidos a partir da missão Gaia. As estrelas foram selecionadas a partir do critério de velocidade total acima de 200 km s^{-1} , o que indica pertencimento cinemático ao halo, e é possível perceber a presença de duas populações estelares distintas.

O halo *in situ* se estende entre 20 e 50 kpc e aparenta ter sido formado precocemente, junto com o bojo e o disco espesso, a partir de um grande evento de fusão há 11 Gyr. As estrelas dessa componente apresentam órbitas retrógradas e altamente excêntricas (Deason & Belokurov, 2024) e são relativamente mais metálicas do que a região acretada ($[\text{Fe}/\text{H}] > -2 \text{ dex}$), tendo uma química distinta em $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$, sendo ricas em elementos α (Helmi, 2020).

³ Órbitas retrógradas são aquelas em que a estrela gira ao redor do centro galáctico em sentido oposto ao da rotação do disco.

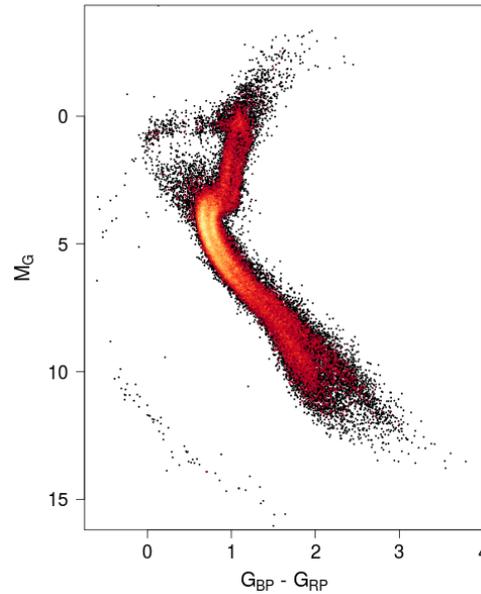


Figura 1.4: Diagrama Cor-Magnitude para estrelas consideradas pertencentes ao halo a partir do critério cinemático de velocidade total $> 200 \text{ km s}^{-1}$. As magnitudes são oriundas da missão Gaia. É possível notar a presença de duas sequências estelares distintas. Reproduzido de [Gaia Collaboration et al. \(2018\)](#).

O halo acretado chega a ter mais de 100 kpc de raio e é formado principalmente por estruturas acretadas posteriormente, apresentando uma estrutura mais complexa e fragmentada ([Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016](#); [Helmi, 2020](#)), tendo como característica ser pobre em elementos α ([Deason & Belokurov, 2024](#)). Outras subestruturas, como correntes estelares, são fósseis de eventos de acreção ao longo da história evolutiva da Via Láctea ([Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016](#)).

1.2 Arqueologia galáctica

A Via Láctea foi formada a partir de processos de acreção de galáxias anãs ([Helmi, 2020](#)) e diversas subestruturas resultantes desses eventos estão presentes principalmente no halo galáctico ([Horta et al., 2023](#)). O entendimento desse processo tem sido possível graças ao campo conhecido como arqueologia galáctica ([Freeman & Bland-Hawthorn, 2002](#)), que utiliza características químico-dinâmicas das estrelas para identificar diferentes populações estelares e reconstruir a história de formação da Galáxia. Isso é possível pois estrelas formadas em um mesmo ambiente tendem a preservar assinaturas químicas semelhantes e conservar, ao menos parcialmente, suas propriedades orbitais ao longo do tempo ([Freeman & Bland-Hawthorn, 2002](#)).

O estudo da arqueologia galáctica tem como objetivo reconstruir a história da Via Láctea com base nas propriedades orbitais, químicas e nas idades das estrelas, especialmente daquelas de baixa massa e longo ciclo de vida, pois essas estrelas agem como “fósseis estelares”, ao preservar a composição do meio interestelar (ISM, do inglês, *interstellar medium*) do momento de

sua formação (Gilmore et al., 1989; Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016; Helmi, 2020). Através das características químico-dinâmicas das diferentes populações estelares, é possível reconstruir esses processos de acreção.

Atualmente, entende-se que o halo interno é resultado de pelo menos três grandes eventos de acreção: Heracles (Horta et al., 2021), Gaia-Enceladus/Sausage (GSE; Helmi et al., 2018; Belokurov et al., 2018; Haywood et al., 2018; Mackereth et al., 2019) e Sagittarius (Ibata et al., 1994), além de contribuições menores, como Thamnos (Koppelman et al., 2019), Correntes de Helmi (Helmi et al., 1999), Sequoia (Myeong et al., 2019; Matsuno et al., 2019; Barbá et al., 2019), entre outras (Horta et al., 2023). A análise das propriedades químico-dinâmicas estelares permite identificar essas subestruturas (Majewski, 1993; Helmi, 2020, Horta et al., 2023, e a presença dessas estruturas e sobredensidades no halo indica que eventos antigos ainda deixam marcas no espaço de fases e ações⁴ (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016; Deason & Belokurov, 2024). Isso reforça o cenário hierárquico previsto pelo modelo Λ CDM, onde a Galáxia se forma por meio da incorporação de pequenos sistemas (Helmi, 2020; Deason & Belokurov, 2024), sendo possível identificar populações estelares com órbitas semelhantes, mesmo quando dispersas espacialmente, agrupando estrelas pertencentes às mesmas estruturas.

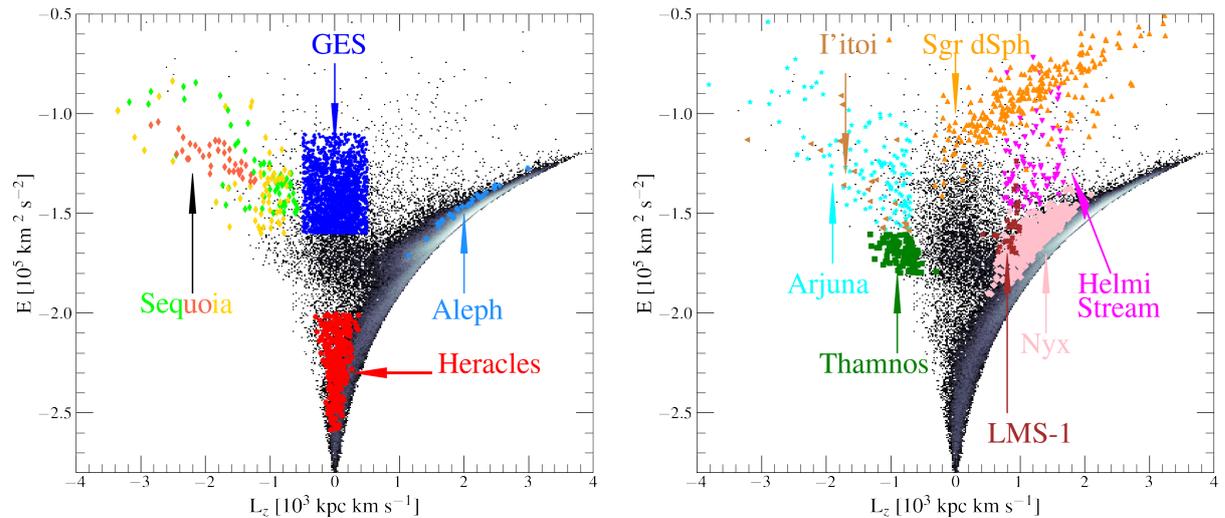


Figura 1.5: Diagrama Momento-Energia representando diferentes populações estelares ligadas a possíveis eventos de acreção da Via Láctea. O eixo x representa o momento angular vertical, L_z e o eixo y representa a energia orbital total da estrela. Reproduzido de Horta et al. (2023).

A Figura 1.5 ilustra como as diferentes populações são percebidas ao se adotar o espaço momento-energia, em que o eixo x representa o momento angular vertical, L_z , e o eixo y, a energia orbital total da estrela. Com base nos critérios adotados por Horta et al. (2023), é possível identificar onze populações estelares presentes no halo galáctico: Gaia-Enceladus, Heracles, Sequoia, Aleph (painel à esquerda), Thamnos, Correntes de Helmi, Sagittarius, LMS-1,

⁴ O espaço de fases descreve o estado dinâmico de uma estrela por suas posições e velocidades tridimensionais (X, Y, Z, V_x, V_y, V_z). O espaço de ações é uma reformulação do espaço de fases em termos das ações (J_r, J_ϕ, J_z), que caracterizam o tipo de órbita e permanecem invariantes em função do tempo.

Arjuna, I'toi e Nyx (painel à direita). Nesse gráfico, valores positivos de L_z indicam órbitas prógradas, enquanto valores negativos de L_z indicam órbitas retrógradas (características de estrelas pertencentes ao halo). Por outro lado, menores valores de energia indicam que as estrelas estão ligadas ao potencial da Via Láctea, e valores mais altos e próximos de zero indicam que a estrela possui energia de escape, não estando fortemente vinculada ao potencial galáctico.

Como pode ser visto na Figura 1.6, a relação $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ é uma estratégia para separar populações *in situ* de populações acretadas, devido aos processos de enriquecimento do meio ocasionados por explosões de supernovas. O magnésio, nesse contexto, é o traçador α mais confiável em dados do APOGEE (Horta et al., 2023), pois possui linhas espectrais bem definidas de Mg I. No disco galáctico, observa-se uma bimodalidade em $[\alpha/\text{Fe}]$, com uma população antiga enriquecida em elementos α e outra mais jovem, menos enriquecida, sobrepostas em metalicidade, mas com diferentes características orbitais (Bensby et al., 2014).

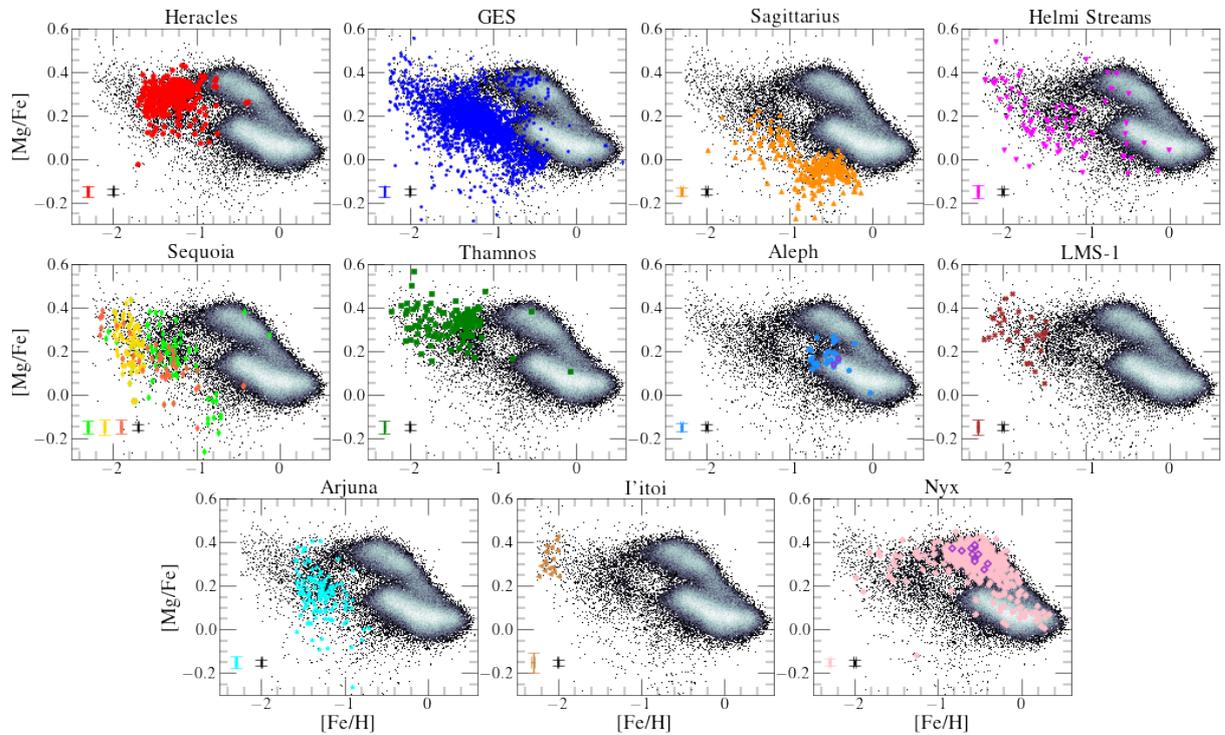


Figura 1.6: Diagrama $[\text{Fe}/\text{H}]$ vs. $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ representando diferentes populações estelares ligadas a possíveis eventos de acreção da Via Láctea. O eixo x representa a metalicidade, $[\text{Fe}/\text{H}]$ da estrela, enquanto o eixo y representa a abundância de magnésio em relação ao ferro. A região clara do gráfico indica os discos, onde é possível observar a bimodalidade, e as regiões dispersas em $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ dex indicam a região do halo. Reproduzido de Horta et al. (2023).

Consolidando-se como um divisor de águas para a arqueologia galáctica, a missão Gaia permitiu revelar subestruturas e caracterizar populações estelares com grande precisão (Deason & Belokurov, 2024). Levantamentos complementares, como o *Survey of Surveys* (Tsantaki et al., 2022), possibilitam o estudo da cinemática tridimensional de aglomerados abertos, suas órbitas e relações com a estrutura espiral do disco.

Atualmente, a arqueologia galáctica integra dados astrométricos, espectroscópicos e fotométricos com métodos de análise estatística e computacional. O objetivo é estabelecer conexões entre cinemática, química e idade das populações estelares, utilizando também modelos cosmológicos para testar hipóteses sobre a formação hierárquica da Via Láctea e os efeitos de processos internos e externos de sua evolução (Majewski, 1993).

1.3 Parâmetros astrofísicos e orbitais

Algumas grandezas dinâmicas e orbitais serão essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Por esse motivo, esta Seção se dedica a introduzir tais conceitos, entre eles os que serão a base para o cálculo dos parâmetros orbitais.

A posição de um objeto no céu depende do sistema de coordenadas adotado, definido a partir de dois ângulos de posição, um eixo da esfera celeste e um plano perpendicular a esse eixo (Binney & Merrifield, 1998). No sistema equatorial celeste, as coordenadas não dependem do local ou momento da observação, sendo considerado, portanto, um sistema de coordenadas fixo. Pode-se determinar a posição a partir da ascensão reta e da declinação, além dos valores de movimento próprio em ascensão reta e em declinação, e suas incertezas associadas. A ascensão reta α (RA, do inglês, *right ascension*) refere-se ao arco medido no plano do equador celeste, a partir do ponto do equinócio vernal (o ponto em que o Sol se encontra no equinócio de inverno), variando de 0° a 360° (ou ainda, de 0h a 24h). Já a declinação δ (DEC) é o arco medido com relação ao círculo horário da estrela (o círculo que passa pelos polos), originando-se no equador celeste até o objeto, e seu valor varia de -90° a $+90^\circ$, sendo os valores negativos em direção ao hemisfério sul e os positivos em direção ao hemisfério norte.

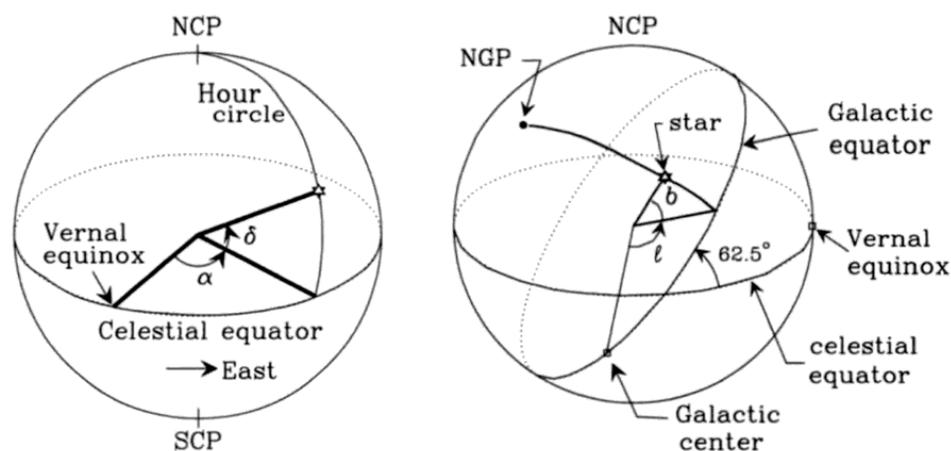


Figura 1.7: Sistema de coordenadas celeste. Sistema equatorial celeste de coordenadas, com as coordenadas de ascensão reta (α) e declinação (δ) (à esquerda) e sistema galáctico de coordenadas, com as coordenadas longitude galáctica (l) e latitude galáctica (b) (à direita). Reproduzido de Binney & Merrifield (1998).

Do mesmo modo que a ascensão reta e a declinação são ângulos definidos com relação ao eixo e plano adotados no sistema equatorial (ou seja, relativos ao equador celeste), o sistema

galáctico de coordenadas conta com a latitude galáctica, b , que é o ângulo da estrela descrito pelo círculo que passa pelos polos galácticos, perpendicular ao equador galáctico, e varia de -90° a $+90^\circ$, e a longitude galáctica, l , que é a distância angular medida ao longo do plano galáctico, com relação ao centro da Via Láctea (Binney & Merrifield, 1998), que varia de 0° a 360° . Por se tratarem de sistemas de referência distintos, conforme pode ser melhor visualizado através da Figura 1.7, é importante transformar os valores obtidos no sistema equatorial celeste para os valores do sistema galáctico de coordenadas, que é mais adequado quando se deseja conhecer as características da estrela em relação ao centro da Galáxia, e cujo plano possui uma inclinação de $62,5^\circ$ com relação ao equador celeste. Na Figura 1.7, NCP e SCP representam os polos equatoriais norte e sul, respectivamente, enquanto o termo NGP indica o polo norte galáctico.

As coordenadas do centro galáctico, dada por $l = 0^\circ$ e $b = 0^\circ$ no sistema galáctico, corresponde a $\alpha = 266,405^\circ$ e $\delta = -28,936^\circ$ no sistema equatorial celeste. Esses valores podem ser determinados através das relações abaixo:

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \sin \delta_{\text{GP}} \sin b + \cos \delta_{\text{GP}} \cos b \cos (l_{\text{CP}} - l) \\ \cos \delta \sin (\alpha - \alpha_{\text{GP}}) &= \cos b \sin (l_{\text{CP}} - l) \\ \cos \delta \cos (\alpha - \alpha_{\text{GP}}) &= \cos \delta_{\text{GP}} \sin b - \sin \delta_{\text{GP}} \cos b \cos (l_{\text{CP}} - l),\end{aligned}\tag{1.1}$$

para fazer a transformação do sistema equatorial celeste de coordenadas para o sistema galáctico de coordenadas, em que GP é relativo ao sistema galáctico e CP é relativo ao sistema equatorial. E, do mesmo modo, transformamos

$$\begin{aligned}\sin b &= \sin \delta_{\text{GP}} \sin \delta + \cos \delta_{\text{GP}} \cos \delta \cos (\alpha - \alpha_{\text{GP}}) \\ \cos b \sin (l_{\text{CP}} - l) &= \cos \delta \sin (\alpha - \alpha_{\text{GP}}) \\ \cos b \cos (l_{\text{CP}} - l) &= \cos \delta_{\text{GP}} \sin \delta - \sin \delta_{\text{GP}} \cos \delta \cos (\alpha - \alpha_{\text{GP}}),\end{aligned}\tag{1.2}$$

para fazer a transformação do sistema galáctico de coordenadas para o sistema equatorial celeste de coordenadas, em que $l_{\text{CP}} = 123,932^\circ$ é o valor da longitude no polo norte equatorial, $\alpha_{\text{GP}} = 192,259^\circ$ e $\delta_{\text{GP}} = 27,128^\circ$ são, respectivamente, os valores de ascensão reta e declinação no polo norte galáctico.

Apesar de serem praticamente constantes por demandarem um longo período de tempo até que se observe alguma mudança, os valores de RA e DEC podem, sim, sofrer alteração em relação à linha de visada, causada pelo movimento natural de todos os corpos celestes. Esse movimento é conhecido como movimento próprio (pm – do inglês, *proper motion*), que ocorre perpendicular à linha de visada. Pode-se estimar a variação do movimento tanto na direção da ascensão reta quanto na direção da declinação, sendo essa variação expressa, geralmente, em termos de segundos de arco por ano ($''/\text{ano}$).

Além do movimento perpendicular, as estrelas também apresentam movimentos de afastamento ou aproximação em relação ao observador, e a velocidade associada a esse movimento é conhecida como velocidade radial (RV, do inglês, *radial velocity*). Devido a esse movimento, as frequências observadas dos fótons serão diferentes das frequências emitidas pelos objetos astrofísicos (Binney & Merrifield, 1998). Este fenômeno é conhecido e descrito pelo efeito Doppler. A velocidade do objeto é determinada por meio de instrumentos de espectroscopia, através da medição do deslocamento do comprimento de onda ou da velocidade (assinatura do efeito Doppler) nas linhas espectrais (Binney & Merrifield, 1998). Ela pode ser expressa como:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c, \quad (1.3)$$

onde $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ é a variação no comprimento de onda, e c é a velocidade da luz. A velocidade radial é expressada em termos de km s^{-1} e, em conjunto com o movimento próprio, determina a velocidade espacial da estrela em relação ao Sol.

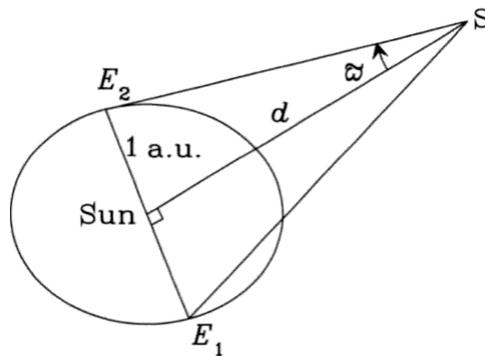


Figura 1.8: Paralaxe ϖ de uma estrela S vista da Terra. E_1 é a posição da Terra em sua órbita ao redor do Sol em um determinado momento do ano, e E_2 é a posição da Terra seis meses depois. Fora de escala. Reproduzido de Binney & Merrifield (1998).

Conforme a Terra se movimenta em relação ao Sol durante o ano, as estrelas podem parecer mudar de posição no céu para um determinado observador. A medida do ângulo dessa mudança considerando a distância da Terra ao Sol (dada em termos de unidade astronômica, UA⁵) recebe o nome de paralaxe (ϖ), e é usualmente expressada em termos de segundos de arco ($''$). Sendo r o raio da órbita terrestre e d a distância do Sol até a estrela observada, podemos considerar que $d \gg r$, de modo que o valor da paralaxe será extremamente pequeno, conforme representação artística apresentada na Figura 1.8). Com isso, conhecendo o valor da paralaxe, podemos obter a seguinte relação para a distância do objeto:

$$\frac{r}{d} = \tan \varpi \approx \varpi \text{ rad.} \quad (1.4)$$

Convertendo para arcosssegundos, $\varpi'' = 206.265 \varpi \text{ rad}$, e então considerando o raio da órbita

⁵ 1 UA \approx 149.600 km

terrestre como uma unidade astronômica (UA), então:

$$d = \frac{206.265}{\varpi''} \text{UA.}$$

Sabendo que o parsec é definido como a distância de uma estrela de paralaxe igual a $1''$, temos que a distância de uma estrela em parsecs é:

$$d = \frac{1}{\varpi''} \text{pc.} \quad (1.5)$$

Quanto menor o valor da paralaxe, maior é o valor da distância até o objeto. Entretanto, quanto maior a distância da estrela, mais imprecisa se torna essa aproximação (Green, 1985), e por esse motivo a mesma não foi adotada para determinação da distância neste trabalho (para detalhes a respeito da distância adotada, consulte a Seção 2.9).

A posição da estrela com relação ao centro da Galáxia, dada por (X, Y, Z) , pode ser obtida por meio da transformação das coordenadas adotadas, em conjunto com a distância d do objeto ao Sol. A posição cartesiana de uma estrela em relação ao Sol é determinada por meio da transformação para coordenadas esféricas (Bovy, in press 2026):

$$\begin{aligned} x &= d \cos b \cos l \\ y &= d \cos b \sin l \\ \text{galactoz} &= d \sin b. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Para converter essas coordenadas para o sistema galactocêntrico, presume-se que o Sol esteja a uma distância R_{\odot} do centro galáctico e a uma altura z_{\odot} acima do plano. Com isso,

$$\begin{aligned} X &= R_{\odot} - x = R_{\odot} - d \cos b \cos l \\ Y &= y = d \cos b \sin l \\ Z &= z + z_{\odot} = d \sin b + z_{\odot}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

R_{max} é a distância da estrela até o centro galáctico, dada pela expressão

$$R_{\text{max}} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (1.8)$$

enquanto z_{max} se refere à distância dessa estrela até o plano, ou seja, à “altura” em que essa estrela se encontra em relação ao plano (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016), e pode ser expressa como:

$$z_{\text{max}} = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (1.9)$$

Os valores solares adotados atualmente são $R_{\odot} = 8,2$ kpc e $z_{\odot} = 0$ kpc.

De forma contraintuitiva, (X, Y, Z) é um sistema de coordenadas de “mão esquerda”: como $l = 0$ corresponde ao centro galáctico, X é positivo na direção do centro galáctico e negativo no sentido oposto, Y é positivo na direção da rotação galáctica (que é perpendicular à linha Sol–centro da Galáxia) e Z é positivo em direção ao polo norte galáctico (NGP) (Juric et al., 2008). Aproximando o formato da Via Láctea ao de um disco, podemos usar coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) para descrever a posição de uma estrela. Assim,

$$\begin{aligned} X &= r \cos \phi, \\ Y &= r \sin \phi, \\ Z &= z, \end{aligned} \quad (1.10)$$

onde r é a coordenada radial, ϕ é a coordenada azimutal e z é a coordenada vertical. Desse modo:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \\ z &= Z \end{aligned} \quad (1.11)$$

Sabendo que a velocidade é a variação temporal da posição, então as velocidades associadas a cada eixo do sistema cilíndrico são:

$$(V_r, V_{\phi}, V_z) = (\dot{r}, r\dot{\phi}, \dot{z}), \quad (1.12)$$

ou ainda,

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{XV_X + YV_Y}{r}, \\ V_{\phi} &= \frac{XV_Y - YV_X}{r}, \\ V_z &= V_Z. \end{aligned} \quad (1.13)$$

onde:

$$\begin{aligned} V_X &= V_r \cos \phi - V_{\phi} \sin \phi \\ V_Y &= V_r \sin \phi + V_{\phi} \cos \phi \\ V_Z &= V_z \end{aligned} \quad (1.14)$$

são as velocidades no sistema cartesiano XYZ.

Existem ainda duas posições importantes na trajetória de uma estrela: a posição relativa à menor distância orbital em relação ao centro da Galáxia, chamada de raio pericêntrico, R_{peri} , e a posição oposta, em que a estrela está o mais distante possível do centro galáctico, chamada de raio apocêntrico, R_{apo} . A partir desses dois valores, é possível determinar então a excentricidade e da órbita:

$$e = \frac{R_{\text{apo}} - R_{\text{peri}}}{R_{\text{apo}} + R_{\text{peri}}} \quad (1.15)$$

Para uma órbita circular, $R_{\text{apo}} = R_{\text{peri}}$, e, portanto, $e = 0$. O valor da excentricidade, ou seja, o quanto o raio da órbita da estrela se mantém constante durante o percurso total ao redor do centro galáctico, depende da energia orbital daquele objeto. Quanto mais próxima a excentricidade de 0, mais ligado gravitacionalmente o objeto está.

A energia orbital total da estrela será correspondente à soma das energias cinética e potencial. A energia cinética é dada por:

$$\vec{K} = \frac{1}{2}m\vec{V}^2 = \frac{1}{2}m(V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2), \quad (1.16)$$

em que m é a massa. A energia potencial pode ser expressa como

$$\vec{W} = m\vec{\Phi}, \quad (1.17)$$

em que Φ é o potencial gravitacional adotado para o sistema em que a estrela se encontra (neste caso, a Via Láctea), e \vec{r} é a posição da estrela. Considerando então a energia orbital total específica no potencial da Galáxia, em unidades de massa, temos:

$$\vec{E} = \vec{T} + \vec{\Phi} = \frac{1}{2}(V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2) + \Phi(X, Y, Z) \quad (1.18)$$

Se $E < 0$, então a estrela está ligada ao potencial da Via Láctea, e, se $E \geq 0$, a estrela está fracamente ligada ao potencial da Via Láctea ou não está ligada, indicando que ela orbita outro sistema (Binney & Tremaine, 2008).

O momento angular de um corpo em órbita é definido como

$$\vec{L} = \vec{R} \times \vec{P}, \quad (1.19)$$

e, adotando a notação vetorial,

$$\begin{aligned} \vec{R} &= X\hat{i} + Y\hat{j} + Z\hat{k} \\ \vec{P} &= P_X\hat{i} + P_Y\hat{j} + P_Z\hat{k}, \end{aligned} \quad (1.20)$$

sendo $\vec{P} = m\vec{V}$ ou, em unidades de massa, $\vec{p} = \vec{V}$. Assim, fazendo o produto vetorial,

$$\vec{L} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ X & Y & Z \\ V_X & V_Y & V_Z \end{vmatrix} \Rightarrow \vec{L} = L_X + L_Y + L_Z = (YV_Z - ZV_Y) + (ZV_X - XV_Z) + (XV_Y - YV_X). \quad (1.21)$$

Ou ainda,

$$\begin{aligned} L_X &= YV_Z - ZV_Y, \\ L_Y &= ZV_X - XV_Z, \\ L_Z &= XV_Y - YV_X. \end{aligned} \quad (1.22)$$

De modo que podemos definir o módulo do momento angular total (L_{tot}) como

$$L_{\text{tot}} = \sqrt{L_X^2 + L_Y^2 + L_Z^2}, \quad (1.23)$$

e, considerando a componente do momento angular no plano XY , podemos definir também o momento angular perpendicular ao eixo Z (L_{perp}) como sendo

$$L_{\text{perp}} = \sqrt{L_X^2 + L_Y^2}. \quad (1.24)$$

Podemos associar L_Z à inclinação i da órbita (Binney & Tremaine, 2008): quando $L_Z > 0$, $i = \frac{\pi}{2} - \phi$, onde ϕ é o ângulo de inclinação da órbita; quando $L_Z < 0$, $i = \frac{\pi}{2} + \phi$. Então, a inclinação é

$$i = \cos^{-1} \left(\frac{L_Z}{L} \right). \quad (1.25)$$

Por fim, análise do movimento orbital de estrelas em potenciais gravitacionais galácticos pode ser feita por meio da mecânica Hamiltoniana, que permite uma descrição precisa de sistemas conservativos. O Hamiltoniano (\mathcal{H}) de um sistema é comparável à energia total desse sistema, de modo que

$$\vec{\mathcal{H}} = \vec{T} + \vec{\Phi} = \frac{1}{2}(V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2) + \Phi(X, Y, Z), \quad (1.26)$$

ou, em coordenadas cilíndricas, tendo que $V_r = \dot{r}$, $V_\phi = r\dot{\phi}$, $V_z = \dot{z}$,

$$\vec{\mathcal{H}} = \vec{T} + \vec{\Phi} = \frac{1}{2}(V_r^2 + V_\phi^2 + V_z^2) + \Phi(r, \phi, z). \quad (1.27)$$

Para resolver o Hamiltoniano, é preciso resolver as equações de Hamilton e obter os

momentos conjugados (p_i):

$$p_i = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i}, \quad (1.28)$$

em que $\vec{\mathcal{L}} = \vec{T} + \vec{\Phi}$ e \dot{q} é a variação temporal da posição nas coordenadas adotadas, no caso (r, ϕ, z) . Então, os momentos conjugados em coordenadas cilíndricas são:

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{r}} = V_r, \\ p_\phi &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} = r^2 \dot{\phi} = rV_\phi = L_Z, \\ p_z &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{z}} = V_z. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Assim, o Hamiltoniano é:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \left(p_r^2 + \frac{p_\phi^2}{r^2} + p_z^2 \right) + \Phi(r, z). \quad (1.30)$$

Em sistemas hamiltonianos integráveis, é possível realizar uma mudança de coordenadas para um novo conjunto de variáveis canônicas de ação-ângulo (J_i, θ_i). As ações J_i estão associadas às amplitudes dos movimentos periódicos e são definidas como integrais de linha ao longo de trajetórias fechadas no espaço de fase (Trick et al., 2016):

$$\vec{J}_i \equiv \frac{1}{2\pi} \oint_{\text{orbit}} p_i dq_i, \quad i \in [r, \phi, z]. \quad (1.31)$$

As ações também possuem a vantagem de melhor definir as órbitas estelares em potenciais gravitacionais axissimétricos (Binney & Tremaine, 2008), especificamente as ações J_r , J_ϕ e J_z , tendo como vantagem o fato de que as ações são constantes de movimento e invariantes adiabáticos, ou seja, permanecem constantes para uma variação temporal lenta do potencial (Goldstein, 1980), como é o caso do potencial galáctico. Além disso, as ações possuem interpretações físicas claras: $J_\phi = L_Z$ está associado ao momento angular azimutal, J_r se relaciona com a excentricidade da órbita, e J_z é associado à amplitude da oscilação vertical em torno do plano galáctico.

Considerando ($z = 0$), ou seja, órbitas no plano galáctico com simetria axial (Binney & Tremaine, 2008), então a energia do sistema é:

$$E = \frac{1}{2} V_r^2 + \frac{1}{2} \frac{L_Z^2}{r^2} + \Phi(r). \quad (1.32)$$

Definindo o potencial efetivo Φ_{eff} como

$$\Phi_{\text{eff}}(r) = \Phi(r) + \frac{L_z^2}{2r^2}, \quad (1.33)$$

a energia se torna:

$$E = \frac{1}{2}V_r^2 + \Phi_{\text{eff}}(r). \quad (1.34)$$

Então:

$$V_r = \sqrt{2[E - \Phi_{\text{eff}}(r)]}. \quad (1.35)$$

Como o momento conjugado à coordenada radial r é $p_r = V_r$, a ação radial J_r é:

$$J_r = \frac{1}{2\pi} \oint p_r dr = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\text{peri}}}^{R_{\text{apo}}} \sqrt{2[E - \Phi_{\text{eff}}(r)]} dr, \quad (1.36)$$

O Hamiltoniano (equação 1.27) não depende explicitamente da coordenada azimutal ϕ , o que implica que essa coordenada é cíclica em um sistema com simetria axial e, assim, seu momento conjugado p_ϕ é conservado e corresponde ao momento angular em torno do eixo z , L_z :

$$p_\phi = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} = r^2 \dot{\phi} = L_z. \quad (1.37)$$

Como p_ϕ é constante, a ação azimutal se torna:

$$J_\phi = \frac{1}{2\pi} \oint p_\phi d\phi \Rightarrow J_\phi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} L_z d\phi = L_z. \quad (1.38)$$

Por fim, para oscilações fora do plano galáctico, a energia vertical é:

$$E_z = \frac{1}{2}V_z^2 + \Phi(r, z). \quad (1.39)$$

Tratando R como parâmetro fixo durante o movimento vertical e isolando v_z :

$$p_z = V_z = \sqrt{2[E_z - \Phi(r, z)]}. \quad (1.40)$$

Então, a ação vertical é:

$$J_z = \frac{1}{2\pi} \oint p_z dz = \frac{1}{\pi} \int_0^{z_{\max}} \sqrt{2[E_z - \Phi(r, z)]} dz. \quad (1.41)$$

Os parâmetros apresentados aqui descrevem completamente o comportamento de estrelas orbitando um potencial galáctico axissimétrico e estarão presentes no catálogo fruto deste trabalho. No Capítulo 2, serão apresentados os levantamentos espectroscópicos que fundamentam a construção do catálogo aqui proposto, enquanto o Capítulo 3 detalha a metodologia empregada e os testes realizados. O Capítulo 4 trará os resultados e discussões obtidos por esta pesquisa e, por fim, as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros serão discutidas no Capítulo 5.

Levantamentos estelares

Neste Capítulo, apresentaremos os levantamentos espectroscópicos utilizados na construção do catálogo de parâmetros orbitais. Os projetos descritos a seguir correspondem àqueles levantamentos de dados com maiores amostras de medidas de velocidade radial disponíveis na literatura, representando uma base sólida para análises orbitais em grandes volumes de dados. Esses levantamentos abrangem diferentes regiões da Via Láctea, incluindo os discos fino e espesso, o halo e o bojo galáctico, com coberturas que variam em termos de área do céu, profundidade, resolução e cobertura espectral.

Ao longo deste Capítulo, destacaremos os principais aspectos de cada levantamento, como seus objetivos científicos, número de estrelas observadas e qualidade dos dados. Cabe ressaltar que o objetivo é disponibilizar um catálogo abrangente de parâmetros orbitais para todos os objetos que possuem as grandezas necessárias ao cálculo das órbitas, como posições, velocidades radiais, paralaxes e movimentos próprios. Essa abordagem visa maximizar o potencial de utilização do catálogo por diferentes comunidades científicas, permitindo que cada pesquisador aplique seus próprios critérios de seleção de acordo com os objetivos específicos de suas análises. Por este motivo, neste trabalho, não foram aplicados critérios adicionais de limpeza ou filtragem à amostra.

2.1 Gaia

A missão Gaia (Perryman et al., 2001) se trata de um satélite espacial revolucionário, projetado para mapear as posições e movimentos tridimensionais de diversos objetos celestes, e em particular, estrelas em toda a Via Láctea e Grupo Local. Combinando astrometria, fotometria e espectroscopia, a missão Gaia busca respostas para questões astrofísicas fundamentais, desde a dinâmica do Sistema Solar até a escala de distância cósmica, sendo seu maior objetivo o de compreender a formação e evolução da Via Láctea (Gaia Collaboration et al., 2016). Com foco particular no estudo da estrutura, evolução e dinâmica da Galáxia, a missão fornece um censo estelar sem precedentes, transformando nossa compreensão a respeito da Via Láctea (Helmi, 2020; Vasiliev, 2023; Cantat-Gaudin & Casamiquela, 2024; Deason & Belokurov, 2024; Bonaca & Price-Whelan, 2025; Doliva-Dolinsky et al., 2025).

A versão atual dos dados do Gaia fornece astrometria e fotometria de banda larga para 1,8 bilhões de fontes e velocidade radial para aproximadamente 33 milhões de estrelas (Gaia

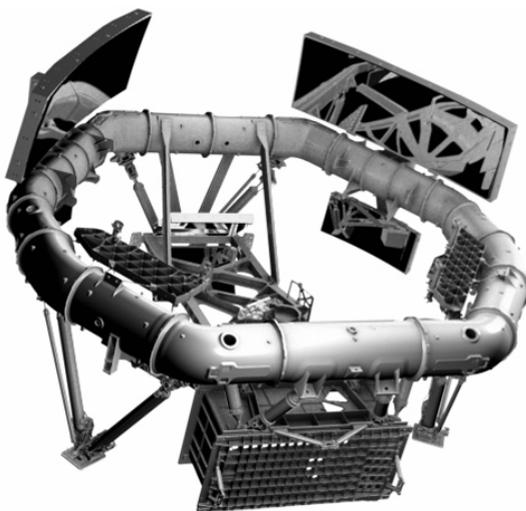


Figura 2.1: Representação esquemática dos dois telescópios da missão Gaia, separados por um ângulo básico $\Gamma = 106,5^\circ$. A luz coletada converge para um único plano focal. Reproduzido de [Gaia Collaboration et al. \(2016\)](#).

[Collaboration et al., 2021, 2023](#)). A alta acurácia astrométrica do Gaia se deve ao emprego de dois telescópios separados por um ângulo básico ($\Gamma = 106,5^\circ$), como pode ser visto na Figura 2.1, resultando em duas linhas de visada diferentes, possibilitando a medição das separações relativas das estrelas presentes nos dois campos de visão ([Gaia Collaboration et al., 2016](#)). O instrumento astrométrico mede posições, paralaxes e movimentos próprios na banda óptica larga G (330–1050 nm), alcançando precisão na escala de microarcsegundos para estrelas mais brilhantes que $G \sim 15$ mag e se estendendo até $G \sim 21$ mag para todas as fontes ([Lindgren et al., 2021a](#)). De maneira complementar, o Fotômetro Azul (BP) e o Fotômetro Vermelho (RP) fornecem espectrofotometria de baixa resolução nos intervalos de 330–680 nm e 640–1050 nm, respectivamente, permitindo que parâmetros atmosféricos estelares sejam estimados para mais de 200 milhões de objetos ([De Angeli et al., 2023](#); [Montegriffo et al., 2023](#)). O *Radial Velocity Spectrograph* (RVS; [Cropper et al., 2018](#)) obtém espectros de média resolução ($R \sim 11\,000$), centrados no tripleto de cálcio, Ca II, (847–874 nm), fornecendo atualmente, no DR3, velocidade radial para mais de 33 milhões de estrelas mais brilhantes que $G \sim 17$ mag ([Katz et al., 2023](#)), sendo previsto um total de 150 milhões até a conclusão do levantamento.

Neste trabalho, foram adotadas as posições e movimentos próprios do Gaia DR3 para homogeneizar o referencial astrométrico da amostra. O Gaia serve como referência astrométrica única, fornecendo uma base homogênea e precisa para a construção do catálogo de parâmetros orbitais ([De Angeli et al., 2023](#)). Uma vez que o Gaia fornece o maior catálogo de velocidades radiais até o momento, adotamos esses dados para colocar as medidas de velocidade radial dos diferentes levantamentos em uma escala consistente com a do Gaia (Seção 3.2). A amostra final deste trabalho, baseada no Gaia, compreende 33.581.727 objetos com posições, movimentos próprios e velocidades radiais completas.

2.2 APOGEE

O APOGEE é um levantamento espectroscópico de grande volume de dados realizado no infravermelho próximo e faz parte do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; York et al., 2000). Projetado para investigar a formação e evolução da Via Láctea, o APOGEE fornece informações químicas e cinemáticas detalhadas para estrelas em todas as componentes galácticas, incluindo o bojo, discos e halo (Zasowski et al., 2013). Seus dados têm sido fundamentais para o avanço da compreensão da evolução química da Galáxia, da migração estelar, e da história de formação da Via Láctea (Hayden et al., 2015; Queiroz et al., 2021; Horta et al., 2023).



(a) Telescópio Sloan Foundation, situado no hemisfério norte, utilizado nas operações do SDSS. Além do APOGEE, ele também foi empregado nas observações do SEGUE. Reproduzido de Gunn et al. (2006)



(b) Telescópio Irénée du Pont, situado no hemisfério sul. Passou a integrar as observações do SDSS a partir da fase IV. Créditos: <https://www.sdss4.org/instruments/>.

Figura 2.2: Telescópios utilizados no SDSS.

O APOGEE utiliza um espectrógrafo multiobjeto de alta resolução ($R \sim 22.500$), equipado com 300 fibras ópticas para observações simultâneas no infravermelho próximo, na banda H (1.51–1.70 μm) (Wilson et al., 2019). O levantamento opera em ambos os hemisférios: o APOGEE-N está localizado no *Apache Point Observatory*, no hemisfério norte, utilizando o Telescópio Sloan *Foundation* de 2,5 metros (Figura 2.2(a); Gunn et al., 2006), enquanto o APOGEE-S está situado no Observatório de *Las Campanas*, no hemisfério sul, utilizando o Telescópio Irénée du Pont de 2,5 metros (Figura 2.2(a); Bowen & Vaughan, 1973). A Figura 2.2 apresenta os dois telescópios usados a partir do SDSS-IV. Essa configuração permite uma cobertura quase total do céu e o acesso a todas as principais componentes da Galáxia. A alta resolução espectral do APOGEE permite medições cinemáticas precisas, alcançando uma precisão típica de velocidade radial de aproximadamente $0,07 \text{ km s}^{-1}$ para estrelas com razão sinal-ruído (SNR, do inglês, *signal-to-noise ratio*) maior que 20 (Majewski et al., 2017), além de fornecer abundâncias detalhadas para mais de 20 elementos, traçando diferentes caminhos nucleossintéticos (García Pérez et al., 2016).

Neste trabalho, foram utilizados os dados públicos mais recentes do APOGEE, prove-

nientes do Décimo Sétimo Lançamento de Dados (DR17; Abdurro'uf et al., 2022)¹, que é o lançamento final da quarta fase do SDSS (SDSS-IV; Blanton et al., 2017). Assim como nos lançamentos anteriores, o DR17 é cumulativo e inclui todas as observações do APOGEE obtidas desde 2011. Este lançamento inclui espectros e parâmetros derivados para 733.901 fontes estelares, fornecendo um dos conjuntos de dados espectroscópicos mais abrangentes para estudos da Via Láctea até o momento. A partir deste lançamento, foi selecionada uma amostra de 701.195 objetos que possuem velocidade radial para cruzamento com o Gaia.

2.3 DESI

O DESI é um levantamento espectroscópico projetado para investigar a estrutura em larga escala do Universo, com a obtenção de *redshifts* precisos de dezenas de milhões de galáxias e quasares, mas que também contribui de forma significativa para a astrofísica estelar por meio do programa *Milky Way Survey* (MWS; Cooper et al., 2023). O DESI dedica uma fração considerável do seu tempo de observação às estrelas do disco espesso e do halo estelar da Via Láctea, a fim de desvendar sua história de formação, eventos de acreção e a distribuição da matéria escura (Cooper et al., 2023; DESI Collaboration et al., 2024).

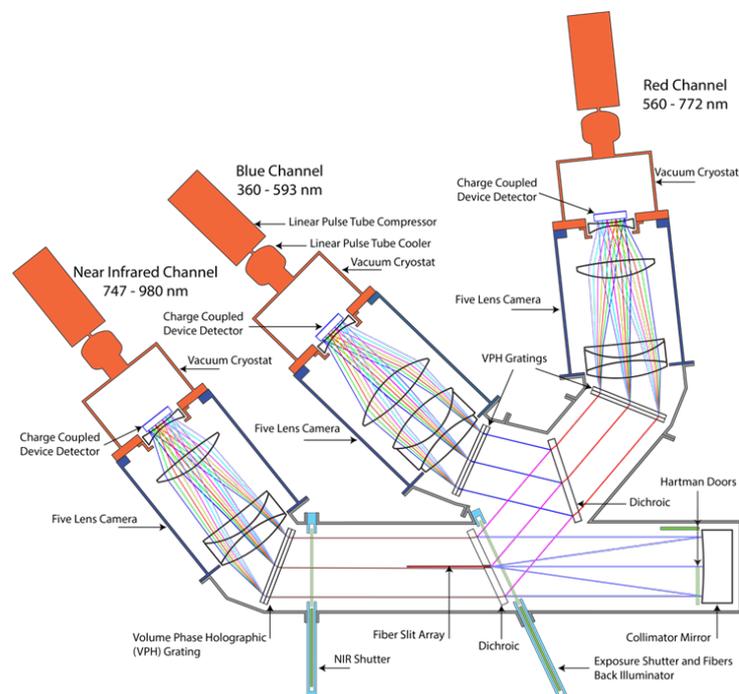


Figura 2.3: Representação esquemática do espectrógrafo utilizado no DESI. Os braços azul, vermelho e infravermelho combinam a luz coletada. Reproduzido de DESI Collaboration et al. (2022).

O DESI está instalado no telescópio de 4 metros Mayall, localizado no *Kitt Peak National Observatory*, e é composto por dez espectrógrafos idênticos, cada um com três braços,

¹ https://dr17.sdss.org/sas/dr17/apogee/spectro/aspcap/dr17/synspec_rev1/

conforme apresentado na Figura 2.3: azul (B: 3600–5800 Å), vermelho (R: 5760–7620 Å) e infravermelho próximo (Z: 7520–9824 Å), alcançando uma resolução espectral entre $R \sim 2000$ e 5500 (Koposov et al., 2024; DESI Collaboration et al., 2025). O MWS possui dois principais meios de processamento dos dados (do inglês, *pipelines*), que fornecem diversos parâmetros estelares. Um deles é o *pipeline* RVSpecfit (RVS, do inglês, *Radial velocity and stellar parameter fitting code*), que realiza o ajuste de espectro completo aos dados estelares do DESI. Este *pipeline* atua simultaneamente nos braços B, R e Z para derivar velocidades radiais e parâmetros atmosféricos fundamentais, como temperatura efetiva (T_{eff}), gravidade superficial ($\log g$), metalicidade ($[\text{Fe}/\text{H}]$), etc. Esse modelo é baseado exclusivamente nos dados espectroscópicos, sem o uso de informações fotométricas ou astrométricas, e utiliza matriz Hessiana e análise de verossimilhança logarítmica para estimar as incertezas (Cooper et al., 2023). O *pipeline* RVS alcança precisões típicas de 1 km s^{-1} e um limite sistemático de aproximadamente $0,9 \text{ km s}^{-1}$ (Cooper et al., 2023; Koposov et al., 2024).

Além do RVS, o *pipeline* de Parâmetros Estelares (SP, do inglês, *Stellar Parameters*) utiliza o código FERRE para derivar abundâncias químicas detalhadas. Após o espectro ser deslocado para velocidade radial zero (com base no valor obtido pelo RVS) e normalizado, o *pipeline* ajusta os parâmetros atmosféricos e, posteriormente, determina as abundâncias de elementos individuais (como C, Mg, Ca, Fe) (Koposov et al., 2024).

Neste trabalho, adotou-se o primeiro Data Release (DR1)², que teve aproximadamente 6,3 milhões de observações ao longo dos 13 meses iniciais da fase principal do levantamento (DESI Collaboration et al., 2025), e os parâmetros estelares utilizados são oriundos do *pipeline* SP, visto que é o mesmo *pipeline* utilizado na obtenção dos parâmetros estelares do SDSS. Embora o DR1 conte com objetos classificados como quasares e galáxias, optou-se por manter todos os dados disponibilizados que permanecessem após o cruzamento com o Gaia DR3, visto que já se sabe que a classificação de objetos astrofísicos adotada contém casos errôneos (Koposov et al., 2024). Assim, a amostra do DESI após cruzamento com o Gaia DR3 contém 5.029.390 fontes astrofísicas.

2.4 Gaia-ESO

O GES foi um projeto extensivo que obteve espectroscopia de alta resolução em todas as principais componentes da Galáxia, incluindo o halo, os discos espesso e fino, e o bojo (Randich et al., 2013). Sua operação foi voltada para estudar fontes previamente observadas pela missão Gaia, a fim de obter parâmetros e abundâncias estelares de alta qualidade, complementando a astrometria do Gaia, e assim permitindo um mapeamento químico detalhado das populações estelares da Via Láctea (Randich et al., 2013).

² <https://data.desi.lbl.gov/public/dr1/vac/dr1/mws/iron/v1.0/>

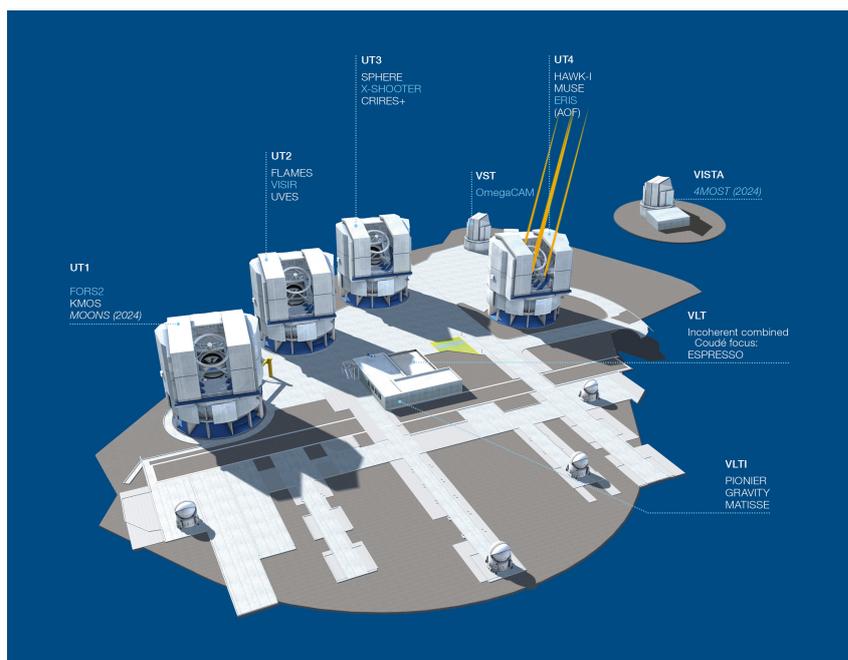


Figura 2.4: Representação do complexo de telescópios do Very Large Telescope, no Observatório Paranal, onde o GES coletou seus dados utilizando o Telescópio UT2 equipado com o FLAMES. Créditos: ESO

As observações foram realizadas entre dezembro de 2011 e janeiro de 2018 usando telescópio Kueyen (UT2) do complexo de telescópios *Very Large Telescope* (VLT) do *European Southern Observatory* (ESO), em Cerro Paranal. Este conjunto de telescópios é apresentado na Figura 2.4. Utilizando o espectrógrafo multiobjeto *Fibre Large Array Multi Element Spectrograph* (FLAMES; Pasquini et al., 2000), e empregando tanto o instrumento GIRAFFE (Blecha et al., 2000), com $R \sim 20.000$, quanto o *Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph* (UVES; (Dekker et al., 2000)), com $R \sim 47.000\text{--}50.000$ (Gilmore et al., 2022; Randich, S. et al., 2022), e cobre a faixa espectral entre 480 – 900 nm. A análise de precisão obtida indicou uma precisão máxima de $0,25 \text{ km s}^{-1}$ para o GIRAFFE e de $0,32 \text{ km s}^{-1}$ para o UVES. Além da altíssima resolução dos espectros obtidos pelo GES, um outro diferencial desse levantamento é ter sido o primeiro levantamento espectroscópico estelar a utilizar um telescópio de 8 metros (Randich et al., 2013).

Neste trabalho, foi utilizado o lançamento de dados final do levantamento (o DR5)³, que abrange 114.916 estrelas. A partir desse lançamento de dados, foi selecionada uma amostra contendo 110.358 objetos.

2.5 GALAH

O GALAH é um projeto espectroscópico em alta resolução e de grande escala projetado para investigar a formação e evolução da Via Láctea por meio da análise detalhada de

³ <https://www.eso.org/qi/catalog/show/411>

abundâncias químicas (De Silva et al., 2015). Ao observar centenas de milhares de estrelas, principalmente no disco galáctico, o GALAH possibilita um experimento de identificação química (do inglês, *chemical tagging*) que visa investigar a história de acreção da Galáxia (Martell et al., 2017).

O GALAH utiliza o *High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph* (HERMES; Sheinis et al., 2015), instalado no Telescópio Anglo-Australiano (AAT) de 3,9 metros no Observatório de Siding Spring, em Coonabarabran, Austrália. A Figura 2.5 mostra o espectrógrafo instalado. O HERMES é um espectrógrafo de alta resolução alimentado por fibras ópticas ($R \sim 28,000$), capaz de observar simultaneamente 400 estrelas em quatro bandas ópticas não contínuas, cobrindo aproximadamente 471–789 nm (Sheinis et al., 2015). Essa configuração permite medições precisas de velocidades radiais e abundâncias químicas detalhadas para até 30 elementos (Buder et al., 2024), apoiando investigações sobre populações estelares, processos químico-dinâmicos e a história de formação da Via Láctea.

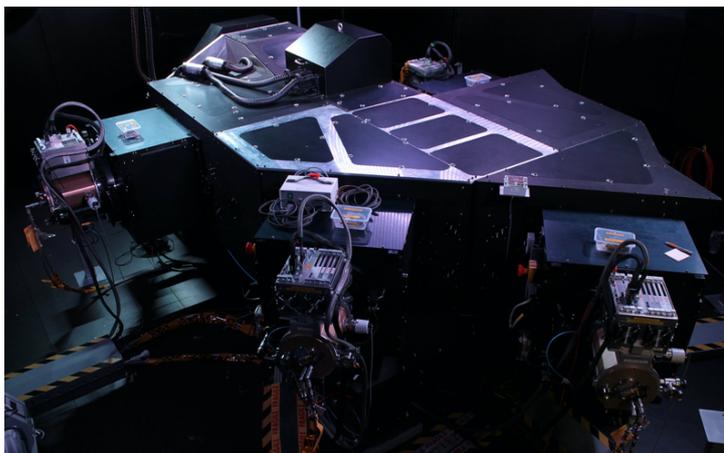


Figura 2.5: Espectrógrafo HERMES instalado no Telescópio Anglo Australiano, utilizado nas operações do GALAH. Reproduzido de Sheinis et al. (2015).

Neste trabalho, foram utilizados parâmetros estelares e velocidades radiais do quarto lançamento de dados do levantamento GALAH (GALAH DR4; Buder et al., 2024)⁴, que fornece espectroscopia óptica de alta resolução para mais de um milhão de estrelas. A partir deste lançamento, selecionamos uma amostra de 898.470 objetos que contêm velocidades radiais para o cruzamento com Gaia.

2.6 LAMOST

O LAMOST, também conhecido como Telescópio Guo Shou Jing, é uma instalação espectroscópica que conduz o levantamento LAMOST. Ao longo da última década, o levantamento coletou milhões de espectros por meio de dois programas principais: o LAMOST

⁴ https://cloud.datacentral.org.au/teamdata/GALAH/public/GALAH_DR4/catalogs/

ExtraGalactic Survey (LEGAS) e o LAMOST *Experiment for Galactic Understanding and Exploration* (LEGUE; Deng et al., 2012; Zhao et al., 2012). Enquanto o LEGAS foca na estrutura em larga escala do Universo e na física de galáxias, o LEGUE concentra-se na obtenção de informações cinemáticas e químicas das populações estelares da Via Láctea. Por meio desses esforços complementares, o LAMOST desempenhou um papel fundamental na ampliação da cobertura espectroscópica tanto em áreas extragalácticas quanto na própria Galáxia, permitindo o estudo de milhões de estrelas que contribuem para investigações sobre a formação e evolução da Via Láctea (Cui et al., 2012; Yan et al., 2022).



Figura 2.6: Telescópio Guo Shou Jing, onde tanto o levantamento LAMOST LRS quanto o LAMOST MRS são produzidos. Créditos: Chinese Academy of Sciences.

O levantamento LAMOST, conduzido no Observatório de Xinglong, que é apresentado na Figura 2.6, utiliza um telescópio Schmidt com abertura efetiva de 4 metros, equipado com 4000 fibras distribuídas por um campo de visão de 5 graus, que alimentam 16 espectrógrafos conectados a 32 câmeras CCD (Cui et al., 2012). Durante sua primeira fase (LAMOST-I, 2012–2017), o levantamento operou exclusivamente no modo de baixa resolução ($R \sim 1800$), cobrindo uma ampla faixa de comprimento de onda óptico de 370 a 900 nm (Zhao et al., 2012).

Em 2017, todos os espectrógrafos foram atualizados para suportarem também um modo de média resolução ($R \sim 7500$), marcando o início da segunda fase (LAMOST-II, 2018–2023). Esta fase inclui tanto o *Low-Resolution Survey* (LRS), que continua a estratégia original utilizando noites escuras e cinzentas, quanto o *Medium-Resolution Survey* (MRS; Liu et al., 2020), que opera durante noites claras e cinzentas e visa novos objetivos científicos, como arqueologia galáctica, física estelar, estrelas hospedeiras de exoplanetas, entre outros. O MRS opera com uma cobertura espectral mais limitada do que o LRS, com os braços azul e vermelho abrangendo 4950–5350 Å e 6300–6800 Å, respectivamente. Ainda assim, a maior resolução permite uma precisão maior na medição de velocidades radiais, de aproximadamente 1 km s^{-1} para estrelas de tipo tardio (do inglês, *late type stars*), em comparação com $\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ obtidos no modo de

baixa resolução para espectros com alta razão sinal-ruído (Wang et al., 2019; Yan et al., 2022). Enquanto o LRS fornece parâmetros atmosféricos estelares e abundâncias químicas (Luo et al., 2015), o MRS permite a determinação de abundâncias para um número similar de elementos, mas com precisão significativamente maior, viabilizando a identificação química detalhada em estudos da Galáxia (Liu et al., 2020). No LAMOST MRS são disponibilizados oito diferentes valores de velocidades radiais, rv_b0 , rv_b1 , rv_r0 , rv_r1 , rv_br0 , rv_br1 , rv_lasp0 e rv_lasp1 . A velocidade rv_b0 , rv_r0 e rv_br0 são determinadas a partir do método de correlação cruzada, usando espectros sintéticos como modelos, e suas diferenças se referem à banda espectral adotada, sendo rv_b0 relacionada à banda B e rv_r0 relacionada à banda R, enquanto rv_br0 foi determinada usando os dois espectros após a remoção do contínuo. As velocidades rv_b1 , rv_r1 e rv_br1 são as velocidades rv_b0 , rv_r0 e rv_br0 calibradas, corrigindo erros sistemáticos entre os espectrográfos. A velocidade rv_lasp0 é a velocidade radial estimada a partir do pipeline do LAMOST, enquanto rv_lasp1 é a velocidade radial obtida ao calibrar rv_lasp0 .

Neste estudo, foram utilizados dados do décimo lançamento de dados do LAMOST (DR10)⁵, que inclui observações coletadas durante ambas as fases, LAMOST-I e LAMOST-II, do levantamento. O DR10 compreende dados do LRS e do MRS, direcionados a diversas populações estelares da Via Láctea. Estão reunidos todos os espectros obtidos desde 2012 e são fornecidos parâmetros estelares, velocidades radiais e abundâncias químicas. O DR10 conta com 7.450.303 medições para estrelas do LRS e 2.162.938 medições de estrelas do MRS. A partir desse conjunto de dados, selecionamos uma subamostra de 5.259.372 estrelas do LRS e 994.672 do MRS com velocidades radiais disponíveis para cruzamento com Gaia.

2.7 RAVE

RAVE foi um levantamento espectroscópico de média resolução realizado entre 2003 e 2013. Projetado como um levantamento limitado por magnitude, o RAVE teve como objetivo minimizar vieses cinemáticos na seleção de alvos e contribuir para o entendimento da dinâmica e evolução da Galáxia por meio de um conjunto de dados homogêneo (Steinmetz et al., 2006). Suas observações desempenharam um papel crucial na arqueologia galáctica, utilizando tanto estrelas anãs quanto gigantes como traçadoras da história química e dinâmica da Via Láctea.

O RAVE utilizou o espectrógrafo multiobjeto 6dF (Watson et al., 2001), montado no telescópio UK Schmidt do Observatório Anglo-Australiano. A Figura 2.7 mostra a parte interna da cúpula onde está o telescópio. O levantamento obteve espectros de média resolução ($R \sim 7.500$), centrados na região do tripleto de CaII (8410–8795 Å). Essa faixa espectral permite a medição da velocidade radial e a estimativa de parâmetros estelares básicos, como temperatura efetiva, gravidade superficial e metalicidade. Com uma razão sinal-ruído típica de 40, o RAVE

⁵ <https://www.lamost.org/dr10/v2.0/catalogue>



Figura 2.7: Telescópio UK Schmidt, em que foram coletados os dados do levantamento RAVE. Créditos: Anglo Australian Observatory.

alcançou uma precisão em velocidade radial melhor que 2 km s^{-1} para a maioria dos alvos (Steinmetz et al., 2020). O lançamento final dos dados forneceu parâmetros homogenizados para mais de 450.000 estrelas, com incertezas medianas de aproximadamente 300 K em T_{eff} , 0,7 dex em $\log g$ e 0,2 dex em $[M/H]$ (Steinmetz et al., 2020).

Neste estudo, foi utilizado o sexto e último lançamento de dados do levantamento RAVE (RAVE DR6; Steinmetz et al., 2020)⁶, do qual foram obtidas as estimativas de velocidades radiais. Os parâmetros estelares e as abundâncias químicas foram extraídos do catálogo de parâmetros estelares MADERA, fornecidos pela colaboração do RAVE. Foi feito o cruzamento desta amostra de 518.387 estrelas únicas com a astrometria do Gaia DR3. A amostra final adotada neste trabalho é composta por 509.012 estrelas com informação completa do espaço de fases para análise orbital.

2.8 SEGUE

Neste trabalho também foram utilizados os dados do SEGUE que fez parte do SDSS-II e do primeiro ano do SDSS-III (Eisenstein et al., 2011) e foi composto por duas fases distintas: SEGUE-1 e SEGUE-2 (Yanny et al., 2009; Rockosi et al., 2022). O levantamento foi projetado para mapear subestruturas no halo e no disco da Galáxia, identificar remanescentes de eventos de acreção passados e caracterizar populações estelares pobres em metais, fornecendo informações fundamentais sobre a história de formação do halo estelar da Via Láctea (Yanny et al., 2009; Rockosi et al., 2022).

⁶ <https://www.rave-survey.org/query/>

O SEGUE utilizou os espectrógrafos multiobjeto do SDSS (Smee et al., 2013), montados no Telescópio Sloan Foundation de 2,5 metros do Apache Point Observatory (Gunn et al., 2006), o mesmo que vem sendo utilizado nas operações do APOGEE-N (Figura 2.2(a)). O sistema operava com 640 fibras ópticas por placa, permitindo a observação simultânea de centenas de estrelas. Ambas as fases do SEGUE cobriram a faixa de comprimento de onda de 390 a 920 nm, com resolução espectral de $R \sim 1,800$, atingindo alvos com magnitudes tão baixas quanto $g \sim 20$ (Yanny et al., 2009). Essa configuração permite medições de velocidades radiais com precisão entre ~ 4 e 10 km s^{-1} (Yanny et al., 2009), além da derivação de parâmetros atmosféricos estelares fundamentais (temperatura efetiva com erros típicos de $\sim 60 \text{ K}$, gravidade superficial com $\sim 0,2 \text{ dex}$ e metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$ com $\sim 0,15 \text{ dex}$) para estudos populacionais (Rockosi et al., 2022).

Neste trabalho foram adotados os parâmetros estelares e as velocidades radiais do catálogo SEGUE DR12⁷, disponível publicamente. Esse conjunto de dados fornece espectroscopia de baixa resolução, com parâmetros derivados pelo *SEGUE Stellar Parameter Pipeline* (SSPP; Lee et al., 2008). O cruzamento das estrelas presentes no SEGUE com a astrometria do Gaia DR3 resultou em um número amostral de 417.920 observações.

2.9 Distâncias

Uma das quantidades mais fundamentais na astrofísica é a distância. Embora as distâncias possam, a princípio, ser estimadas pelo inverso da paralaxe, ($d \sim 1/\varpi$, Seção 1.3), esse método apresenta baixa precisão para objetos tênues e distantes, resultando muitas vezes em grandes erros sistemáticos (Binney & Merrifield, 1998).

Para contornar essa inconsistência, diversas abordagens mais refinadas foram desenvolvidas. Uma das abordagens é o uso de estrelas gigantes vermelhas no estágio evolutivo do agrupamento vermelho (RC, do inglês, *Red Clump*), utilizando calibrações empíricas das estrelas RC como velas padrão (Bovy et al., 2014). Outro método amplamente utilizado envolve o uso de modelos bayesianos combinando dados espectroscópicos, fotométricos e astrométricos (por exemplo, Queiroz et al., 2018; Green et al., 2019; Queiroz et al., 2020; Fouesneau et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Neste trabalho, foram adotadas as distâncias fornecidas por Bailer-Jones et al. (2021), com base nos dados do Gaia *Early Data Release 3* (EDR3; Gaia Collaboration et al., 2021). Esse catálogo disponibiliza distâncias geométricas para 1,47 bilhão de estrelas e distâncias fotogeométricas para mais de 1,35 bilhão. O método fotogeométrico, utilizado neste estudo, é fundamentado em uma estrutura bayesiana e emprega a fotometria do Gaia (G, BP–RP) para restringir as estimativas de distância de forma mais precisa, especialmente em casos de pa-

⁷ <https://dr12.sdss.org/sas/dr12/sdss/sspp/>

ralaxes incertas. Essas estimativas apresentam menor dispersão e viés em comparação com as distâncias puramente geométricas e demonstram um nível de concordância de 69% quando comparadas às distâncias de RC. Além disso, a expressiva superioridade numérica do catálogo de Bailer-Jones em relação a outros métodos de obtenção de distâncias reforça sua adequação ao escopo deste trabalho.

As distâncias e respectivas incertezas fornecidas por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#) são derivadas por meio de amostragem de Monte Carlo, o que permite obter distribuições posteriores juntamente com intervalos de confiança assimétricos de 68%, definidos pelos percentis 16 e 84. As distâncias fotogeométricas são particularmente confiáveis em escalas de poucos kiloparsecs, embora possam ser utilizadas em distâncias maiores, desde que se considere a redução em sua precisão ([Bailer-Jones et al., 2021](#)).

De modo resumido, as principais características de cada levantamento utilizado na execução deste trabalho podem ser conferidas na Tabela 2.1. Ressalta-se que todos os dados dos levantamentos espectroscópicos utilizados neste trabalho, além dos dados astrométricos do Gaia e o catálogo de distância produzido por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#), são públicos.

Tabela 2.1: Resumo das principais informações dos levantamentos espectroscópicos empregados no trabalho.

Levantamento	Resolução	Cobertura espectral	Observações (N)	Amostra inicial (N)
APOGEE DR17	22.500	15.100—17.000 Å	733.901	714.875
DESI DR1	2.000–5.500	3.600–9.824 Å	6.372.607	5.029.390
Gaia RVS DR3	11.500	8.450–8.720 Å	33.812.183	33.581.727
Gaia-ESO DR5	20.000; 50.000	4.800–9.000 Å	114.916	114.314
GALAH DR4	28.000	4.700–7.900 Å	1.085.520	904.781
LAMOST LRS DR10	1.800	3.700–9.100 Å	7.450.303	7.280.433
LAMOST MRS DR10	7.500	4.950–6.800 Å	2.162.938	2.142.146
RAVE DR6	7.500	8.410–8.795 Å	518.387	511.411
SEGUE DR12	1.800	3.900–9.000 Å	417.920	326.724

As diferentes coberturas espectrais e espaciais de cada levantamento permitem que todas as regiões da Via Láctea sejam estudadas. A partir da amostra inicial de cada levantamento, os parâmetros estelares disponibilizados foram tratados para a obtenção dos parâmetros orbitais e construção do catálogo, como será apresentado no próximo Capítulo.

Neste capítulo, apresentamos a metodologia adotada para construir o catálogo de parâmetros orbitais a partir dos levantamentos estelares discutidos no Capítulo 2. Descrevemos o cruzamento entre dados espectroscópicos e astrométricos, a estimativa das distâncias e os critérios de seleção aplicados na normalização das velocidades radiais.

Detalhamos os testes realizados para definir o número ideal de integrações orbitais, o método adotado para a integração das órbitas e os critérios mínimos de limpeza das soluções, priorizando a completude do catálogo. Por fim, explicamos a metodologia para a classificação cinemática das estrelas, a criação das flags de seleção e a compilação final do catálogo com os dados espectroscópicos originais.

3.1 Cruzamento entre os dados

Parte primordial da execução deste trabalho é a seleção de dados espectroscópicos que também estivessem presentes na amostra astrométrica do Gaia DR3, a fim de se obter informações precisas de posição e movimento próprio, além dos dados de velocidade radial obtidos a partir do Gaia, visto que cobre o céu inteiro e disponibiliza a maior amostra de velocidades radiais atualmente. Para garantir que esse critério fosse satisfeito, realizamos o cruzamento de cada um dos levantamentos espectroscópicos com o Gaia DR3 a partir dos valores de RA e DEC, utilizando o software TOPCAT (Taylor, 2005) e sua ferramenta *CDS Upload X-Match*, selecionando o catálogo Gaia DR3 (*Epoch* 2016). Para associar os objetos entre diferentes levantamentos, o cruzamento foi executado com uma tolerância máxima de 3 segundos de arco entre as posições celestes, garantindo que mesmo objetos com movimentos próprios elevados fossem cruzados.

Ainda era preciso que os dados utilizados neste catálogo também tivessem informação de distância presente no catálogo de Bailer-Jones et al. (2021). Por esse motivo, usando mais uma vez a ferramenta *CDS Upload X-Match* no TOPCAT, foi feito o cruzamento dos dados com o catálogo Gaia EDR3 *distances*, também adotando tolerância máxima de 3 segundos de arco entre as posições celestes. O erro na distância foi obtido pela média dos valores dos percentis 16 e 84 das distâncias fotogeométricas, disponibilizados por Bailer-Jones et al. (2021).

Uma vez que o código AGAMA requer como entrada obrigatória determinados parâmetros

(ver Seção 3.4), foram removidas do catálogo todas as estrelas que apresentavam valores nulos em pelo menos uma das seguintes estimativas: RA, DEC, pmRA, pmDEC, erro de pmRA, erro de pmDEC, distância, erro na distância, velocidade radial e erro na velocidade radial. Uma outra ressalva é que algumas fontes possuíam valores não físicos nos parâmetros estelares disponibilizados pelos levantamentos. Por exemplo, para os levantamentos GALAH, LAMOST MRS e SEGUE, objetos que apresentam erro na velocidade radial igual a -9999 indicam que a velocidade radial não foi obtida naquela observação, o que corresponde a um valor nulo nos demais levantamentos (e que devem ser removidos antes de aplicar a integração das órbitas). Estes objetos foram removidos da análise, visto que os parâmetros orbitais obtidos seriam sabidamente irrealistas. Essa abordagem garante que todos os dados da amostra sejam utilizados nas etapas subsequentes deste trabalho. Feitos os cruzamentos, as amostras de cada levantamento estavam prontas para a próxima etapa, as quais serão descritas nas seções a seguir.

3.2 Normalização da velocidade radial

Buscando garantir a consistência e homogeneidade entre os conjuntos de dados, realizamos a normalização das velocidades radiais de todos os catálogos em relação ao Gaia DR3. Para garantir que essa normalização não fosse afetada por dados espúrios, critérios específicos foram aplicados para cada levantamento a fim de limpar a amostra, selecionando apenas fontes confiáveis para a normalização das velocidades radiais.

A condição $RUWE < 1.4$ foi aplicada em todas as amostras para garantir a seleção de fontes com medições astrométricas confiáveis (Gaia Collaboration et al., 2023). Foi também definido um intervalo de temperatura efetiva para incluir apenas estrelas com linhas espectrais bem definidas que possibilitem medições de velocidade radial de forma precisa, e um limite de razão sinal-ruído foi estabelecido para priorizar fontes com sinais de alta qualidade dentro da amostra de cada levantamento. Quando disponibilizadas pelos levantamentos, foram aplicadas *flags* específicas para filtrar os dados, retraindo apenas fontes com medições precisas de velocidade radial.

No processo de normalização, a velocidade radial das amostras limpas de cada levantamento espectroscópico foi comparada com a velocidade radial disponibilizada pelo Gaia para o mesmo objeto. Por isso, para o LAMOST MRS, uma etapa a mais precisou ser executada: a seleção de qual velocidade radial adotar. Considerando que o levantamento fornece oito diferentes velocidades radiais (rv_b0 , rv_b1 , rv_r0 , rv_r1 , rv_br0 , rv_br1 , rv_lasp0 , rv_lasp1), a seleção do melhor dado de velocidade radial foi feita com base no valor das medianas do desvio com relação ao Gaia DR3 e no valor do desvio médio absoluto (MAD, do inglês, *mean absolute deviation*), visto que essas duas abordagens evitam a influência de valores espúrios. Como pode ser visto na Figura 3.1, em que o eixo x é a velocidade radial do Gaia e o eixo y é a diferença entre cada velocidade radial disponibilizada pelo LAMOST MRS e a do Gaia, sendo um painel

para cada uma das comparações, o menor valor de MAD foi obtido ao utilizar a velocidade radial dada pela coluna `rv_br1`, de modo que essa foi a escolhida para utilização neste trabalho, e com isso a *flag* selecionada foi a `rv_br_flag`.

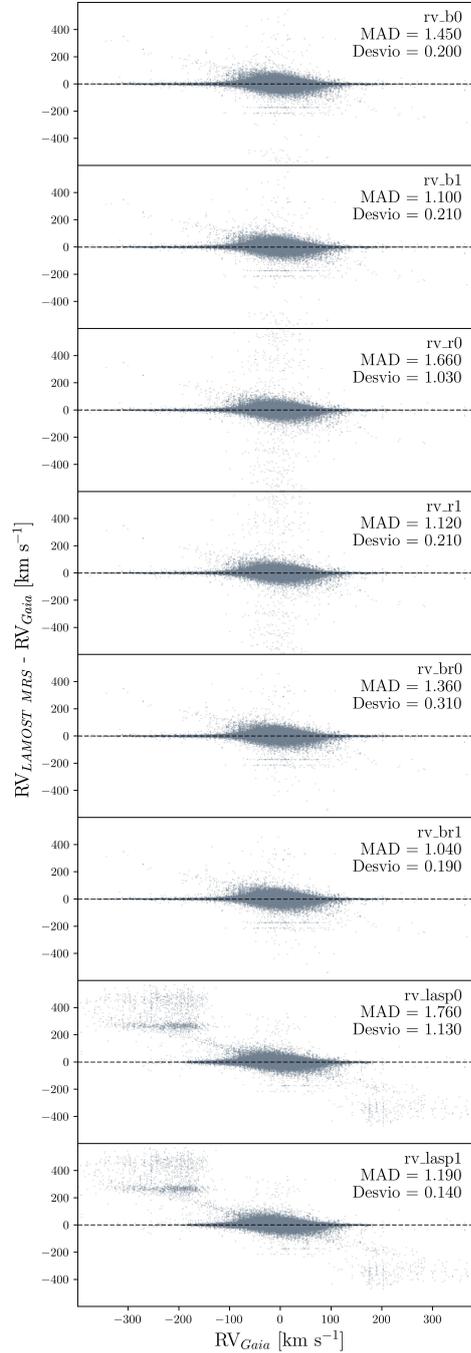


Figura 3.1: Desvio entre a velocidade radial do Gaia e as diversas velocidades radiais disponibilizadas pelo LAMOST MRS. A linha preta pontilhada é o MAD, e o desvio foi feito com a mediana de todas as estrelas do levantamento.

Os critérios de seleção das amostras de cada levantamento espectroscópico são resumidos por:

- APOGEE DR17: $4000 \leq \text{TEFF} \leq 6500$, $\text{SNREV} \geq 70$, $\text{STARFLAG} == 0$, $\text{ASPCAPFLAG} == 0$;

- DESI: $4000 \leq \text{TEFF} \leq 6500$, $\text{SNR_MED} \geq 15$;
- Gaia-ESO: $3000 \leq \text{TEFF} \leq 8000$, $\text{SNR} \geq 20$, $\text{SFLAGS} \neq \text{"SRV"}$;
- GALAH: $4000 \leq \text{teff} \leq 6500$, $\text{snr_c3_iraf} \geq 30$, $\text{flag_sp} == 0$, $\text{flag_sp_fit} == 0$;
- LAMOST LRS: $4000 \leq \text{teff} \leq 6500$, $\text{snrg} \geq 15$, $\text{snri} \geq$, $\text{snrr} \geq 15$, $\text{snru} \geq 15$;
- LAMOST MRS: $4000 \leq \text{teff_lasp} \leq 6500$, $\text{snr} \geq 20$, $\text{rv_br_flag} == 0$;
- RAVE: $4000 \leq \text{Teff} \leq 7000$, $\text{S/N} \geq 20$;
- SEGUE: $4500 \leq \text{TEFF_ADOP} \leq 7500$, $\text{SNR} \geq 20$, $\text{FLAG} == \text{"nnnnn"}$.

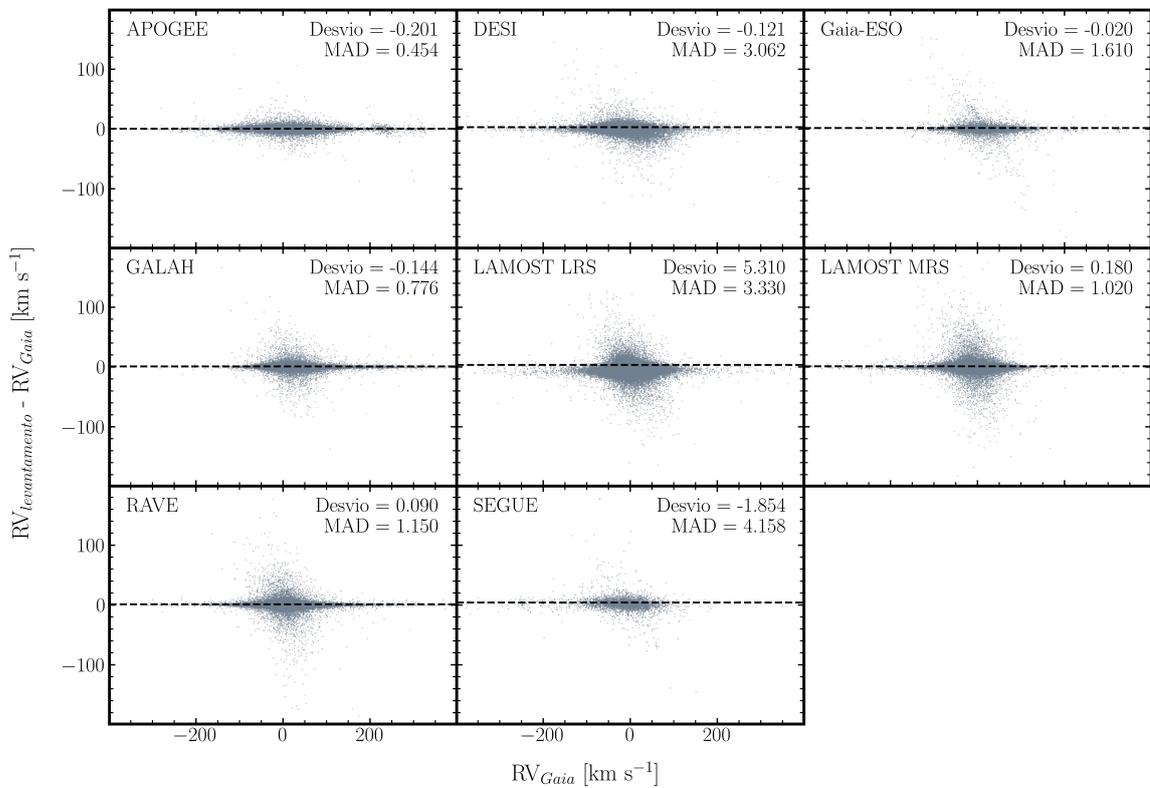


Figura 3.2: Desvio entre a velocidade radial do Gaia e a velocidade radial de cada levantamento espectroscópico. A linha preta pontilhada é o desvio absoluto médio (MAD), enquanto o desvio foi feito com a mediana de todas as estrelas do levantamento.

A partir da aplicação desse critério de limpeza, resultaram amostras de 163.723 estrelas para o APOGEE, 2.214.256 estrelas para o DESI, 32.709 estrelas para o Gaia-ESO, 516.419 estrelas para o GALAH, 872.520 estrelas para o LAMOST LRS, 611.299 estrelas para o LAMOST MRS, 326.644 estrelas para o RAVE e 179.443 estrelas para o SEGUE. Com a amostra limpa, foi feita a comparação entre as velocidades radiais do Gaia e de cada catálogo, utilizando a velocidade radial do Gaia como padrão de referência. A comparação foi feita a partir da mediana do desvio entre a velocidade do Gaia DR3 e a velocidade do levantamento. Através dessa comparação, os desvios obtidos nas velocidades radiais, em km s^{-1} , foram: $-0,201^{+0,957}_{-1,147}$ para o APOGEE, $-0,121^{+5,288}_{-4,963}$ para o DESI, $-0,020^{+3,493}_{-3,240}$ para o Gaia-ESO, $-0,144^{+1,391}_{-1,585}$ para o

GALAH, $5,310_{-0,350}^{+11,420}$ para o LAMOST LRS, $0,180_{-1,990}^{+2,520}$ para o LAMOST MRS, $0,090_{-1,910}^{+2,080}$ para o RAVE e $-1,854_{-8,779}^{+5,333}$ para o SEGUE. A Figura 3.2 mostra o desvio entre a velocidade radial do Gaia (eixo x) e as velocidades radiais de cada levantamento menos a velocidade radial do Gaia (eixo y). Cada painel representa um levantamento e os valores do desvio concordam com o que já foi relatado na literatura (Katz et al., 2023; Tsantaki et al., 2022).

Após o cálculo dos desvios entre as velocidades radiais dos levantamentos e os valores do Gaia DR3, o valor da mediana do desvio correspondente foi aplicado para normalizar as velocidades radiais em cada levantamento. Essa normalização foi estendida a todo o conjunto de dados de cada catálogo obtido após os cruzamentos descritos na Seção 3.1 e não apenas à amostra filtrada pelos critérios de limpeza discutidos nesta Seção.

Neste trabalho, o único critério de limpeza adotado para o Gaia foi $RUWE < 1,4$, valor recomendado em diversos trabalhos (por exemplo, Lindegren et al., 2020; Lindegren et al., 2021a; Babusiaux et al., 2023) e que seleciona fontes com boa acurácia nas medidas astrométricas. Entretanto, o Gaia também pode sofrer tendências relacionadas a limites de magnitude e paralaxe, além das faixas de temperatura efetiva das estrelas (Katz et al., 2023), de modo que futuramente será feito um corte de limpeza para os dados astrométricos do Gaia (conforme será discutido na Seção 5.1), aumentando a precisão dos valores de desvio entre a velocidade radial do Gaia e a dos demais levantamentos espectroscópicos.

3.3 Código AGAMA

Para integrar as órbitas das estrelas e extrair seus parâmetros orbitais, foi utilizado o código *Action-based Galaxy Modelling Architecture* (AGAMA; Vasiliev, 2019), uma biblioteca em linguagem de programação C++ com interface Python desenvolvida para modelagem dinâmica baseada em ações (Seção 1.3). O AGAMA oferece uma estrutura versátil e eficiente para o cálculo de ações orbitais, integrais de movimento e potenciais galácticos, sendo especialmente útil para grandes volumes de dados como é o caso do conteúdo deste trabalho. Dentre os motivos que levaram a escolha do AGAMA como integrador de órbitas em vez de outras ferramentas como o Galpy (Bovy, 2015), Gala (Price-Whelan, 2017), ou o GravPot16¹, estão a sua flexibilidade na definição de modelos de potencial personalizados, compatibilidade nativa com o potencial de McMillan (2017), que foi adotado neste trabalho, e desempenho superior na integração numérica e cálculo das ações.

O AGAMA calcula o potencial gravitacional de diversos perfis de densidade, além de fornecer métodos para integração e análise de órbitas, transformação entre espaços de posição, velocidade e ação. Utilizando o AGAMA, é possível inferir a estrutura da Via Láctea a partir da cinemática estelar inserida. Para o emprego do AGAMA neste trabalho, foram requeridas a seleção

¹ <https://gravpot.utinam.cnrs.fr/>

de um modelo de potencial (neste caso, o modelo de [McMillan, 2017](#)) e entradas obrigatórias relativas aos levantamentos estelares, sendo elas ascensão reta (α), declinação (δ), distância heliocêntrica (d), velocidade radial (RV), componentes do movimento próprio (μ_α , μ_δ), bem como as respectivas incertezas, que são utilizadas para a propagação de incertezas. Como saída, o código retorna os seguintes parâmetros: velocidades nas coordenadas cartesianas (V_X , V_Y , V_Z) e cilíndricas (V_r , V_ϕ , V_z), ações orbitais (J_r , J_ϕ , J_z), energia total (E), excentricidade (e), raios pericêntrico (R_{peri}) e apocêntrico (R_{apo}), momento angular total (L_{tot}) e perpendicular (L_{perp}), as componentes cartesianas do momento angular (L_X , L_Y , L_Z), inclinação orbital (i), posição galactocêntrica em coordenadas cartesianas (X , Y , Z), além dos percentis 16 e 84 para todas essas quantidades, refletindo as incertezas propagadas das medidas observacionais. A Tabela [A.1](#) apresenta a descrição completa desses parâmetros.

3.3.1 Número de realizações Monte Carlo

Embora um maior número N de integrações MCMC proporcione maior precisão estatística das estimativas, esse procedimento torna-se rapidamente custoso do ponto de vista computacional quando aplicado a grandes amostras. Por esse motivo, foi conduzido um teste com 30 mil estrelas do levantamento SEGUE, com o objetivo de identificar um número de realizações que oferecesse um bom compromisso entre robustez estatística e viabilidade computacional. A escolha de utilizar a amostra do SEGUE se deve ao fato de que, como mencionado na Seção [2.8](#), este é um levantamento que teve como foco estrelas do halo, o que garante a presença de estrelas de todas as componentes galácticas nessa amostra. Além da escolha do levantamento estelar, toda a aquisição dos dados para este teste foi feita de maneira aleatória, evitando assim qualquer corte de qualidade ou viés de seleção, para além daquele da função de seleção do próprio levantamento.

Com a amostra de estudo selecionada, executamos o código AGAMA para oito diferentes combinações, com 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800 e 1000 realizações Monte Carlo. O resultado obtido com 1000 realizações foi definido como o de maior confiança, e todos os demais foram comparados à ele. Para ilustrar a análise, a [Figura 3.3](#) mostra a distribuição numérica do desvio obtido em cada comparação para quatro parâmetros orbitais: as velocidades em coordenadas cilíndricas, V_r , V_ϕ e V_z , e a excentricidade, e , além dos valores de desvio da mediana e os valores de MAD.

Foi observado que com a adoção de 50 realizações, a mediana da diferença foi de 0,002% e o desvio padrão da diferença foi 4,932%; com 100 realizações, a mediana da diferença foi de 0,002% e o desvio padrão da diferença foi 4,734%; com 200 realizações, a mediana da diferença foi de 0,002% e o desvio padrão da diferença foi 5,793%; com 300 realizações, a mediana da diferença foi de 0,004% e o desvio padrão da diferença foi 3,396%; com 400 realizações, a mediana da diferença foi de 0,000% e o desvio padrão da diferença foi 4,083%;

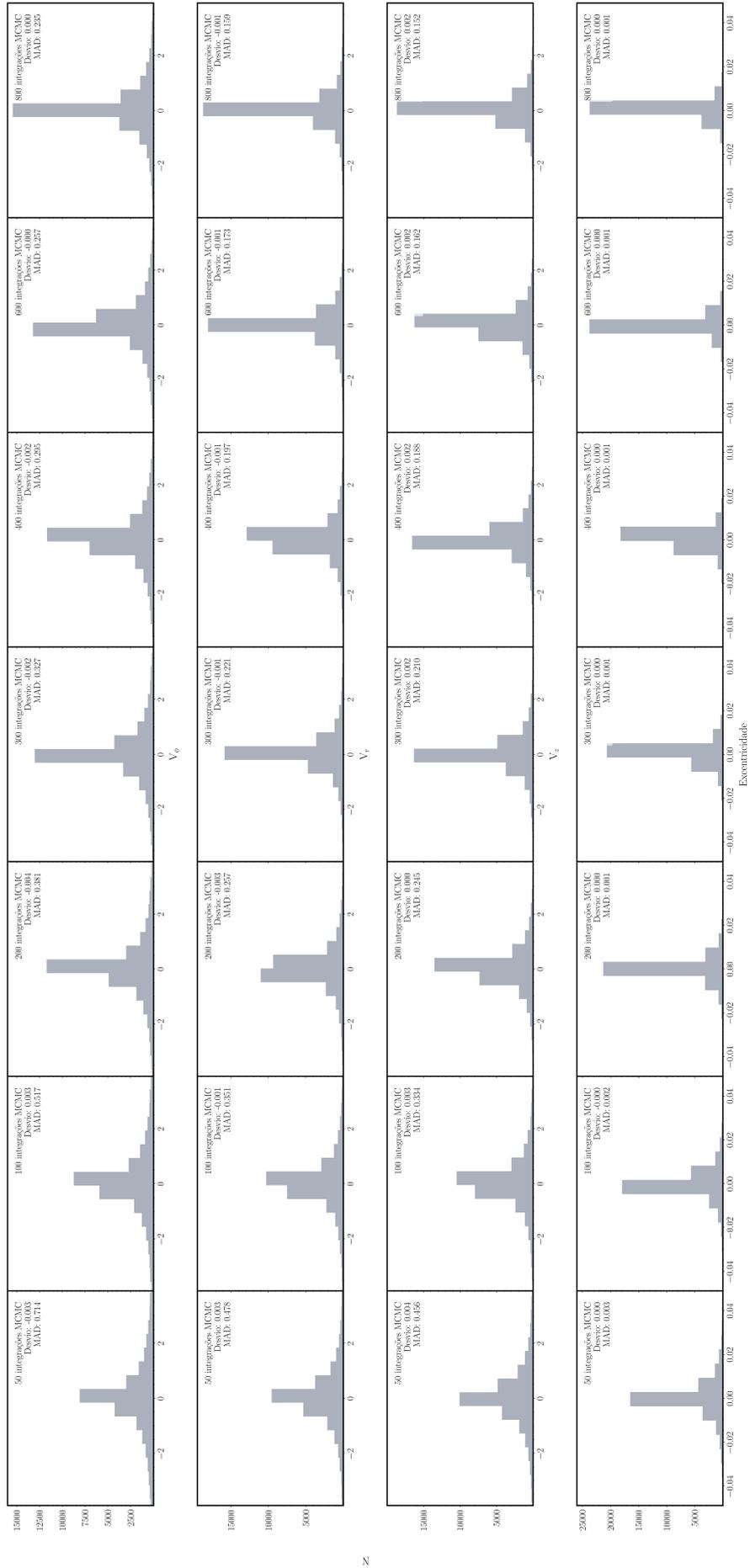


Figura 3.3: Distribuição da dispersão dos parâmetros orbitais V_ϕ (painel superior), V_r (painel central superior), V_z (painel central inferior) e e (painel inferior) para uma amostra de 30 mil estrelas do SEQUE. Cada painel mostra, da esquerda para a direita, a comparação para a esquerda entre 50, 100, 200, 300, 400, 600 e 800 integrações MCMC e o padrão adotado de 1000 integrações MCMC.

com 600 realizações, a mediana da diferença foi de 0,001% e o desvio padrão da diferença foi 1,359%; com 800 realizações, a mediana da diferença foi de 0,000% e o desvio padrão da diferença foi 1,274%. Com base nesses testes, adotou-se o número de 100 realizações Monte Carlo para o cálculo dos parâmetros orbitais, pois esse valor já garante convergência satisfatória em relação ao padrão de referência, sem acarretar em um custo computacional excessivo.

Tendo o número de integrações MCMC definido, as amostras de cada levantamento foram computadas. O processo de determinação dos parâmetros orbitais a partir de 100 integrações para todos os levantamentos levou cerca de 8 meses para ser concluído. O cálculo das órbitas de todos os levantamentos, com exceção do Gaia, foi obtido em um servidor disponível no grupo de pesquisa na Universidade Federal de Sergipe. Cada cálculo de órbita durou, em média, entre 2 e 3 segundos com um processador Intel Xeon W-3345 (24/48 núcleos de até 4 GHz). Para o cálculo das órbitas do Gaia, foi utilizado poder computacional externo à instituição, a partir do conjunto (do inglês, *cluster*) de computadores disponibilizado pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de São Paulo. O cálculo dos 33 milhões de objetos foi concluído em cerca de 5 dias. Uma vez obtidos os parâmetros orbitais, estes foram utilizados para fazer as análises e a classificação cinemática das estrelas da amostra deste trabalho.

3.4 Modelo de Potencial e Sistema de Referência

Para a integração das órbitas e obtenção dos parâmetros orbitais das estrelas, é preciso adotar um modelo para o potencial gravitacional da Via Láctea. Tal potencial está diretamente relacionado à distribuição de massa da Galáxia e, conseqüentemente, determina como as estrelas se movem através dela ao longo do tempo (Binney & Tremaine, 2008). Em geral, utiliza-se um modelo composto por múltiplos componentes que representam o bojo, o disco e o halo de matéria escura, cada um com parâmetros ajustados a partir de dados observacionais que refletem as propriedades dinâmicas e estruturais da Galáxia.

Diante disso, a literatura oferece diversos modelos de potenciais estáticos (por exemplo, Bovy, 2015; Price-Whelan, 2017; McMillan, 2017; Pérez-Villegas et al., 2020; Hunter et al., 2024), e variantes no tempo (por exemplo, Mardini et al., 2020; Vasiliev & Baumgardt, 2021), amplamente utilizados em dinâmica galáctica. Em modelos estáticos, as diferenças de parametrização entre as formulações afetam quantitativamente os parâmetros orbitais calculados, mas, no geral, essas diferenças não alteram qualitativamente o comportamento global das órbitas. Por outro lado, em modelos com potencial variável, que visam analisar os efeitos nas órbitas das estrelas através da incorporação da evolução secular, como a formação de barras, braços espirais ou interações com satélites.

Para este trabalho, adotou-se o modelo estático proposto por McMillan (2017). Esse

modelo é baseado em ajustes de diversos observáveis galácticos, incluindo curvas de rotação, densidades estelares e distribuição de velocidade local. Essa escolha justifica-se pela eficiência computacional inerente a potenciais estáticos no cálculo de órbitas estelares, aliada à sua precisão. O modelo adotado considera uma decomposição da Via Láctea em seis componentes axissimétricos: um bojo central, um halo de matéria escura, discos fino e espesso, e dois discos de gás (H I e molecular, H₂). Embora modelos variantes no tempo capturem efeitos dinâmicos evolutivos, a incorporação de evolução do potencial gravitacional proverá parâmetros orbitais não condizentes com o cenário de evolução da Galáxia.

Apesar do bojo possuir uma barra triaxial rotativa e de formato caixa/amendoim, [Mc-Millan \(2017\)](#) adota um modelo simplificado e simétrico do bojo, cujo perfil de densidade é

$$\rho_b = \frac{\rho_{0,b}}{\left(1 + \frac{r'}{r_0}\right)^\alpha} \exp\left[-\left(\frac{r'}{r_{\text{cut}}}\right)^2\right], \quad (3.1)$$

em que

$$r' = \sqrt{R^2 + \left(\frac{z}{q}\right)^2}, \quad (3.2)$$

é a distância elipsoidal, considerando o achatamento do bojo, com $\alpha = 1,8$ sendo o índice de densidade, que controla como a densidade cai com a distância, o raio de escala $r_0 = 0,075$ kpc indica o ponto em que a densidade começa a cair com α , $r_{\text{cut}} = 2,1$ kpc é o raio de corte, que determina a região em que o decaimento da densidade se torna significativa, e razão de eixo $q = 0,5$ indica o achatamento do bojo no eixo Z. A densidade $\rho_{0,b} = 9,93 \times 10^{10} M_\odot \text{ kpc}^{-3}$, é a densidade de escala, com massa total $M_b = 8,9 \times 10^9 M_\odot$. Cabe dizer que essa simplificação do bojo como uma componente esféricamente simétrica pode introduzir incertezas nos parâmetros orbitais de estrelas localizadas nas regiões internas da Galáxia, onde os efeitos da barra triaxial são mais pronunciados.

Tanto o disco fino quanto o disco espesso são modelados com perfis exponenciais:

$$\rho_d(R, z) = \frac{\Sigma_{d,0}}{2z_d} \exp\left(-\frac{|z|}{z_d} - \frac{R}{R_d}\right) \quad (3.3)$$

em que os parâmetros adotados são: Σ_0 é a densidade superficial central, a escala de altura é $z_{d,\text{fino}} = 300$ pc, $z_{d,\text{espesso}} = 900$ pc, a escala de comprimento é $R_{d,\text{fino}} = 2.6 \pm 0.52$ kpc, $R_{d,\text{espesso}} = 3.6 \pm 0.72$ kpc. Além disso, a definição morfológica adotada não leva em consideração critérios químicos, conforme discutido no trabalho de [Jurić et al. \(2008\)](#).

A inclusão dos discos de gás é indispensável para reproduzir as estrelas de alta velocidade encontradas na vizinhança solar. No modelo de potencial adotado, a componente gasosa

segue uma forma geral semelhante à do disco estelar, e inclui um buraco central, relativo ao buraco negro central Sgr A*, seguindo a lei de densidade:

$$\rho_{\text{gas}}(R, z) = \frac{\Sigma_0}{4z_d} \exp\left(-\frac{R_m}{R} - \frac{R}{R_d}\right) \text{sech}^2\left(\frac{z}{2z_d}\right), \quad (3.4)$$

com R_m indicando o tamanho adotado para o buraco negro central, z_d é a altura de escala vertical, e R_d é o comprimento de escala radial. A componente H I possui $z_{H1} = 85$ pc, $\Sigma = 10 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$, com $R_d = 7$ kpc e $R_m = 4$ kpc, enquanto a H₂ tem $z_{H2} = 45$ pc, $\Sigma = 2 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$, com $R_d = 1.5$ kpc e $R_m = 12$ kpc.

Por fim, a densidade do halo de matéria escura foi estabelecida seguindo

$$\rho_h(r) = \frac{\rho_{0,h}}{\left(\frac{r}{r_h}\right)^{\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_h}\right)\right]^{3-\gamma}}, \quad (3.5)$$

em que r_h é o raio de escala e $\gamma = 1$ indica a adoção do perfil NFW, de [Navarro et al. \(1996\)](#), comumente utilizado como uma aproximação do perfil de densidade encontrado em simulações cosmológicas considerando apenas matéria escura.

O modelo foi ajustado por meio de um algoritmo de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC, do inglês, *Markov Chain Monte Carlo*; [Sharma, 2017](#)), adotando $R_{\odot} = 8,20 \pm 0,09$ kpc como a estimativa da distância ao centro galáctico, a velocidade circular no Sol, $v_{\odot} = 232,8 \pm 3,0$ km s⁻¹, $\rho_{\text{DM}} = 0,40 \pm 0,04$ GeV cm⁻³ como a densidade local de matéria escura, a estimativa do movimento do Sol usando o valor de [Schönrich et al. \(2010\)](#), $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.10, 12.24, 7.25)$ km s⁻¹ e a rotação do buraco negro supermassivo no centro da Galáxia, Sgr A*. Nesse modelo, a massa total estelar estimada é $M_{\star} = (5,43 \pm 0,57) \times 10^{10} M_{\odot}$, enquanto a massa total de virialização da Galáxia é $M_{\text{vir}}(1,37 \pm 0,30) \times 10^{12} M_{\odot}$. A densidade local de matéria escura adotada é de $0,40 \pm 0,04$ GeV cm⁻³ ([McMillan, 2017](#)). Apesar da Via Láctea apresentar uma barra triaxial no bojo, o modelo é assumido como axissimétrico, o que é uma boa aproximação, excetuando-se apenas para a região interna de poucos kiloparsecs do centro galáctico.

Concluída a descrição do modelo de potencial utilizado neste trabalho, definem-se a seguir os valores adotados para os parâmetros solares necessários à integração das órbitas, como a posição e o movimento do Sol. A posição do Sol foi fixada como $(X_{\odot}, Y_{\odot}, Z_{\odot}) = (-8.2, 0.0, 0.0)$ kpc, seguindo o estabelecido em [Bland-Hawthorn & Gerhard \(2016\)](#), e a velocidade circular local adotada foi $v_{\odot} = 232,8$ km s⁻¹, em conformidade com o modelo de [McMillan \(2017\)](#). O movimento peculiar do Sol em relação ao sistema local de repouso (LSR, do inglês, *local standard of rest*) foi assumido como $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.10, 12.24, 7.25)$ km s⁻¹, conforme os valores determinados por [Schönrich et al. \(2010\)](#).

3.5 Classificação cinemática das componentes galácticas

Além dos parâmetros cinemáticos obtidos, este trabalho busca classificar os objetos em relação aos seus componentes galácticos a partir da classificação cinemática destes. Isso porque, como discutido no Capítulo 1, as estrelas retêm, ainda que parcialmente, características cinemáticas relacionadas ao seu local de origem, de modo que é possível identificar uma população estelar com base na velocidade e na dispersão de velocidade semelhantes a um grupo de estrelas.

A classificação cinemática foi baseada nas probabilidades de pertencimento a determinado grupo, seguindo o critério de classificação do disco fino (D, do inglês *thin disk*), disco espesso (TD, do inglês *thick disk*), e halo (H) proposto por [Bensby et al. \(2003\)](#). A função de probabilidade segue uma distribuição gaussiana, dada por:

$$f(U, V, W) = k \cdot \exp \left(-\frac{U_{\text{LSR}}^2}{2\sigma_U^2} - \frac{(V_{\text{LSR}} - V_{\text{asym}})^2}{2\sigma_V^2} - \frac{W_{\text{LSR}}^2}{2\sigma_W^2} \right), \quad (3.6)$$

onde

$$k = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_U \sigma_V \sigma_W} \quad (3.7)$$

é uma constante cujo valor é determinado a partir da população estelar escolhida, de acordo com os valores disponibilizados na Tabela 3.1.

Os parâmetros U , V e W são correspondentes aos parâmetros de velocidade V_r , $-V_\phi$ e V_z , respectivamente, e V_{asym} é o movimento assimétrico. Sigma (σ) é a dispersão de velocidade. As probabilidades de pertencimento às componentes galácticas foram obtidas a partir das razões entre as populações estelares na vizinhança solar, dadas por:

$$\text{TD/D} = \frac{X_{\text{TD}}}{X_{\text{D}}} \cdot \frac{f_{\text{TD}}}{f_{\text{D}}}, \quad \text{TD/H} = \frac{X_{\text{TD}}}{X_{\text{H}}} \cdot \frac{f_{\text{TD}}}{f_{\text{H}}}, \quad (3.8)$$

em que X é a fração de estrelas observadas para uma determinada população estelar na vizinhança solar. Os valores adotados para cada componente, conforme indicados por [Perottoni et al. \(2021\)](#), a partir de correções dos valores de [Bensby et al. \(2003\)](#), estão listados na Tabela 3.1.

Incluimos ainda três novas colunas no catálogo desenvolvido neste trabalho, uma para a probabilidade cinemática de pertencimento ao disco fino (P_D_K), outra para a probabilidade cinemática de pertencimento ao disco espesso (P_TD_K), e a terceira para a probabilidade cinemática de pertencimento ao halo (P_H_K).

Tabela 3.1: Valores de velocidade elipsoidal para cada componente galáctica relativos às populações observadas na vizinhança solar. Reproduzido de Perottoni et al. (2021).

	X	σ_U	σ_V	σ_W	V_{asym}
Disco fino (D)	0.9301	30	20	18	-28
Disco espesso (TD)	0.0652	61	45	44	-63
Halo (H)	0.0047	160	119	110	-228

3.6 Criação das *flags*

O catálogo foi construído com base na inclusão de todos os objetos que apresentavam as grandezas necessárias para computar as órbitas, independentemente da qualidade ou precisão individual dos dados. Por este motivo, uma mesma estrela pode aparecer mais de uma vez no catálogo, tanto por estar presente em mais de um levantamento estelar utilizado, quanto por ter sido observada mais de uma vez por um mesmo levantamento. Ainda assim, para aqueles que desejam trabalhar apenas com as estimativas mais confiáveis, foram incluídas duas *flags*: uma identifica a melhor estimativa dos parâmetros orbitais no caso de múltiplas entradas para uma mesma fonte, e a outra assinala os registros que apresentam parâmetros de entrada mais precisos na integração das órbitas.

A *flag Unique* indica se aquela é a melhor medição obtida para um determinado objeto, seguindo uma hierarquia baseada na qualidade dos dados: Gaia, APOGEE, GALAH, Gaia-ESO, LAMOST MRS, RAVE, SEGUE, DESI e LAMOST LRS. Para objetos duplicados em um mesmo levantamento, será priorizado aquele de maior relação sinal-ruído. Se a observação for considerada a melhor, a *flag Unique* recebe como valor “YES”, se não, recebe “NO”. A Figura 3.4 ilustra como é feita essa classificação, considerando três diferentes cenários: a mesma estrela encontrada no Gaia e em outro levantamento, a mesma estrela encontrada mais de uma vez em um mesmo levantamento, e uma mesma estrela encontrada em dois levantamentos diferentes que não seja o Gaia. Também é atribuído “YES” para estrelas com apenas uma observação.

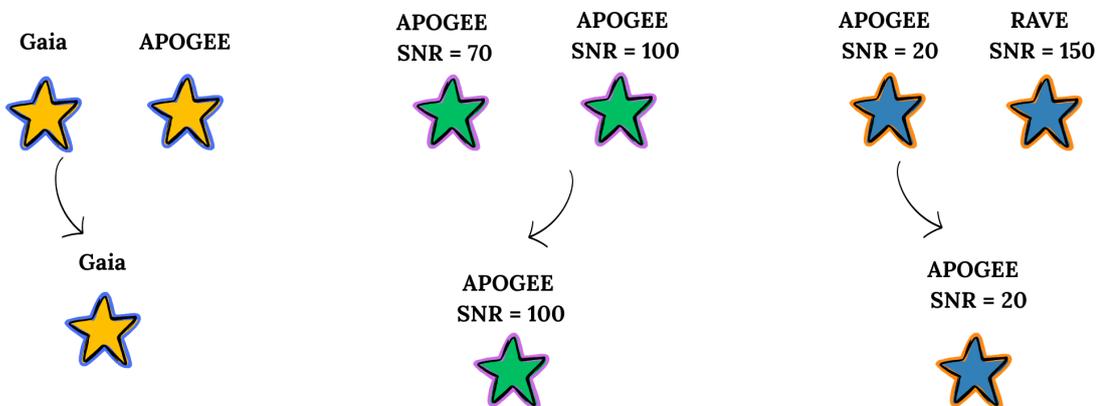


Figura 3.4: Representação esquemática do processo de seleção dos dados classificados como “YES” na *flag Unique*.

Para além da duplicidade de observações para uma mesma estrela, outra questão relevante diz respeito à qualidade das grandezas utilizadas como parâmetros de entrada no cálculo orbital com o AGAMA. A fim de fornecer ao usuário uma indicação dos parâmetros orbitais estimados a partir de entradas com qualidade minimamente assegurada, foi criada a *flag Golden_Sample*. Essa *flag* identifica as observações que atendem aos critérios de qualidade previamente adotados na normalização da velocidade radial (Seção 3.2), como limites em temperatura efetiva, razão sinal-ruído, flags específicas dos levantamentos e, no caso do Gaia, o critério ‘RUWE’ < 1.4 . Se a observação atender aos critérios de qualidade estabelecidos, a *flag Golden_Sample* recebe como valor “YES”, se não, recebe “NO”. O objetivo é oferecer uma amostra mais restrita e confiável para os usuários que desejarem trabalhar apenas com dados de melhor qualidade.

As *flags* podem ser usadas individualmente ou em conjunto, e a classificação “YES” (ou “NO”) em uma das *flags* não implica a mesma classificação na outra. Reforça-se que o uso das *flags* é opcional, e todos os dados são disponibilizados no catálogo final, independentemente de qual seja a indicação das *flags*. Desse modo, para além das *flags* que facilitam a seleção de subconjuntos específicos dentro do catálogo, o usuário tem acesso a toda a informação disponível, podendo selecionar, conforme os critérios científicos de seu estudo, os dados que considerar mais adequados.

3.7 Amostra final

Embora objetos com grandezas faltantes tenham sido removidos (Seção 3.1), ainda assim diversos objetos apresentaram, como saída do código AGAMA, o valor -1 para determinados parâmetros orbitais. Isso indica que uma ou mais colunas de entrada continham valores espúrios (como movimentos próprios excepcionalmente altos ou grandes erros na velocidade radial), impossibilitando o cálculo completo da órbita. No entanto, esses objetos foram mantidos no catálogo, uma vez que podem ser úteis para estudos que não dependam diretamente desses parâmetros afetados, como análises da distribuição espacial ou investigações sobre estrelas que estão desconectadas do potencial gravitacional da Galáxia (conhecidas como “estrelas fugitivas”, do inglês, *runaway stars*).

Por fim, todos os dados foram concentrados no catálogo final. Para cada objeto, foi mantido o nome do levantamento espectroscópico e o identificador (ID) original do levantamento, assegurando a fácil identificação e o cruzamento com os catálogos de origem. Isso permite que os usuários possam retornar informações adicionais que não foram incluídas no catálogo aqui desenvolvido. Também foi preservada a razão sinal-ruído proveniente do levantamento original; no caso do LAMOST LRS, a razão sinal-ruído na banda r ($\text{snr } r$) foi a escolhida para permanecer no catálogo. Adicionalmente, no GALAH, alguns objetos não possuíam valores de SNR; nesses casos, as entradas NaN (do inglês, *not a number*) foram substituídas por $\text{SNR} = 0$.

O catálogo completo contém um total de 47.114.843 fontes estelares. No próximo Capítulo serão expostos maiores detalhes sobre o catálogo final, além de serem apresentados resultados obtidos a partir do mesmo.

Este trabalho dedicou-se a produzir o maior catálogo de parâmetros orbitais até o momento. A partir dele, será possível obter informações estatisticamente robustas a respeito das populações estelares de diferentes regiões da Via Láctea, vista a grande quantidade de dados que será disponibilizada. Os diferentes levantamentos espectroscópicos utilizados possuem informações que se complementam e ajudam na busca por agrupamentos espaciais, cinemáticos e dinâmicos. Neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da construção do catálogo. Nele, serão discutidas as principais características do produto aqui construído e sua relevância. As aplicações científicas que podem ser feitas a partir do catálogo serão tratadas na Seção 5.1 do Capítulo 5.

4.1 O catálogo

Conforme apresentado no Capítulo 3 e mostrado na Tabela A.1, o catálogo apresentado neste trabalho foi construído com base nos dados de entrada e saída do código AGAMA, tendo a missão Gaia como balizadora para todo o desenvolvimento da pesquisa. Por este motivo, foram incorporados dados oriundos tanto do Gaia DR3 — a saber, a ascensão reta e a declinação, além dos valores de movimentos próprios e seus erros associados — quanto do catálogo de distâncias disponibilizado por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#), construído a partir do Gaia EDR3, com a distância fotogeométrica em relação ao Sol e seu erro associado. Dos levantamentos espectroscópicos, foram inseridos os valores de velocidade radial normalizada em relação ao Gaia (Seção 3.2) e seu erro associado. Além dos parâmetros de entrada e saída do AGAMA, também foram incorporadas ao catálogo as probabilidades cinemáticas de pertencimento a cada componente galáctica, além de duas *flags* indicativas. A *flag Unique* indica se aquela é a melhor medição obtida para um determinado objeto repetido, e a *flag Golden_Sample* indica medidas confiáveis de velocidade radial. Os nomes dos levantamentos e os IDs originais foram mantidos, além do SNR oriundo do levantamento de origem.

A Tabela 4.1 é uma prévia de como os dados estão organizados no catálogo final. Devido à limitação de espaço, o catálogo completo não será reproduzido nesta dissertação, mas será disponibilizado ao público em breve (conforme será detalhado no Capítulo 5).

Tabela 4.1: Prévia do catálogo desenvolvido neste trabalho.

DR3Name	RA	DEC	DIST	RV_NORM	PMRA	PMDEC	...
Gaia DR3 538028216707715712	1.03E-4	74.285408	3.269	-51.921	0.049	0.522	..
Gaia DR3 2413929812587459072	8.32E-4	-19.413851	0.888	18.885	20.29	-10.341	...
Gaia DR3 422596679964513792	0.001335	57.61953	0.761	-20.7345	-0.41	-3.227	...
Gaia DR3 422596679964513792	0.001335	57.61953	0.761	-20.624	-0.41	-3.227	...
Gaia DR3 4689447878791422208	0.001467	-73.394287	7.311	165.483	0.255	-1.269	...
Gaia DR3 421077597267551104	0.00285	57.173164	0.715	-12.863	5.792	-12.736	...
Gaia DR3 2772097619417608704	0.004322	15.430942	0.473	-12.2773	-3.243	-8.751	...
...

O catálogo completo contém um total de 47.114.843 fontes estelares. Entre elas, 701.195 pertencem ao APOGEE, 4.750.000 ao DESI, 33.581.727 pertencem ao Gaia, 110.358 ao Gaia-ESO, 898.323 ao GALAH, 5.258.856 ao LAMOST LRS, 987.221 ao LAMOST MRS, 509.012 ao RAVE e 318.151 ao SEGUE. Os objetos classificados como “YES” na coluna *Unique* somam 40.694.081, e 34.161.946 objetos foram classificados como “YES” na coluna *Golden_Sample*, indicando os parâmetros orbitais obtidos através de dados com maior confiabilidade. Cabe ressaltar que o número de objetos classificados como únicos possui um viés baseado na hierarquia adotada na construção do catálogo. Do total, 31.763.809 fontes são classificadas tanto como *Unique* = “YES” quanto como *Golden_Sample* = “YES”. A tabela 4.2 contém os números de objetos de cada levantamento estelar utilizado, além dos números finais do catálogo produzido.

Tabela 4.2: Número de objetos presentes no catálogo final, de acordo com cada levantamento espectroscópico.

Levantamento	Total de objetos (N)	Unique (N)	Golden Sample
APOGEE DR17	701.195	129.551	163.602
DESI DR1	4.750.000	4.126.268	2.021.701
Gaia RVS DR3	33.581.727	33.581.727	29.779.889
Gaia-ESO DR5	110.358	89.946	36.147
GALAH DR4	898.323	61.602	516.148
LAMOST LRS DR10	5.258.856	2.348.694	673.234
LAMOST MRS DR10	987.221	67.187	608.805
RAVE DR6	509.012	9.082	216.783
SEGUE DR12	318.151	280.024	145.637
Total	47.114.843	40.694.081	34.161.946

Como parte do processo de obtenção de dados do *pipeline* utilizado no Gaia RVS, apenas uma observação de cada estrela é mantida no lançamento de dados (Gaia Collaboration et al., 2021). Aliado à priorização da hierarquia adotada para fontes do Gaia, todas as estrelas deste levantamento foram consideradas objetos únicos. O GALAH observa principalmente estrelas do disco, mesma região do APOGEE, o que justifica a redução acentuada (93%) no número de objetos classificados como únicos. A redução significativa de estrelas do RAVE (aproximadamente 98%), por sua vez, é provavelmente causada por sua cobertura espectral ser focada no tripleto de cálcio, mesma faixa em que o Gaia opera. Já o SEGUE, por ser um dos poucos levantamentos com foco prioritário em estrelas do halo, manteve grande parte de seus objetos (88%) como fontes únicas.

4.2 Parâmetros orbitais dos levantamentos espectroscópicos

Os diferentes levantamentos espectroscópicos focam em diferentes populações estelares, conforme foi apresentado no Capítulo 2. Por este motivo, primeiramente serão apresentadas as características orbitais de cada levantamento, de modo que se possa entender a contribuição de cada um na construção deste catálogo.

A distribuição espacial dos objetos é apresentada em coordenadas cartesianas galactocêntricas, o que permite visualizar as regiões da Galáxia amostradas por cada levantamento espectroscópico e compreender as suas limitações espaciais. Com esse objetivo, a Figura 4.1 exhibe a distribuição dos objetos nos planos XZ (painel à esquerda) e XY (painel à direita), sendo cada linha correspondente a um levantamento distinto. As distribuições vistas nos diferentes painéis têm relação com as especificidades de cada levantamento descritas no Capítulo 2.

Para levantamentos de maior abrangência espacial, como é o caso do DESI e do próprio Gaia RVS, todas as componentes galácticas estão bem representadas nos gráficos XYZ, inclusive as regiões bem acima do plano galáctico, com altos valores em Z. O Gaia, por não focar em alvos específicos, amostra de forma mais uniforme diferentes regiões do céu, sendo principalmente limitado pela profundidade do levantamento e pelas características do instrumento. Já o DESI, ao observar fontes mais tênues, alcança maiores distâncias e cobre preferencialmente o halo interno. Quanto ao SEGUE, suas regiões de observação apresentam uma distribuição mais fragmentada e profunda, lembrando filamentos, reflexo da seleção de alvos mais distantes em campos específicos do céu. Levantamentos como Gaia-ESO, GALAH e RAVE, por sua vez, apresentam distribuições mais concentradas no plano galáctico, com valores de Z tipicamente menores, embora evitem a região central do bojo. Ainda assim, também exibem estruturas que lembram filamentos, também resultado de suas estratégias de seleção nos campos observados. O APOGEE, por sua vez, inclui observações que cobrem parcialmente a região do bojo e se estendem também em direção ao anticentro galáctico. Por fim, tanto o LAMOST LRS quanto o LAMOST MRS apresentam distribuições espaciais amplas ao longo do eixo x, evidenciando a presença de estrelas do disco espesso, sendo que o LAMOST LRS mostra maior concentração de objetos acima do plano galáctico.

Como supramencionado, os filamentos observados são, em parte, consequência da seleção dos levantamentos, que priorizam a observação de objetos mais tênues em campos específicos do céu. Além disso, as estimativas de distância utilizadas são fotogeométricas, ou seja, combinam informação astrométrica com fotometria — esta última sensível à extinção interestelar. Soma-se a isso o fato de que objetos mais distantes apresentam, em geral, maiores incertezas nas estimativas da paralaxe. Como resultado, para estruturas como a LMC e a SMC, não foram observados todos os objetos concentrados na distância da estrutura, mas sim dis-

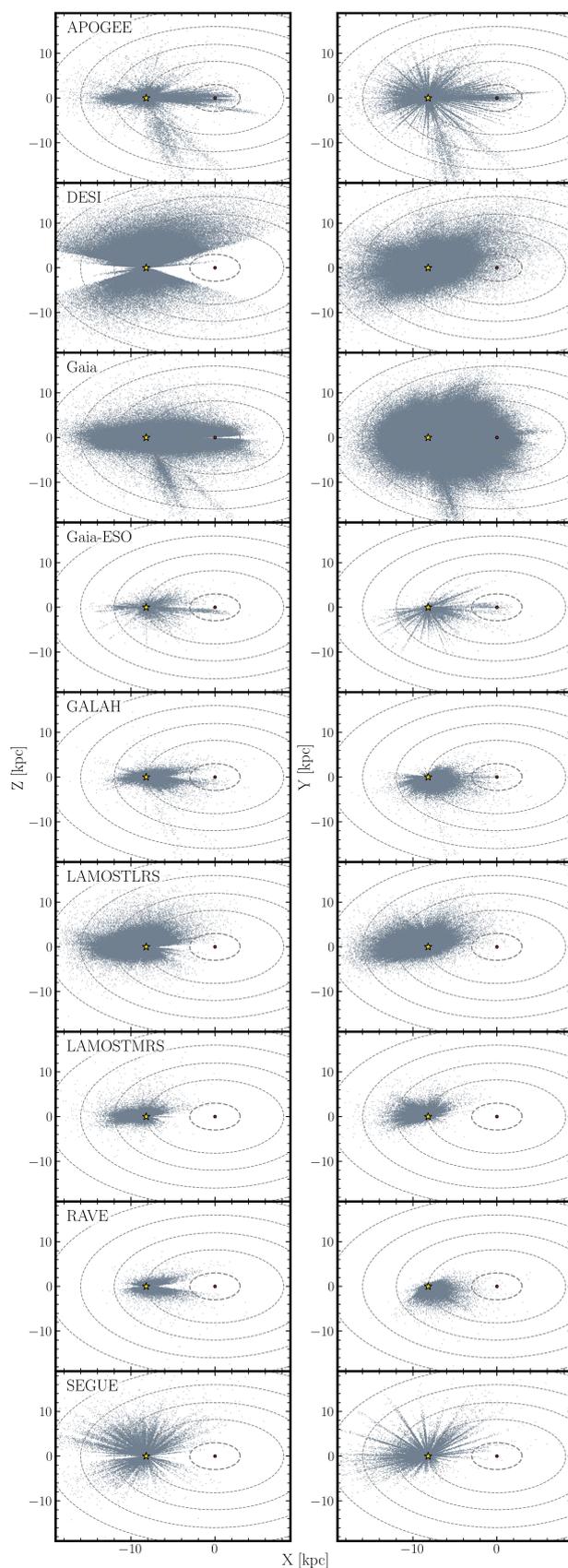


Figura 4.1: Distribuição espacial XZ (à esquerda) e XY (à direita) para as estrelas de cada levantamento espectroscópico utilizado na construção do catálogo, um levantamento por linha, em coordenadas galactocêntricas. A estrela amarela em $(-8.2, 0.0, 0.0)$ indica a posição do Sol, e o ponto $(0, 0, 0)$ é a posição do centro da Galáxia.

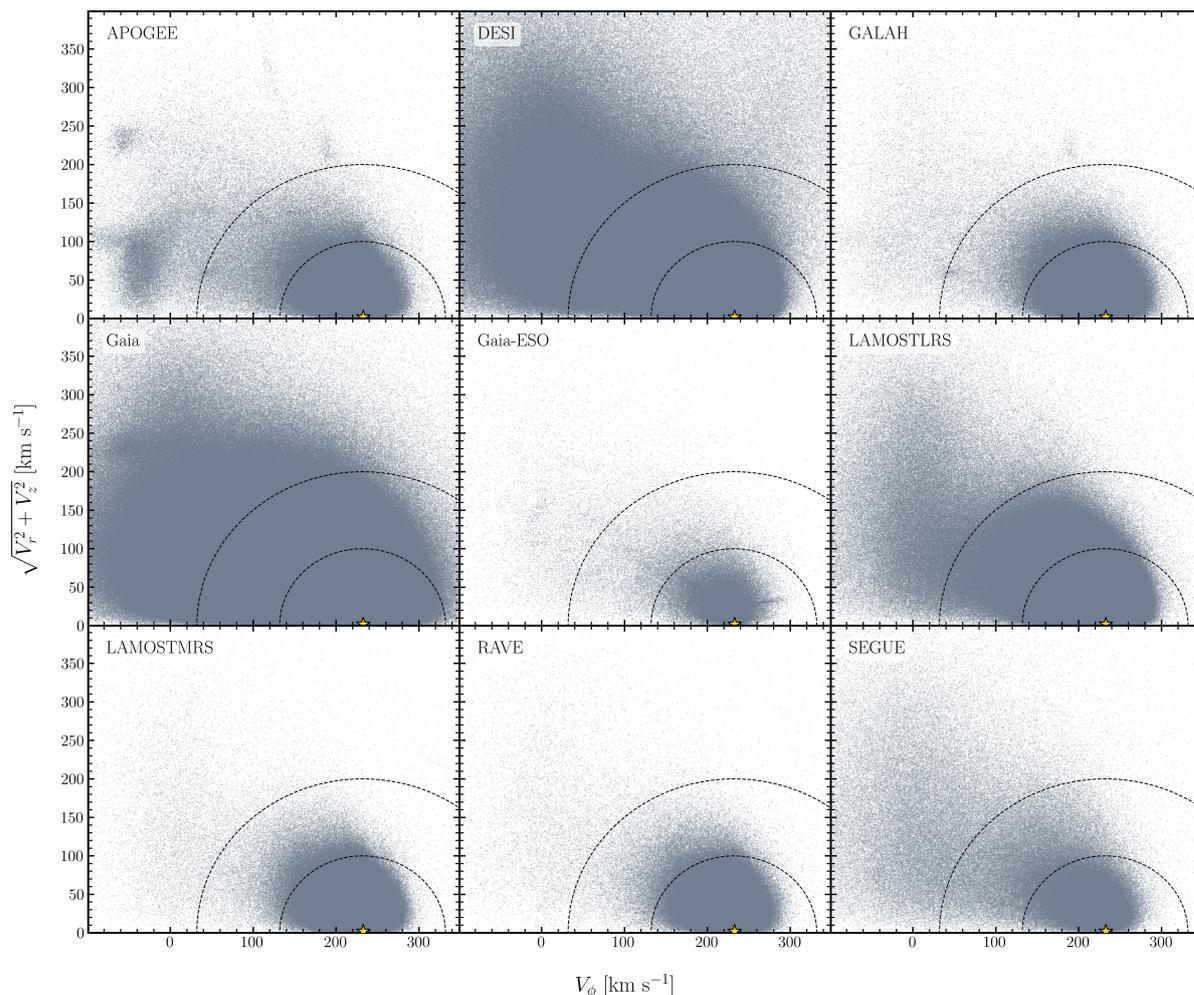


Figura 4.2: Diagrama de Toomre para estrelas de cada levantamento espectroscópico utilizado no catálogo. O ponto amarelo em formato de estrela marca a posição cinemática do Sol.

tribuídos ao longo da linha de visada. Muitos desses objetos externos à Via Láctea possuem estimativas de distância imprecisas, que os posicionam artificialmente mais próximos, contribuindo para a aparência filamentar. Dessa forma, é importante distinguir dois efeitos principais: um relacionado a estratégia observacional dos levantamentos, e outro associado às incertezas nas medições.

A partir das distribuições no espaço de velocidades, é possível distinguir diferentes populações estelares de formas que não seriam possíveis apenas por meio de projeções espaciais. A Figura 4.2 apresenta o Diagrama de Toomre, uma maneira de visualizar a cinemática das componentes galácticas (disco fino, disco espesso e halo) a partir da distribuição de velocidades. Valores próximos de $(232, 0)$ indicam a região do disco fino, em que as estrelas rotacionam de maneira prógrada. Valores menores em velocidade radial e velocidade vertical, com maior dispersão de velocidade azimutal, caracterizam as estrelas pertencentes ao disco espesso, enquanto valores ainda mais significativos de V_ϕ negativos ($< -200 \text{ km s}^{-1}$) e altas dispersões de velocidade radial são indicadores de órbitas retrógradas, observadas na região do halo galác-

tico. É possível perceber, pela Figura 4.2, que DESI e Gaia apresentam grande dispersão em velocidade, o que sugere a presença de objetos pertencentes a diferentes componentes galácticas. Essa dispersão, no entanto, pode também refletir limitações na acurácia das medidas de velocidade, especialmente em regiões mais distantes ou para estrelas mais tênues. Levantamentos como APOGEE, Gaia-ESO e GALAH mostram claramente a presença de sobredensidades no espaço de velocidades, indicando que estão associadas a aglomerados globulares e correntes estelares.

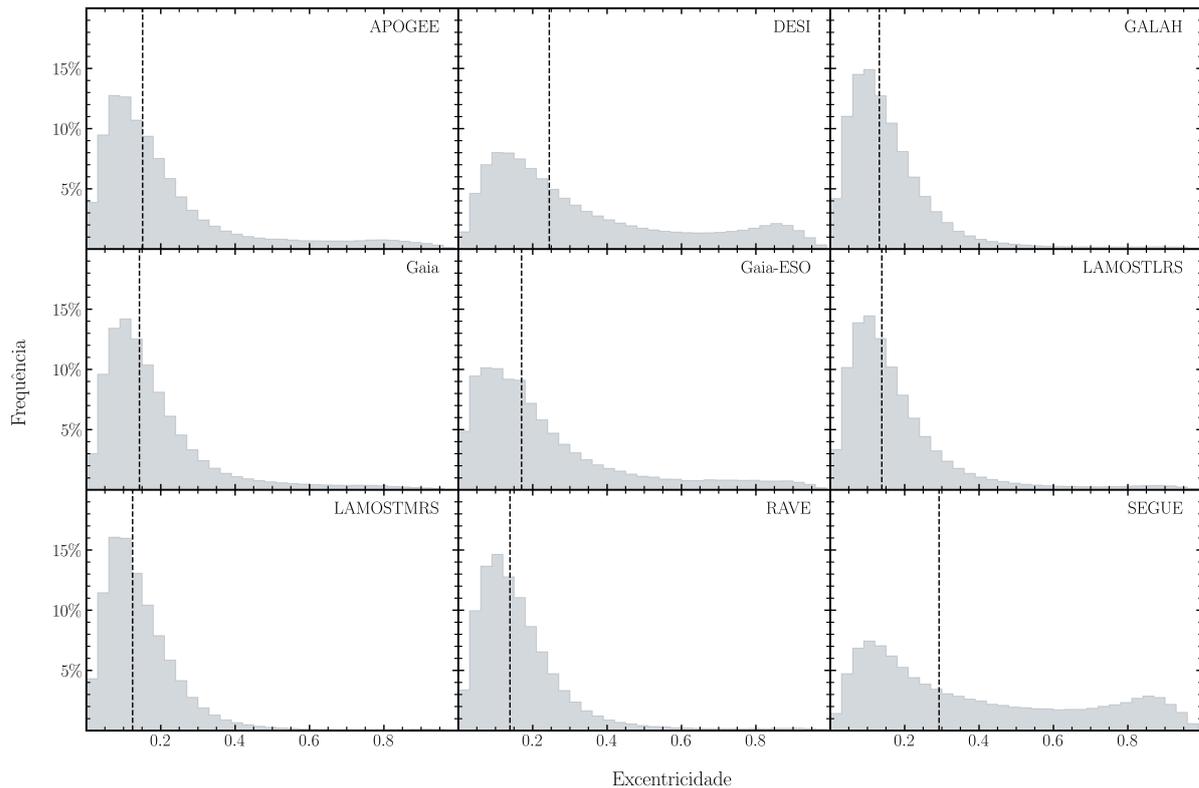


Figura 4.3: Distribuição da excentricidade dos levantamentos espectroscópicos. Para melhor visualização, os histogramas foram normalizados com relação à porcentagem de objetos interna de cada levantamento. A linha tracejada preta indica a mediana da excentricidade para cada levantamento.

Um outro parâmetro relevante para a caracterização da órbita estelar é a excentricidade. Embora não esteja diretamente relacionada à energia orbital, a excentricidade fornece indícios sobre a característica da órbita e, em conjunto com outros parâmetros dinâmicos e químicos, pode auxiliar na identificação da componente galáctica à qual a estrela pertence. Além disso, a excentricidade pode dar pistas da história evolutiva da estrela, por exemplo, valores elevados de excentricidade podem ser interpretados como possíveis assinaturas de processos de aquecimento orbital ou de origens extragalácticas, como eventos de acreção. Além disso, a partir dos valores de excentricidade, também é possível entender a excursão da estrela em sua órbita no plano galáctico. A Figura 4.3 mostra a distribuição da excentricidade das estrelas de cada levantamento espectroscópico, um em cada painel, em função da frequência de estrelas em porcentagem de cada levantamento. Nela é possível perceber que a grande maioria dos levantamentos adotados possui estrelas com baixo valor de excentricidade, sendo a mediana de

$e \sim 0,152$ para o APOGEE, $e \sim 0,132$ para o GALAH, $e \sim 0,143$ para o Gaia, $e \sim 0,170$ para o Gaia-ESO, $e \sim 0,139$ para o LAMOST LRS, $e \sim 0,124$ para o LAMOST MRS e $e \sim 0,139$ para o RAVE, indicando órbitas aproximadamente circulares e, portanto, associadas ao disco. Entretanto, os histogramas de excentricidade para DESI e SEGUE demonstram um padrão diferente dos demais levantamentos, em que ocorre maior distribuição de excentricidade para as estrelas presentes nestes levantamentos, sendo a mediana da excentricidade $e \sim 0,245$ para o DESI e $e \sim 0,292$ para o SEGUE, com um leve pico em $e \sim 0,853$, indicando a presença de estrelas com órbitas aquecidas, característica das estrelas do halo, mais especificamente associadas ao GSE (Helmi et al., 2018; Feuillet et al., 2020).

Embora a partir do espaço de fase já seja possível obter diversas informações sobre as estrelas pertencentes à Via Láctea, a combinação com os espaços dinâmicos e de ações permite identificar populações dispersas espacialmente, mas com padrões cinemáticos compartilhados. A Figura 4.4 apresenta as distribuições cinemáticas e dinâmicas das estrelas observadas pelos levantamentos espectroscópicos e, mais uma vez, cada linha corresponde a um levantamento, sendo diagramas de velocidade, V_r vs V_ϕ (painel à esquerda), ação-energia, E vs L_Z (painel central), e diagramas L_Z vs e (painel à direita), todos em coordenadas galactocêntricas.

O painel V_r vs V_ϕ possui interpretação semelhante à do Diagrama de Toomre da Figura 4.2, sendo, porém, mais evidente a concentração de estrelas do Gaia-ESO, LAMOST MRS e RAVE na região do disco fino. Além disso, a partir desse painel é possível identificar sobredensidades no Gaia que não eram perceptíveis no Diagrama de Toomre, mostrando a natureza complementar de se analisar essas grandezas em diferentes espaços dinâmicos.

O painel central, E vs L_Z , também conhecido como diagrama ação-energia (devido à equivalência entre a ação J_ϕ e o momento angular L_Z , conforme demonstrado na Seção 1.3), é uma forma de visualizar o quão ligadas ao potencial galáctico as estrelas estão, identificando as diferentes componentes da Galáxia. Estrelas do disco ocupam regiões de alto momento angular vertical e variam em valores de energia, enquanto estrelas pertencentes ao halo apresentam distribuições dispersas, com valores baixos de momento angular vertical. Valores de $L_Z < 0$ indicam estrelas com órbitas retrógradas. Estrelas de mais baixa energia com alto momento angular estão associadas ao disco externo, e seu nível mais baixo de energia ajuda a explicar porque essas regiões externas são mais sensíveis à passagem de Sagittarius (Purcell et al., 2011; Laporte et al., 2018) e a formação de sobredensidades no disco (Rocha-Pinto et al., 2004; Borbolato et al., 2023).

É possível perceber que GALAH, Gaia-ESO, LAMOST MRS e RAVE possuem estrelas com dinâmica predominantemente do disco fino, com baixa dispersão nas variáveis dinâmicas. Já DESI, Gaia, LAMOST LRS e SEGUE apresentam maiores dispersões de energia e de momento angular, evidenciando populações com dinâmica relacionada ao halo. O APOGEE apresenta, mais uma vez, regiões de sobredensidade, indicando que as estrelas presentes nessa

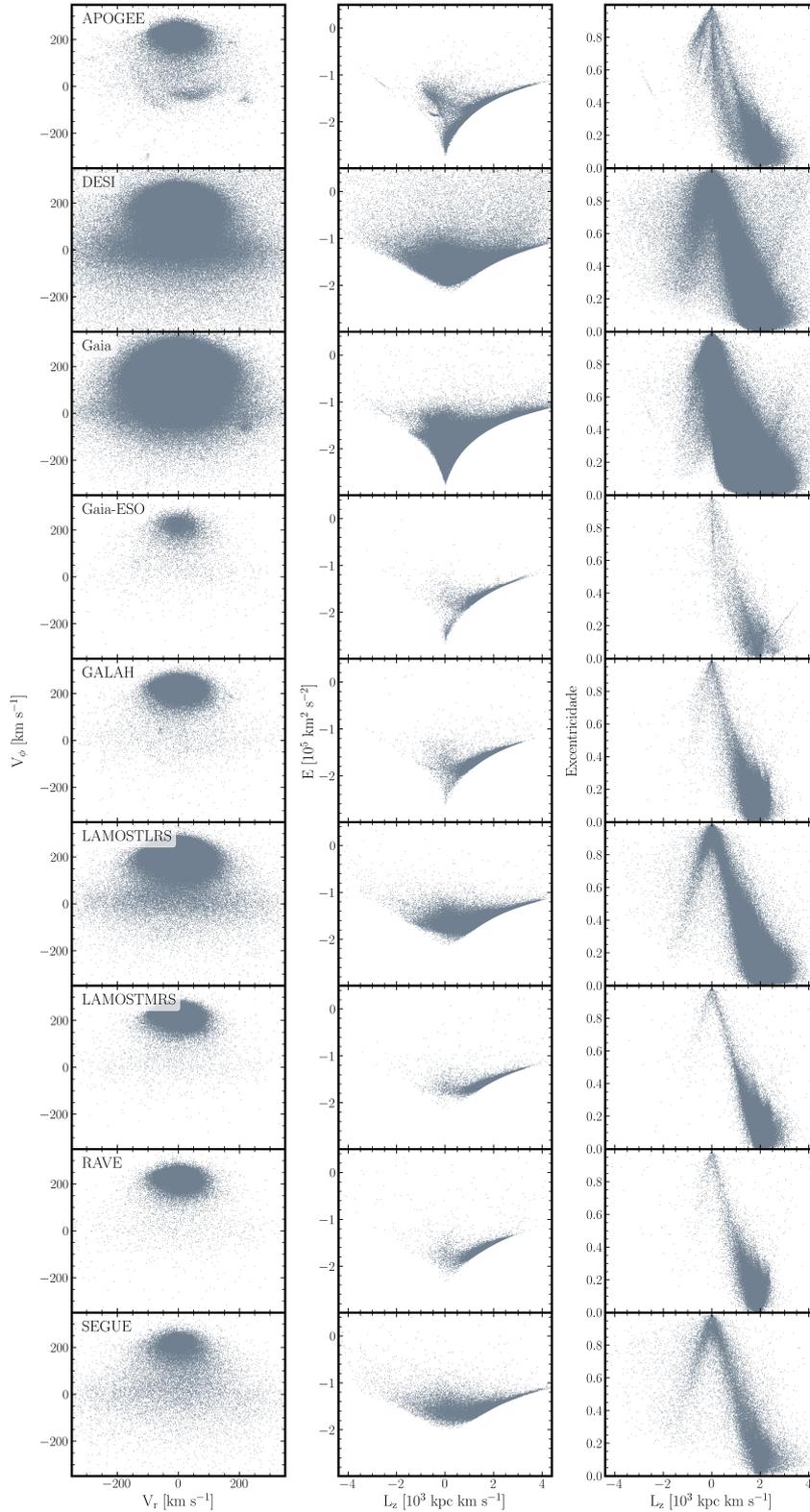


Figura 4.4: Parâmetros orbitais de cada levantamento espectroscópico utilizado na construção do catálogo, em coordenadas galactocêntricas, sendo V_r vs V_ϕ (painel à esquerda), ação-energia, E vs L_Z (painel central), e diagramas L_Z vs e (painel à direita), cada linha indicando um levantamento.

região podem estar compartilhando a dinâmica de diferentes subestruturas e correntes estelares.

Por fim, o painel L_Z vs e mostra o comportamento das estrelas pertencentes aos levanta-

mentos espectroscópicos de acordo com sua distribuição de excentricidade e momento angular vertical. As estrelas do disco fino tendem a se concentrar em baixas excentricidades e altos valores de L_Z , indicando órbitas aproximadamente circulares e prógradas ao redor do disco da Galáxia. Estrelas do disco espesso exibem uma distribuição mais ampla em excentricidade e em L_Z , enquanto estrelas do halo possuem valores mais altos de excentricidade e valores negativos de momento angular vertical, o que indica órbitas retrógradas. É possível, então, perceber que Gaia-ESO, GALAH, LAMOST MRS e RAVE possuem órbitas majoritariamente prógradas, com maior concentração de objetos com baixa excentricidade e momentos angulares mais altos, evidenciando populações estelares pertencentes aos discos, especialmente ao disco fino. Já DESI, LAMOST LRS e SEGUE apresentam características significativas para estrelas do halo galáctico. APOGEE e Gaia possuem grande dispersão de objetos, indicando ampla presença de estrelas em todas as componentes da Via Láctea.

Num primeiro momento, a ausência de estrelas com alto momento angular retrógrado ($L_Z < 0$) e baixa excentricidade nos diagramas L_Z vs e poderia indicar que não se formaram populações com movimento retrógrado em órbitas circulares no disco da Galáxia. No entanto, estrelas que eventualmente se formaram com movimento retrógrado, possivelmente associadas às fases mais primitivas da proto-Galáxia, foram ao longo do tempo aquecidas dinamicamente por interações seculares ou processos de acreção, adquirindo órbitas mais excêntricas e dispersas. Como resultado, a região de baixos valores de excentricidade e momento angular retrógrado permanece praticamente desocupada, sendo que as populações atualmente observadas com $L_Z < 0$ e altas excentricidades são em grande parte associadas a eventos de acreção externa, como Gaia-Enceladus e Sequoia, ou ao halo *in situ* aquecido.

De modo geral, a utilização de diferentes levantamentos contribui para uma maior completeza do catálogo construído neste trabalho, ao reunir amostras com coberturas espaciais distintas e complementares. Essa abordagem permite o estudo de diversas regiões da Galáxia sob diferentes perspectivas observacionais. A partir das análises individuais de cada levantamento, é possível antecipar o comportamento geral esperado com o catálogo completo aqui desenvolvido.

4.3 Parâmetros orbitais do catálogo desenvolvido neste trabalho

Nesta Seção, serão feitas análises semelhantes às feitas na Seção anterior, porém, considerando a todos os levantamentos simultaneamente. Devido às limitações computacionais, as figuras apresentadas a seguir baseiam-se em uma amostra representativa de 30% do catálogo final, selecionada de maneira randômica, mantendo, contudo, as principais características que seriam observadas com a amostra completa. Além disso, serão feitas análises relativas às classi-

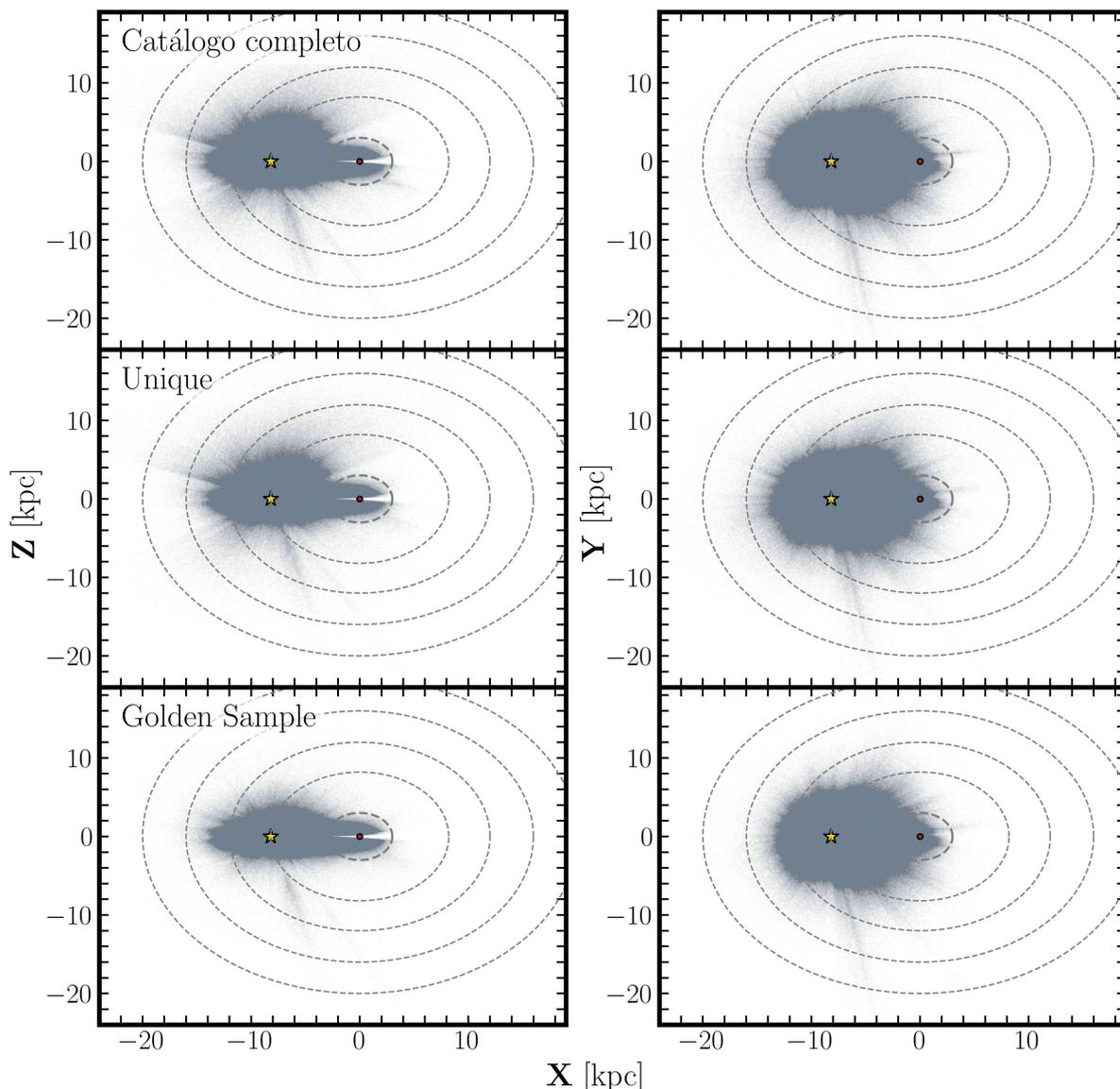


Figura 4.5: Distribuições espaciais para as três amostras do catálogo: Completo (painel superior), *Unique* (painel central) e *Golden Sample* (painel inferior). O ponto em formato de estrela amarela na posição (8,2, 0, 0) marca a posição do Sol com relação ao centro da Via Láctea, dado pelo ponto na posição (0, 0, 0).

ficações de objetos únicos e de objetos de maior confiabilidade, e também análises com relação à probabilidade de pertencimento a cada componente galáctica.

A Figura 4.5 mostra a distribuição espacial de toda a amostra (painel superior), amostra de objetos únicos (painel central) e a amostra de objetos de maior confiabilidade nos parâmetros utilizados para computar as órbitas (painel inferior). É possível notar a presença de estruturas que se assemelham à filamentos, sendo os filamentos mais pronunciados entre $-6 \text{ kpc} < X < 2 \text{ kpc}$, $-30 \text{ kpc} < Y < -4 \text{ kpc}$ e $0 < Z < -15 \text{ kpc}$. Além disso, é possível perceber, no painel inferior da Figura 4.5, que essas estruturas são atenuadas ou desaparecem em alguns casos, visto que essa amostra filtra objetos com observações de menor qualidade — incluindo casos de baixo SNR, altas incertezas nas velocidades radiais, ou parâmetros atmosféricos pouco confiáveis

(como temperaturas efetivas em que a determinação das velocidades radiais a partir das linhas espectrais se torna imprecisa, por exemplo abaixo de 3000 K) ou acima de 8000 K). Esses critérios removem principalmente estrelas distantes e tênues, reduzindo sua presença na amostra *Golden_Sample*.

Os dois principais filamentos que podem ser observados nos gráficos XYZ são relativos à Grande Nuvem de Magalhães (LMC, do inglês, *Large Magellanic Cloud*) e à Pequena Nuvem de Magalhães (SMC, do inglês, *Small Magellanic Cloud*), ambas galáxias satélites da Via Láctea. Embora essas não sejam as únicas estruturas presentes, são as mais proeminentes nas projeções espaciais.

Embora o catálogo desenvolvido tenha como foco a obtenção dos parâmetros orbitais de estrelas ligadas ao potencial da Via Láctea, ele também inclui fontes estelares associadas a galáxias satélites e aglomerados globulares, devido à presença dessas estrelas nos levantamentos que serviram de base para a construção do catálogo e à opção de manter todos os objetos, sem aplicação de filtros prévios. No entanto, será implementada uma *flag* para identificar objetos associados a galáxias satélites coesas (isto é, ainda não dissolvidas pela maré galáctica) e a aglomerados globulares. De todo modo, o número de objetos dessas estruturas é reduzido; por exemplo, no caso da LMC e da SMC, eles representam $\sim 0,09\%$ da amostra final do catálogo (42.390 objetos).

Já a Figura 4.6, apresenta os espaços cinemático e dinâmico do catálogo desenvolvido aqui, sendo os painéis superiores referentes ao catálogo completo, os painéis centrais referentes às estrelas com a *flag Unique* = “YES”, e os painéis inferiores se referem às estrelas com a *flag Golden_Sample* = “YES”. Os painéis à esquerda apresentam o espaço de velocidade, V_r vs V_ϕ , os painéis centrais apresentam o diagrama ação-energia (L_Z vs E), e os painéis à direita mostram L_Z vs e . Observa-se grande dispersão em todos os parâmetros do catálogo construído, sendo notada uma redução no número de estrelas associadas ao halo ao adotar a *flag Golden_Sample*. Também é possível perceber que, ao utilizar a amostra com maior confiabilidade, pequenas regiões de sobredensidade estelar tornam-se mais evidentes. A partir da comparação entre a Figura 1.5 e o painel central da Figura 4.6, infere-se a presença de diferentes populações estelares vinculadas a possíveis eventos de acreção, que podem ser melhor investigadas com este catálogo, devido ao maior número de objetos resultante da combinação dos diversos levantamentos espectroscópicos.

As duas próximas figuras, além de apresentarem diferenças associadas ao uso das *flags*, mostram também a influência da probabilidade de pertencimento cinemático nos parâmetros orbitais obtidos. Para fins de visualização, na Figura 4.7, uma estrela é considerada pertencente a uma determinada componente galáctica caso sua probabilidade de pertencimento a essa componente seja maior que 80%.

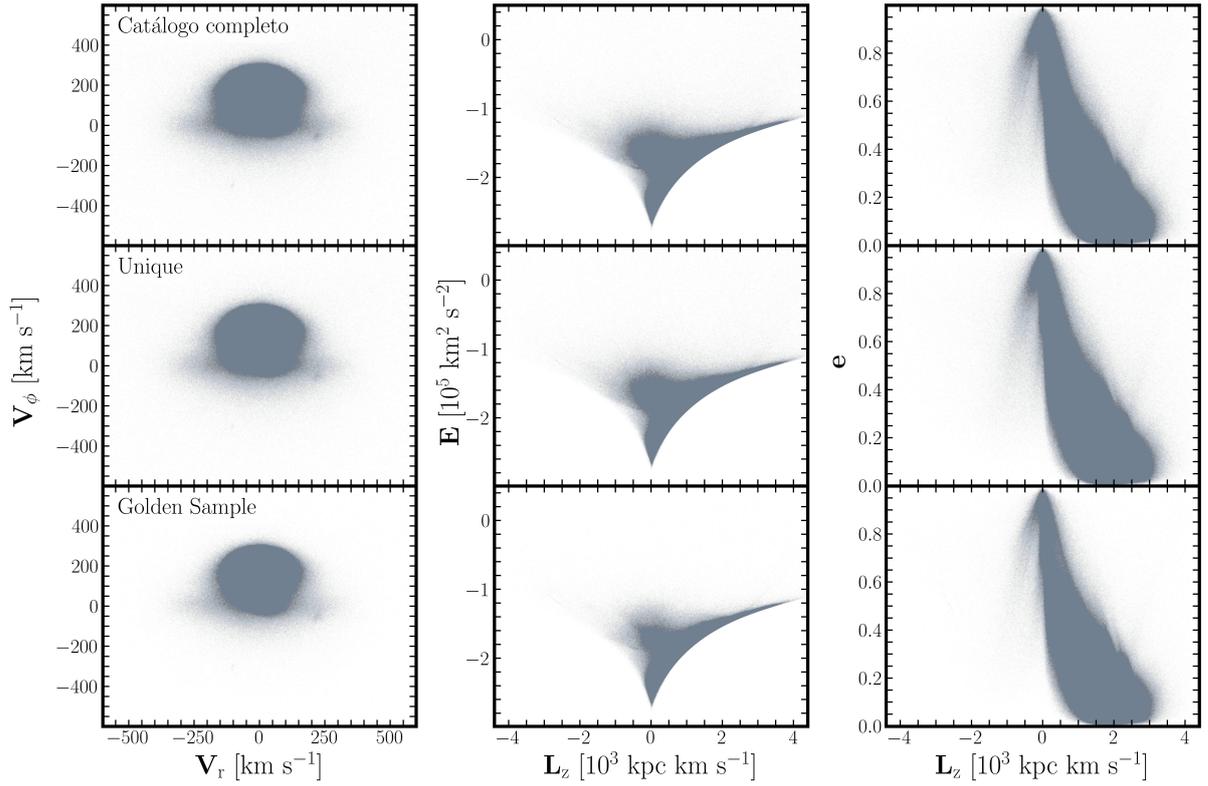


Figura 4.6: Parâmetros orbitais para as estrelas do catálogo, V_r vs V_ϕ (painel à esquerda), L_z vs E (painel central) e L_z vs e (painel à direita), os painéis superiores se referem ao catálogo completo, os painéis centrais se referem aos objetos com a *flag Unique* = “YES”, e os painéis inferiores se referem às estrelas com a *flag Golden_Sample* = “YES”.

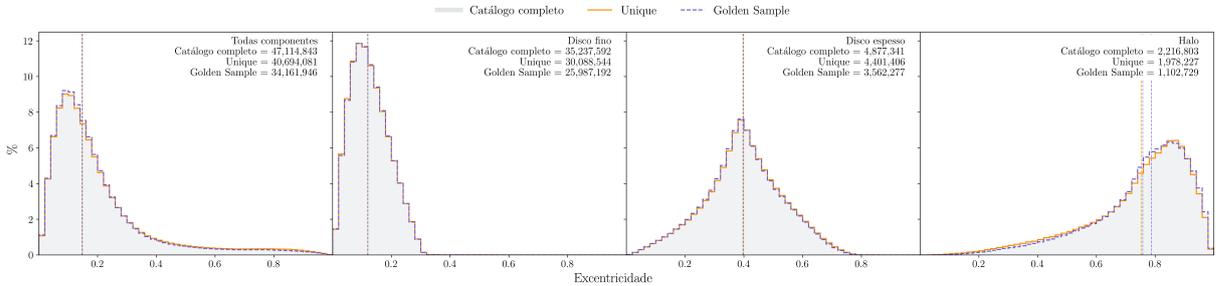


Figura 4.7: Distribuição de excentricidade para as estrelas do catálogo, separadas também pela probabilidade cinemática de pertencimento às diferentes regiões da Galáxia. A linha sólida amarela indica a distribuição das estrelas classificadas como *Unique* e a linha tracejada roxa indica a distribuição das estrelas classificadas como *Golden_Sample*, sendo as linhas verticais a mediana de cada distribuição.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição de excentricidade do catálogo, separada por diferentes componentes galácticos, em que a linha tracejada indica a mediana do catálogo completo, dos objetos selecionados usando a *flag Unique* e dos objetos selecionados utilizando a *flag Golden_Sample*. De acordo a metodologia adotada, considerando todas as componentes, as estrelas possuem excentricidade mediana de $e \sim 0,149$, as estrelas do disco fino possuem mediana da excentricidade de $\sim 0,119$, para o disco espesso a excentricidade mediana ocorre em $e \sim 0,399$ para o catálogo completo e *Unique*, e $e \sim 0,396$, e para o halo, a excentricidade mediana ocorre em $e \sim 0,758$ considerando o catálogo completo, em $e \sim 0,752$ considerando a *flag Unique* e

em $e \sim 0,787$ considerando a *flag Golden_Sample*. Observa-se que as estrelas associadas ao disco fino possuem baixa excentricidade, indicando que essas estão mais fortemente vinculadas ao potencial da Via Láctea e não sofreram processos significativos de aquecimento orbital. As estrelas do disco espesso apresentam excentricidade moderada, cuja distribuição não segue um perfil gaussiano e, ao considerar a probabilidade de pertencimento ao disco espesso acima 95%, o valor da mediana de excentricidade se desloca ligeiramente para $e \sim 0,418$, sugerindo que suas órbitas passaram por algum tipo de aquecimento e também demonstrando a dificuldade em caracterizar essa região de transição. Já as estrelas do halo exibem alta excentricidade, demonstrando ligação mais fraca ao potencial galáctico, o que pode indicar que sofreram processos de aquecimento, como interações com diversas estruturas formadoras da proto-Galáxia. A distribuição de excentricidade das estrelas do halo exibe uma cauda estendida para baixos valores, característica que remete aos perfis associados ao remanescente do evento de acreção do GSE (Amarante et al., 2022). Estima-se que aproximadamente 40% das estrelas do halo local (até ~ 2 kpc) estejam associadas ao GSE, proporção que pode atingir cerca de 60% em regiões mais externas do halo, a distâncias superiores a 15 kpc (Naidu et al., 2020).

Essa análise evidencia a predominância de estrelas do disco fino neste catálogo, que são as que mais contribuem para a distribuição global. Nota-se também uma redução mais acentuada no número de objetos do halo: enquanto a amostra *Golden_Sample* corresponde a aproximadamente 73% da amostra total para os objetos do disco fino e do disco espesso, para o halo apenas 49% dos objetos foram classificados como de maior confiabilidade.

Na Figura 4.8 é apresentado o Diagrama de Toomre para o catálogo desenvolvido neste trabalho, considerando as *flags Unique* e *Golden_Sample*. As amostras também são separadas pela probabilidade de pertencimento às diferentes componentes galácticas, o que auxilia na compreensão da influência do ambiente nos parâmetros orbitais das estrelas.

A partir dessa figura, observa-se que as estrelas com cinemática típica do disco fino se concentram em uma região específica de velocidade, enquanto aquelas classificadas cinematicamente como halo apresentam maior dispersão. Além disso, as regiões relativas às diferentes populações são bem delimitadas em todas as amostras, sendo a única mudança significativa para a amostra *Golden_Sample*, na qual o número de estrelas associadas ao halo diminui. É importante notar que, no Diagrama de Toomre, há regiões de sobreposição entre diferentes populações estelares, o que dificulta a identificação inequívoca da origem de uma estrela com base apenas nessa metodologia. Isso é especialmente evidente na região de transição entre o halo e o disco espesso, onde coexistem tanto uma população *in situ*, possivelmente associada a um disco aquecido — o chamado *splash disk* (Belokurov et al., 2020) — quanto remanescentes de eventos de acreção, como o próprio GSE. Essa sobreposição ressalta a necessidade de análises complementares, que considerem não apenas as propriedades cinemáticas, mas também as abundâncias químicas e parâmetros orbitais, para uma caracterização mais robusta das

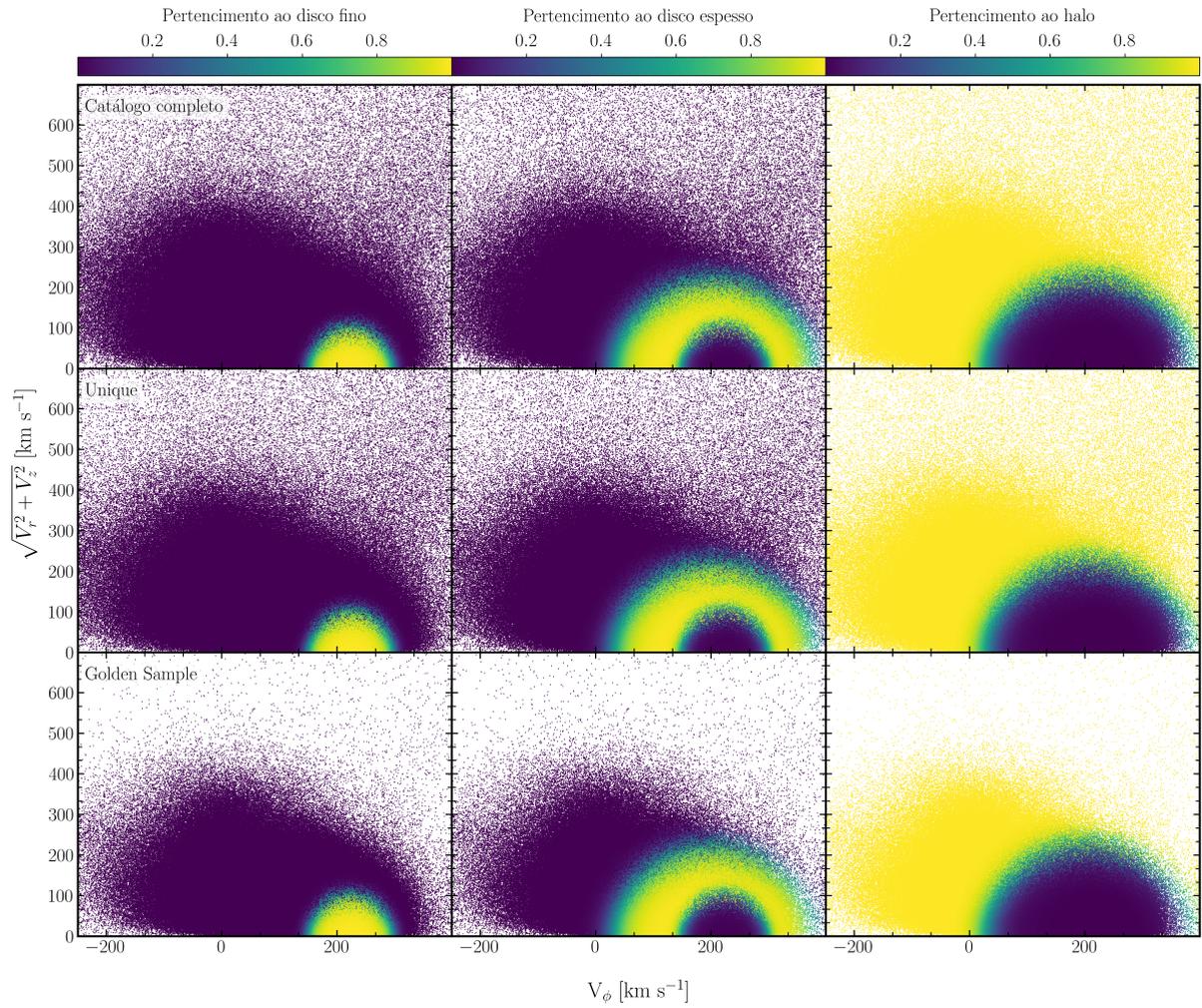


Figura 4.8: Diagrama de Toomre para estrelas do catálogo, de acordo com a probabilidade de pertencimento ao disco fino (painel à esquerda), disco espesso (painel ao meio) e halo (painel à direita). Os painéis superiores representam as estrelas do catálogo completo, os painéis centrais indicam as estrelas classificadas como *Unique* e os painéis inferiores indicam as estrelas classificadas como *Golden_Sample*.

populações estelares.

Neste trabalho descrevemos o processo de construção do maior catálogo de parâmetros orbitais desenvolvidos até o momento. Neste Capítulo, resumiremos os principais pontos da elaboração do catálogo, os resultados obtidos até então e as perspectivas futuras de melhoria do catálogo e suas possíveis aplicações.

Inicialmente, selecionamos oito diferentes levantamentos espectroscópicos para a obtenção dos dados observacionais em todas as regiões da Galáxia. Esses levantamentos foram, então, cruzados com o levantamento astrométrico do Gaia DR3 e com o catálogo de distância de [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#). Após o cruzamento, o valor da velocidade radial das estrelas dos levantamentos foi normalizado em relação ao Gaia. Em seguida, removemos aqueles objetos que apresentavam valores nulos nas colunas de ascensão reta, declinação, movimento próprio, velocidade radial, distância e suas incertezas associadas. Também foram removidos objetos com valores não físicos nos parâmetros de entrada (como por exemplo, -9999 no SEGUE), o que poderia levar a obtenção de parâmetros orbitais incorretos. Essa foi a única limpeza feita na construção do catálogo, de modo que todos os demais objetos foram preservados, permitindo que o usuário escolha seus próprios critérios de limpeza.

Posteriormente, as estrelas tiveram suas órbitas integradas utilizando o código AGAMA, de onde foram obtidos os parâmetros orbitais relativos à posição, velocidade, momento angular, energia, excentricidade e inclinação da órbita, bem como suas ações, com seus respectivos percentis 16 e 84, os quais descrevem as respectivas incertezas nos parâmetros. A partir dos parâmetros orbitais, foi obtida a probabilidade cinemática de pertencimento de cada estrela às componentes galácticas do disco fino, disco espesso e halo.

Foram também criadas duas *flags* indicativas da qualidade dos dados, *Unique* e *Golden_Sample*. A *flag Unique* está relacionada a fontes estelares que foram observadas mais de uma vez, tanto em diferentes levantamentos quanto em um mesmo levantamento. Já a *flag Golden_Sample* indica a confiabilidade da medida de velocidade radial do levantamento espectroscópico original.

Também foram incorporados ao catálogo o nome do levantamento de origem, bem como seu identificador original e o SNR da observação. Isso permite que o usuário cruze facilmente o catálogo aqui construído com o levantamento de origem e, assim, possa obter os demais dados que não foram incluídos neste trabalho. O catálogo final conta com 47.114.843 fontes

estelares, das quais 40.694.081 são fontes únicas, e 34.161.946 foram classificadas como tendo parâmetros orbitais de alta confiabilidade.

A partir deste catálogo desenvolvemos análises a respeito da projeção espacial e da distribuição dos parâmetros dinâmicos e cinemáticos individuais. Os levantamentos Gaia, DESI e SEGUE apresentam maior cobertura espacial e cinemática, tendo estrelas pertencentes a todas as componentes galácticas. O Gaia, por cobrir todo o céu e não possuir alvos específicos de observação, fornece uma amostra diversificada de estrelas. O DESI observa objetos mais distantes, devido ao viés cosmológico que possui, e o SEGUE apresenta uma distribuição filamentar associada ao halo. Esses levantamentos possuem alta dispersão em energia, momento angular e excentricidade, incluindo estrelas retrógradas e com órbitas aquecidas, o que pode indicar a presença de populações do halo.

APOGEE e LAMOST LRS apresentam cobertura espacial intermediária. O APOGEE apresenta sobredensidades nos espaços cinemáticos e dinâmicos que podem estar relacionadas a subestruturas e correntes estelares, enquanto o LAMOST LRS tem grande presença de estrelas fora do plano galáctico. Ambos possuem ampla distribuição de momento angular vertical e excentricidade.

Os levantamentos LAMOST MRS e RAVE se concentram mais no disco, com baixa dispersão dinâmica, indicando órbitas aproximadamente circulares e fortemente ligadas ao potencial da Galáxia. Gaia-ESO e GALAH têm cobertura espacial concentrada no plano galáctico e mostram baixa dispersão nos parâmetros orbitais, com grande presença de estrelas prógradas e excentricidades mais baixas, características do disco fino.

Com relação ao comportamento observado no catálogo completo construído aqui, ao combinar a informação dos diferentes levantamentos, é evidenciada a presença de estrelas pertencentes a outros sistemas, como as das Nuvens de Magalhães. No espaço cinemático e dinâmico, a presença de sobredensidades também é evidente, indicando a possível existência de correntes estelares. Embora os parâmetros orbitais dessas estrelas não possuam significado físico, visto que não estão ligadas ao potencial da Via Láctea, o número de objetos corresponde 0,09% do total deste catálogo.

As *flags* empregadas têm o objetivo de disponibilizar uma amostra de maior confiabilidade ao usuário, mas cabe ressaltar que as mesmas apresentam os vieses inerentes às suas construções. A *flag Unique* prioriza as observações de estrelas duplicadas com base em uma hierarquia definida entre os levantamentos espectroscópicos utilizados, enquanto a *flag Golden_Sample* é enviesada pelo critério de limpeza aqui considerado, mas que pode não atender aos critérios de outros usuários. Por esse motivo, reforça-se que o uso das *flags* é opcional e, conforme visto na Seção 4.1, não altera o comportamento geral dos parâmetros orbitais, apenas reduz a dispersão dos dados e refina objetos mais distantes, que possuem menor acurácia em

suas medidas.

A excentricidade para o catálogo completo está concentrada em $\sim 0,149$, semelhante ao valor de $e \sim 0,119$ obtido para a excentricidade das estrelas do disco fino, ao passo que, para o disco espesso, a concentração ocorre em $e \sim 0,399$ e, para o halo, em $e \sim 0,758$. Isso evidencia a predominância de estrelas do disco fino no catálogo completo, que mais contribuem para a distribuição de excentricidade total. Com relação à *flag Golden_Sample*, são mantidas 73%, 73% e 49% das estrelas presentes para o disco fino, disco espesso e halo, respectivamente. O Diagrama de Toomre também evidencia a predominância de estrelas do disco fino e a redução de objetos do halo quando aplicada a *flag Golden_Sample*, demonstrando o impacto dos valores de limpeza adotados na Seção 3.2 para objetos mais distantes.

A partir da construção deste catálogo, é possível obter informações que o uso de apenas um levantamento estelar não permitiria. Com um grande número de objetos com parâmetros orbitais computados, padrões dinâmicos compartilhados podem ser percebidos, levando à identificação de populações estelares e contribuindo para a arqueologia galáctica por meio do estudo das populações do halo. A próxima Seção apresenta futuras melhorias e possíveis usos deste catálogo.

5.1 Perspectivas futuras

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram reconhecidos pontos que serão aprimorados visando à publicação do catálogo em revista indexada com revisão por pares. Entre as melhorias previstas, destaca-se a aplicação de correções sistemáticas nos parâmetros do Gaia DR3, visando aprimorar a qualidade astrométrica e espectroscópica dos dados. Para as velocidades radiais, serão incorporadas as correções propostas por [Katz et al. \(2023\)](#), em que foi identificado um desvio sistemático em função da magnitude G_{RVS} , e será aplicado o critério de [Babusiaux et al. \(2023\)](#), segundo o qual velocidades radiais de estrelas com $|G - G_{RVS}| > 3$ são consideradas pouco confiáveis. No caso dos movimentos próprios, será adotada a correção do viés descrita por [Cantat-Gaudin & Brandt \(2021\)](#) para estrelas com $G < 13$. As paralaxes também passarão por ajustes, utilizando a correção proposta por [Lindgren et al. \(2021b\)](#). Além disso, erros nas paralaxes de estrelas com $RUWE > 1$ serão corrigidos conforme a metodologia apresentada recentemente por [El-Badry \(2025\)](#). Por fim, em razão dos vieses observados nas distâncias de [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#) para fontes com $\varpi/\sigma_{\varpi} < 3$, será adotada uma nova abordagem proposta por [Weiler \(2025\)](#), utilizando apenas os valores de paralaxe e seu respectivo erro. Em busca de maior consistência entre as normalizações, será adotada uma única faixa de temperatura efetiva para a normalização da velocidade radial para todos os levantamentos empregados, e novas *flags* dos levantamentos serão aplicadas na limpeza inicial. Além das correções, também serão incluídos os dados referentes à quinta fase do SDSS (SDSS-V), especificamente do *Milky Way Mapper*, com a inclusão de dados atualizados do APOGEE e do

Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS).

Espera-se ainda a inclusão das probabilidades químicas de pertencimento às componentes da Via Láctea, complementando a análise cinemática já realizada. Ademais, uma nova *flag* será criada para identificar grupos de estrelas observadas pelos levantamentos utilizados, mas que não pertencem ao potencial da Via Láctea, como estrelas das Grandes e Pequenas Nuvens de Magalhães e de correntes estelares. Parte do planejamento futuro também inclui a atualização do catálogo conforme novos lançamentos de dados dos levantamentos espectroscópicos forem disponibilizados.

Apesar de fundamental, a construção do catálogo é apenas o início de novas pesquisas, e não um fim em si. Por esse motivo, a seguir apresentamos possíveis usos do catálogo em diferentes áreas da astronomia, as quais pretendemos trabalhar em projetos futuros.

- Busca por novas populações e correntes estelares: diversas populações estelares foram identificadas nos últimos anos por meio da combinação entre dados dinâmicos e químicos, como as Correntes de Helmi, Gaia-Enceladus/Sausage, Sequoia, Thamnos, entre outras. Utilizando o catálogo construído neste trabalho, com parâmetros orbitais para milhões de estrelas, é possível buscar assinaturas dinâmicas compatíveis com essas estruturas previamente identificadas, bem como identificar possíveis novas subestruturas. A descoberta de novos agrupamentos pode indicar populações estelares que compartilham origem comum, permitindo o mapeamento de eventos de acreção e a caracterização de estruturas remanescentes de galáxias satélites ou causadas por perturbações internas da Via Láctea.
- Identificação de novos membros de populações estelares já conhecidas: embora muitas populações estelares já tenham sido identificadas, muitas delas contam com um número reduzido de membros, na casa das centenas e até dezenas ou menos, como é o caso de Cetus (Newberg et al., 2009), Pontus (Malhan, 2022), Icarus (Fiorentin et al., 2021), Arjuna e I'Itoi (Naidu et al., 2020). Essas populações, observadas em um único levantamento estelar, poderão ser estudadas com maior riqueza de detalhes por meio da combinação de todos os levantamentos adotados aqui, conferindo maior robustez à análise dos espaços de fases e ações. Assim, é esperado que novos membros sejam localizados para essas populações.
- Busca por padrões químico-dinâmicos a partir de algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial: os parâmetros orbitais fornecidos por este catálogo, em conjunto com os dados químicos dos levantamentos empregados, podem ser utilizados para refinar os agrupamentos de populações galácticas e estudar o aquecimento das órbitas causado por eventos de acreção e correntes estelares, utilizando ferramentas como HDBSCAN (McInnes et al., 2017), *Gaussian Mixture Models* (Reynolds, 2009), XGBoost (Chen &

Guestrin, 2016), entre outras.

- Estudo de exoplanetas de origem extragaláctica: conforme discutido em [Perottoni et al. \(2021\)](#), o halo abriga estrelas oriundas de galáxias anãs que se fundiram à Via Láctea durante eventos de acreção ocorridos em sua história evolutiva. Essas estrelas podem abrigar exoplanetas, formados em regiões distintas da Via Láctea, permitindo o estudo de sistemas planetários com origem extragaláctica. Nesse sentido, o uso do catálogo construído neste trabalho, em conjunto com dados de levantamentos exoplanetários, pode contribuir para a identificação desses objetos.

Esperamos que um catálogo como este beneficie significativamente a área da astronomia galáctica. Assim, é planejada a publicação de um artigo descrevendo o catálogo em revista com fator de impacto relativo ao *Qualis-A*, de acordo com a classificação adotada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e a sua disponibilização para que a comunidade científica tenha acesso ao conteúdo e possa utilizá-lo nas mais diversas pesquisas.

Referências

- Abdurro'uf, Accetta, K., Aerts, C., et al. 2022, , 259, 35, doi: [10.3847/1538-4365/ac4414](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac4414)
- Amarante, J. A. S., Debattista, V. P., Beraldo e Silva, L., Laporte, C. F. P., & Deg, N. 2022, , 937, 12, doi: [10.3847/1538-4357/ac8b0d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac8b0d)
- Ardern-Arentsen, A., Monari, G., Queiroz, A. B. A., et al. 2024, , 530, 3391, doi: [10.1093/mnras/stae1049](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1049)
- Baade, W. 1944, , 100, 137, doi: [10.1086/144650](https://doi.org/10.1086/144650)
- Babusiaux, C., Fabricius, C., Khanna, S., et al. 2023, , 674, A32, doi: [10.1051/0004-6361/202243790](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243790)
- Bahcall, J. N., & Soneira, R. M. 1984, , 55, 67, doi: [10.1086/190948](https://doi.org/10.1086/190948)
- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Demleitner, M., & Andrae, R. 2021, , 161, 147, doi: [10.3847/1538-3881/abd806](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd806)
- Baker, J. G. 1969, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-5, 261, doi: [10.1109/TAES.1969.309914](https://doi.org/10.1109/TAES.1969.309914)
- Barbá, R. H., Minniti, D., Geisler, D., et al. 2019, The Astrophysical Journal Letters, 870, L24, doi: [10.3847/2041-8213/aaf811](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf811)
- Barstow, D. R. 1987, Annual Review of Computer Science, 2, 21, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.cs.02.060187.000321>
- Belokurov, V., Erkal, D., Evans, N. W., Koposov, S. E., & Deason, A. J. 2018, , 478, 611, doi: [10.1093/mnras/sty982](https://doi.org/10.1093/mnras/sty982)
- Belokurov, V., Sanders, J. L., Fattahi, A., et al. 2020, , 494, 3880, doi: [10.1093/mnras/staa876](https://doi.org/10.1093/mnras/staa876)
- Bensby, T., Feltzing, S., & Lundström, I. 2003, , 410, 527, doi: [10.1051/0004-6361:20031213](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031213)
- Bensby, T., Feltzing, S., & Oey, M. S. 2014, , 562, A71, doi: [10.1051/0004-6361/201322631](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322631)
- Binney, J., & Merrifield, M. 1998, Galactic Astronomy
- Binney, J., & Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics: Second Edition

- Bland-Hawthorn, J., & Gerhard, O. 2016, , 54, 529, doi: [10.1146/annurev-astro-081915-023441](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081915-023441)
- Blanton, M. R., Bershad, M. A., Abolfathi, B., et al. 2017, , 154, 28, doi: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567)
- Blecha, A., Cayatte, V., North, P., Royer, F., & Simond, G. 2000, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4008, Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 467–474, doi: [10.1117/12.395507](https://doi.org/10.1117/12.395507)
- Bonaca, A., & Price-Whelan, A. M. 2025, , 100, 101713, doi: [10.1016/j.newar.2024.101713](https://doi.org/10.1016/j.newar.2024.101713)
- Borbolato, L., Perottoni, H. D., Rossi, S., et al. 2023, All-sky Kinematics and Chemistry of Monoceros Stellar Overdensity. <https://arxiv.org/abs/2309.15321>
- Borbolato, L., Rossi, S., Perottoni, H. D., et al. 2025, Early Co-formation of the Milky Way's Thin and Thick Disks at Redshift $z > 2$. <https://arxiv.org/abs/2504.00135>
- Bovy, J. 2015, The Astrophysical Journal Supplement Series, 216, 29, doi: [10.1088/0067-0049/216/2/29](https://doi.org/10.1088/0067-0049/216/2/29)
- Bovy, J. in press 2026, Dynamics and Astrophysics of Galaxies (Princeton, NJ: Princeton University Press)
- Bovy, J., Nidever, D. L., Rix, H.-W., et al. 2014, , 790, 127, doi: [10.1088/0004-637X/790/2/127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/790/2/127)
- Bowen, I. S., & Vaughan, Jr., A. H. 1973, , 12, 1430, doi: [10.1364/AO.12.001430](https://doi.org/10.1364/AO.12.001430)
- Buder, S., Kos, J., Wang, E. X., et al. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2409.19858, doi: [10.48550/arXiv.2409.19858](https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.19858)
- Cantat-Gaudin, T., & Brandt, T. D. 2021, , 649, A124, doi: [10.1051/0004-6361/202140807](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140807)
- Cantat-Gaudin, T., & Casamiquela, L. 2024, , 99, 101696, doi: [10.1016/j.newar.2024.101696](https://doi.org/10.1016/j.newar.2024.101696)
- Carrillo, A., Deason, A. J., Fattahi, A., Callingham, T. M., & Grand, R. J. J. 2024, , 527, 2165, doi: [10.1093/mnras/stad3274](https://doi.org/10.1093/mnras/stad3274)
- Chandrasekhar, S. 1931, , 74, 81, doi: [10.1086/143324](https://doi.org/10.1086/143324)
- Chen, T., & Guestrin, C. 2016, in Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD '16 (New York, NY, USA: Association for Computing Machinery), 785–794, doi: [10.1145/2939672.2939785](https://doi.org/10.1145/2939672.2939785)
- Chiappini, C. 2001, American Scientist, 89, 506, doi: [10.1511/2001.6.506](https://doi.org/10.1511/2001.6.506)
- Chiba, M., & Beers, T. C. 2000, , 119, 2843, doi: [10.1086/301409](https://doi.org/10.1086/301409)
- Code, A. D. 1973, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 11, 239, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.11.090173.001323>

- Cooper, A. P., Kuposov, S. E., Allende Prieto, C., et al. 2023, , 947, 37, doi: [10.3847/1538-4357/acb3c0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acb3c0)
- Cropper, M., Katz, D., Sartoretti, P., et al. 2018, , 616, A5, doi: [10.1051/0004-6361/201832763](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832763)
- Cui, X.-Q., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., et al. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 1197, doi: [10.1088/1674-4527/12/9/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/9/003)
- Davies, R., & Kasper, M. 2012, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 305, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125447>
- De Angeli, F., Weiler, M., Montegriffo, P., et al. 2023, , 674, A2, doi: [10.1051/0004-6361/202243680](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243680)
- De Silva, G. M., Freeman, K. C., Bland-Hawthorn, J., et al. 2015, , 449, 2604, doi: [10.1093/mnras/stv327](https://doi.org/10.1093/mnras/stv327)
- Deason, A. J., & Belokurov, V. 2024, , 99, 101706, doi: [10.1016/j.newar.2024.101706](https://doi.org/10.1016/j.newar.2024.101706)
- Dekker, H., D’Odorico, S., Kaufer, A., Delabre, B., & Kotzlowski, H. 2000, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 4008, *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 534–545, doi: [10.1117/12.395512](https://doi.org/10.1117/12.395512)
- Deng, L.-C., Newberg, H. J., Liu, C., et al. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 735, doi: [10.1088/1674-4527/12/7/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/003)
- DESI Collaboration, Abareshi, B., Aguilar, J., et al. 2022, , 164, 207, doi: [10.3847/1538-3881/ac882b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac882b)
- DESI Collaboration, Adame, A. G., Aguilar, J., et al. 2024, , 168, 58, doi: [10.3847/1538-3881/ad3217](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad3217)
- DESI Collaboration, Abdul-Karim, M., Adame, A. G., et al. 2025, arXiv e-prints, arXiv:2503.14745, doi: [10.48550/arXiv.2503.14745](https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.14745)
- Dodd, E., Callingham, T. M., Helmi, A., et al. 2023, , 670, L2, doi: [10.1051/0004-6361/202244546](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244546)
- Doliva-Dolinsky, A., Collins, M. L. M., & Martin, N. F. 2025, arXiv e-prints, arXiv:2502.06948, doi: [10.48550/arXiv.2502.06948](https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.06948)
- Dreyer, J. L. E. 1888, , 49, 1
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., et al. 1993, , 275, 101
- Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., & Sandage, A. R. 1962, , 136, 748, doi: [10.1086/147433](https://doi.org/10.1086/147433)
- Eisenstein, D. J., Weinberg, D. H., Agol, E., et al. 2011, , 142, 72, doi: [10.1088/0004-6256/142/3/72](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/72)
- El-Badry, K. 2025, *The Open Journal of Astrophysics*, 8, 62, doi: [10.33232/001c.138448](https://doi.org/10.33232/001c.138448)

- Feuillet, D. K., Feltzing, S., Sahlholdt, C. L., & Casagrande, L. 2020, , 497, 109, doi: [10.1093/mnras/staa1888](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1888)
- Fiorentin, P. R., Spagna, A., Lattanzi, M. G., & Cignoni, M. 2021, *The Astrophysical Journal Letters*, 907, L16, doi: [10.3847/2041-8213/abd53d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abd53d)
- Fouesneau, M., Andrae, R., Dharmawardena, T., et al. 2022, *Astronomy and Astrophysics*, 662, A125, doi: [10.1051/0004-6361/202141828](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141828)
- Freeman, K., & Bland-Hawthorn, J. 2002, , 40, 487, doi: [10.1146/annurev.astro.40.060401.093840](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093840)
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., et al. 2016, *AA*, 595, A1, doi: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272)
- Gaia Collaboration, Babusiaux, C., van Leeuwen, F., et al. 2018, *AA*, 616, A10, doi: [10.1051/0004-6361/201832843](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832843)
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2021, , 649, A1, doi: [10.1051/0004-6361/202039657](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039657)
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, , 674, A1, doi: [10.1051/0004-6361/202243940](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940)
- García Pérez, A. E., Allende Prieto, C., Holtzman, J. A., et al. 2016, , 151, 144, doi: [10.3847/0004-6256/151/6/144](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/6/144)
- Gilmore, G., & Reid, N. 1983, , 202, 1025. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1983MNRAS.202.1025G>
- Gilmore, G., Wyse, R. F. G., & Kuijken, K. 1989, , 27, 555, doi: [10.1146/annurev.aa.27.090189.003011](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.27.090189.003011)
- Gilmore, G., Randich, S., Worley, C. C., et al. 2022, *Astronomy and Astrophysics*, 666, A120, doi: [10.1051/0004-6361/202243134](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243134)
- Goldstein, H. 1980, *Classical Mechanics* (Addison-Wesley)
- Grand, R. J. J., Kawata, D., Belokurov, V., et al. 2020, , 497, 1603, doi: [10.1093/mnras/staa2057](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2057)
- Green, G. M., Schlafly, E., Zucker, C., Speagle, J. S., & Finkbeiner, D. 2019, , 887, 93, doi: [10.3847/1538-4357/ab5362](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5362)
- Green, R. M. 1985, *Spherical Astronomy*
- Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., et al. 2006, , 131, 2332, doi: [10.1086/500975](https://doi.org/10.1086/500975)
- Hayden, M. R., Bovy, J., Holtzman, J. A., et al. 2015, , 808, 132, doi: [10.1088/0004-637X/808/2/132](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/2/132)
- Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M. D., et al. 2018, , 863, 113, doi: [10.3847/1538-4357/aad235](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad235)
- Helmi, A. 2020, , 58, 205, doi: [10.1146/annurev-astro-032620-021917](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-032620-021917)

- Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H., et al. 2018, , 563, 85, doi: [10.1038/s41586-018-0625-x](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0625-x)
- Helmi, A., White, S. D. M., de Zeeuw, P. T., & Zhao, H. 1999, , 402, 53, doi: [10.1038/46980](https://doi.org/10.1038/46980)
- Herschel, W. 1785, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 75, 213
- Horta, D., Schiavon, R. P., Mackereth, J. T., et al. 2021, , 500, 1385, doi: [10.1093/mnras/staa2987](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2987)
- . 2023, , 520, 5671, doi: [10.1093/mnras/stac3179](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3179)
- Hubble, E. 1925, *Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington*, 304, 1
- Hunter, G. H., Sormani, M. C., Beckmann, J. P., et al. 2024, , 692, A216, doi: [10.1051/0004-6361/202450000](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450000)
- Ibata, R. A., Gilmore, G., & Irwin, M. J. 1994, , 370, 194, doi: [10.1038/370194a0](https://doi.org/10.1038/370194a0)
- Janesick, J. R., Elliott, T., Collins, S., Blouke, M. M., & Freeman, J. 1987, *Optical Engineering*, 26, 692, doi: [10.1117/12.7974139](https://doi.org/10.1117/12.7974139)
- Jurić, M., Ivezić, Ž., Brooks, A., et al. 2008, , 673, 864, doi: [10.1086/523619](https://doi.org/10.1086/523619)
- Katz, D., Sartoretti, P., Guerrier, A., et al. 2023, , 674, A5, doi: [10.1051/0004-6361/202244220](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244220)
- Kim, B., Kuposov, S. E., Li, T. S., et al. 2025, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 540, 264–288, doi: [10.1093/mnras/staf705](https://doi.org/10.1093/mnras/staf705)
- Kobayashi, C. 2020, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 16, 63–82, doi: [10.1017/s1743921322001132](https://doi.org/10.1017/s1743921322001132)
- Kollmeier, J. A., Zasowski, G., Rix, H.-W., et al. 2017, *SDSS-V: Pioneering Panoptic Spectroscopy*. <https://arxiv.org/abs/1711.03234>
- Kuposov, S. E., Allende Prieto, C., Cooper, A. P., et al. 2024, , 533, 1012, doi: [10.1093/mnras/stae1842](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1842)
- Koppelman, H., Helmi, A., & Veljanoski, J. 2018, , 860, L11, doi: [10.3847/2041-8213/aac882](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aac882)
- Koppelman, H. H., Helmi, A., Massari, D., Price-Whelan, A. M., & Starkenburg, T. K. 2019, *Astronomy and Astrophysics*, 631, L9, doi: [10.1051/0004-6361/201936738](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936738)
- Laporte, C. F. P., Johnston, K. V., Gómez, F. A., Garavito-Camargo, N., & Besla, G. 2018, , 481, 286, doi: [10.1093/mnras/sty1574](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1574)
- Lee, Y. S., Beers, T. C., Sivarani, T., et al. 2008, , 136, 2022, doi: [10.1088/0004-6256/136/5/2022](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/5/2022)
- Licquia, T. C., & Newman, J. A. 2015, , 806, 96, doi: [10.1088/0004-637X/806/1/96](https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/96)
- Lindblad, B. 1927, , 87, 553, doi: [10.1093/mnras/87.7.553](https://doi.org/10.1093/mnras/87.7.553)

- Lindegren, L., Klioner, S. A., Hernández, J., et al. 2020, , 649, A2, doi: [10.1051/0004-6361/202039709](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039709)
- . 2021a, , 649, A2, doi: [10.1051/0004-6361/202039709](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039709)
- Lindegren, L., Bastian, U., Biermann, M., et al. 2021b, , 649, A4, doi: [10.1051/0004-6361/202039653](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039653)
- Liu, C., Fu, J., Shi, J., et al. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.07210, doi: [10.48550/arXiv.2005.07210](https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.07210)
- Liu, H., Du, C., Ye, D., Zhang, J., & Deng, M. 2024, , 976, 161, doi: [10.3847/1538-4357/ad8352](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad8352)
- Lövdal, S. S., Ruiz-Lara, T., Koppelman, H. H., et al. 2022, , 665, A57, doi: [10.1051/0004-6361/202243060](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243060)
- Luo, A. L., Zhao, Y.-H., Zhao, G., et al. 2015, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15, 1095, doi: [10.1088/1674-4527/15/8/002](https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/8/002)
- Mackereth, J. T., Schiavon, R. P., Pfeffer, J., et al. 2019, , 482, 3426, doi: [10.1093/mnras/sty2955](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2955)
- Majewski, S. R. 1993, , 31, 575, doi: [10.1146/annurev.aa.31.090193.003043](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.003043)
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., et al. 2017, , 154, 94, doi: [10.3847/1538-3881/aa784d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa784d)
- Malhan, K. 2022, *The Astrophysical Journal Letters*, 930, L9, doi: [10.3847/2041-8213/ac67da](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac67da)
- Mardini, M. K., Placco, V. M., Meiron, Y., et al. 2020, , 903, 88, doi: [10.3847/1538-4357/abbc13](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbc13)
- Martell, S. L., Sharma, S., Buder, S., et al. 2017, , 465, 3203, doi: [10.1093/mnras/stw2835](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2835)
- Mateu, C. 2023, , 520, 5225, doi: [10.1093/mnras/stad321](https://doi.org/10.1093/mnras/stad321)
- Matsuno, T., Aoki, W., & Suda, T. 2019, , 874, L35, doi: [10.3847/2041-8213/ab0ec0](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec0)
- Matteucci, F., & Greggio, L. 1986, , 154, 279
- Mazzali, P. A., Ropke, F. K., Benetti, S., & Hillebrandt, W. 2007, *Science*, 315, 825–828, doi: [10.1126/science.1136259](https://doi.org/10.1126/science.1136259)
- McInnes, L., Healy, J., & Astels, S. 2017, *The Journal of Open Source Software*, 2, 205, doi: [10.21105/joss.00205](https://doi.org/10.21105/joss.00205)
- McMillan, P. J. 2017, , 465, 76, doi: [10.1093/mnras/stw2759](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2759)
- McWilliam, A., & Zoccali, M. 2010, , 724, 1491, doi: [10.1088/0004-637X/724/2/1491](https://doi.org/10.1088/0004-637X/724/2/1491)
- Messier, C. 1781, *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles (Catalog of Nebulae and Star Clusters)*, *Connaissance des Temps ou des Mouvements Célestes*, for 1784, p. 227-267

- Montegriffo, P., De Angeli, F., Andrae, R., et al. 2023, , 674, A3, doi: [10.1051/0004-6361/202243880](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243880)
- Myeong, G. C., Vasiliev, E., Iorio, G., Evans, N. W., & Belokurov, V. 2019, , 488, 1235, doi: [10.1093/mnras/stz1770](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1770)
- Naidu, R. P., Conroy, C., Bonaca, A., et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, 901, 48, doi: [10.3847/1538-4357/abaef4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abaef4)
- Nataf, D. M., Udalski, A., Gould, A., Fouqué, P., & Stanek, K. Z. 2010, , 721, L28, doi: [10.1088/2041-8205/721/1/L28](https://doi.org/10.1088/2041-8205/721/1/L28)
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, , 462, 563, doi: [10.1086/177173](https://doi.org/10.1086/177173)
- Newberg, H. J., Yanny, B., & Willett, B. A. 2009, , 700, L61, doi: [10.1088/0004-637X/700/2/L61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/2/L61)
- Pasquini, L., Avila, G., Allaert, E., et al. 2000, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 4008, *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 129–140, doi: [10.1117/12.395491](https://doi.org/10.1117/12.395491)
- Pérez-Villegas, A., Barbuy, B., Kerber, L. O., et al. 2020, , 491, 3251, doi: [10.1093/mnras/stz3162](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3162)
- Perottoni, H. D., Amarante, J. A. S., Limberg, G., et al. 2021, *The Astrophysical Journal Letters*, 913, L3, doi: [10.3847/2041-8213/abfb06](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abfb06)
- Perryman, M. A. C., de Boer, K. S., Gilmore, G., et al. 2001, , 369, 339, doi: [10.1051/0004-6361:20010085](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010085)
- Price-Whelan, A. M. 2017, *The Journal of Open Source Software*, 2, 388, doi: [10.21105/joss.00388](https://doi.org/10.21105/joss.00388)
- Purcell, C. W., Bullock, J. S., Tollerud, E. J., Rocha, M., & Chakrabarti, S. 2011, *Nature*, 477, 301–303, doi: [10.1038/nature10417](https://doi.org/10.1038/nature10417)
- Queiroz, A. B. A., Anders, F., Santiago, B. X., et al. 2018, , 476, 2556, doi: [10.1093/mnras/sty330](https://doi.org/10.1093/mnras/sty330)
- Queiroz, A. B. A., Anders, F., Chiappini, C., et al. 2020, , 638, A76, doi: [10.1051/0004-6361/201937364](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937364)
- Queiroz, A. B. A., Chiappini, C., Perez-Villegas, A., et al. 2021, , 656, A156, doi: [10.1051/0004-6361/202039030](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039030)
- Quinn, P. J., & Goodman, J. 1986, , 309, 472, doi: [10.1086/164619](https://doi.org/10.1086/164619)
- Randich, S., Gilmore, G., & Gaia-ESO Consortium. 2013, *The Messenger*, 154, 47
- Randich, S., Gilmore, G., Magrini, L., et al. 2022, *AA*, 666, A121, doi: [10.1051/0004-6361/202243141](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243141)
- Reddy, B. E., Tomkin, J., Lambert, D. L., & Prieto, C. A. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340, 304–340, doi: [10.1046/j.1365-8711.2003.06305.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06305.x)

- Reynolds, D. 2009, *Gaussian Mixture Models*, ed. S. Z. Li & A. Jain (Boston, MA: Springer US), 659–663, doi: [10.1007/978-0-387-73003-5_196](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_196)
- Rich, R. M. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 245, *Astrophysical Ages and Times Scales*, ed. T. von Hippel, C. Simpson, & N. Manset, 216, doi: [10.48550/arXiv.astro-ph/0108107](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0108107)
- Rocha-Pinto, H. J., Majewski, S. R., Skrutskie, M. F., Crane, J. D., & Patterson, R. J. 2004, *The Astrophysical Journal*, 615, 732, doi: [10.1086/424585](https://doi.org/10.1086/424585)
- Rockosi, C. M., Lee, Y. S., Morrison, H. L., et al. 2022, , 259, 60, doi: [10.3847/1538-4365/ac5323](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac5323)
- Roman, N. G. 1955, , 2, 195, doi: [10.1086/190021](https://doi.org/10.1086/190021)
- Sandage, A. 1987, , 93, 610, doi: [10.1086/114342](https://doi.org/10.1086/114342)
- Sandage, A., & Fouts, G. 1987, , 93, 592, doi: [10.1086/114341](https://doi.org/10.1086/114341)
- Schönrich, R., Binney, J., & Dehnen, W. 2010, , 403, 1829, doi: [10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x)
- Searle, L., & Zinn, R. 1978, , 225, 357, doi: [10.1086/156499](https://doi.org/10.1086/156499)
- Shapley, H., & Curtis, H. D. 1921, *Bulletin of the National Research Council*, 2, 171
- Sharma, S. 2017, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 55, 213, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122339>
- Sheinis, A., Anguiano, B., Asplund, M., et al. 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, 035002, doi: [10.1117/1.JATIS.1.3.035002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.3.035002)
- Shen, J., Rich, R. M., Kormendy, J., et al. 2010, , 720, L72, doi: [10.1088/2041-8205/720/1/L72](https://doi.org/10.1088/2041-8205/720/1/L72)
- Smee, S. A., Gunn, J. E., Uomoto, A., et al. 2013, , 146, 32, doi: [10.1088/0004-6256/146/2/32](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/2/32)
- Steinmetz, M., Zwitter, T., Siebert, A., et al. 2006, , 132, 1645, doi: [10.1086/506564](https://doi.org/10.1086/506564)
- Steinmetz, M., Matijević, G., Enke, H., et al. 2020, , 160, 82, doi: [10.3847/1538-3881/ab9ab9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9ab9)
- Steinmetz, M., Guiglion, G., McMillan, P. J., et al. 2020, *The Astronomical Journal*, 160, 83, doi: [10.3847/1538-3881/ab9ab8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9ab8)
- Taylor, M. B. 2005, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 347, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*, ed. P. Shopbell, M. Britton, & R. Ebert, 29
- Tinsley, B. M. 1979, , 229, 1046, doi: [10.1086/157039](https://doi.org/10.1086/157039)
- Trick, W. H., Bovy, J., & Rix, H.-W. 2016, *The Astrophysical Journal*, 830, 97, doi: [10.3847/0004-637x/830/2/97](https://doi.org/10.3847/0004-637x/830/2/97)

- Trick, W. H., Coronado, J., & Rix, H.-W. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 3291–3306, doi: [10.1093/mnras/stz209](https://doi.org/10.1093/mnras/stz209)
- Tsantaki, M., Pancino, E., Marrese, P., et al. 2022, , 659, A95, doi: [10.1051/0004-6361/202141702](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141702)
- Vasiliev, E. 2019, , 482, 1525, doi: [10.1093/mnras/sty2672](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2672)
- Vasiliev, E. 2023, *Galaxies*, 11, doi: [10.3390/galaxies11020059](https://doi.org/10.3390/galaxies11020059)
- Vasiliev, E., & Baumgardt, H. 2021, , 505, 5978, doi: [10.1093/mnras/stab1475](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1475)
- Walker, I. R., Mihos, J. C., & Hernquist, L. 1996, , 460, 121, doi: [10.1086/176956](https://doi.org/10.1086/176956)
- Wallerstein, G. 1962, , 6, 407, doi: [10.1086/190067](https://doi.org/10.1086/190067)
- Wang, R., Luo, A. L., Chen, J. J., et al. 2019, , 244, 27, doi: [10.3847/1538-4365/ab3cc0](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab3cc0)
- Watson, F. G., Bogatu, G., Saunders, W., et al. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 232, *The New Era of Wide Field Astronomy*, ed. R. Clowes, A. Adamson, & G. Bromage, 421
- Wegg, C., & Gerhard, O. 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435, 1874–1887, doi: [10.1093/mnras/stt1376](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1376)
- Weiler, M. 2025, arXiv e-prints, arXiv:2505.16588, doi: [10.48550/arXiv.2505.16588](https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.16588)
- Wilson, J. C., Hearty, F. R., Skrutskie, M. F., et al. 2019, , 131, 055001, doi: [10.1088/1538-3873/ab0075](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab0075)
- Yan, H., Li, H., Wang, S., et al. 2022, *The Innovation*, 3, 100224, doi: [10.1016/j.xinn.2022.100224](https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100224)
- Yanny, B., Rockosi, C., Newberg, H. J., et al. 2009, , 137, 4377, doi: [10.1088/0004-6256/137/5/4377](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/5/4377)
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., et al. 2000, , 120, 1579, doi: [10.1086/301513](https://doi.org/10.1086/301513)
- Zasowski, G., Johnson, J. A., Frinchaboy, P. M., et al. 2013, , 146, 81, doi: [10.1088/0004-6256/146/4/81](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/4/81)
- Zhang, L., Xue, X.-X., Yang, C., et al. 2023, , 165, 224, doi: [10.3847/1538-3881/acc9bb](https://doi.org/10.3847/1538-3881/acc9bb)
- Zhao, G., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., Jing, Y.-P., & Deng, L.-C. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 723, doi: [10.1088/1674-4527/12/7/002](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/002)



Colunas presentes no catálogo

A Tabela A.1 apresenta as colunas presentes no catálogo construído neste trabalho, com suas respectivas descrições e unidades de medida.

Tabela A.1: Descrição do conteúdo do catálogo.

Coluna	Descrição	Unidades
DR3Name	ID do Gaia DR3	
RA	Ascensão reta (J2000)	deg
DEC	Declinação (J2000)	deg
Dist	Distância fotogeométrica do Gaia EDR3	kpc
RV_norm	Velocidade radial normalizada com Gaia DR3	km s ⁻¹
pmRA	Movimento próprio em ascensão reta	mas yr ⁻¹
pmDEC	Movimento próprio em declinação	mas yr ⁻¹
e_pmRA	Erro do movimento próprio em ascensão reta	mas yr ⁻¹
e_pmDEC	Erro do movimento próprio em declinação	mas yr ⁻¹
e_Dist	Erro da distância fotogeométrica do Gaia EDR3	kpc
e_RV	Erro da velocidade radial do catálogo original	km s ⁻¹
V_r*	Velocidade radial em coordenadas cilíndricas	km s ⁻¹
V_phi*	Velocidade azimutal em coordenadas cilíndricas	km s ⁻¹
V_z*	Velocidade vertical em coordenadas cilíndricas	km s ⁻¹
J_r*	Ação radial em coordenadas cilíndricas	kpc km s ⁻¹
J_phi*	Ação azimutal em coordenadas cilíndricas	kpc km s ⁻¹
J_z*	Ação vertical em coordenadas cilíndricas	kpc km s ⁻¹
Energy*	Energia orbital total	km ² s ⁻²
R_peri*	Distância do pericentro	kpc
R_apo*	Distância do apocentro	kpc
R_max*	Raio galactocêntrico máximo	kpc
Z_max*	Altura máxima acima do plano galáctico	kpc
Ecc*	Excentricidade orbital	
Ecc mean	Excentricidade orbital média	
L_X*	Momento angular em X em coordenadas cartesianas	kpc km s ⁻¹
L_Y*	Momento angular em Y em coordenadas cartesianas	kpc km s ⁻¹
L_Z*	Momento angular em Z em coordenadas cartesianas	kpc km s ⁻¹
L_tot*	Momento angular total	kpc km s ⁻¹
L_perp*	Momento angular perpendicular	kpc km s ⁻¹
Incl*	Inclinação orbital	deg
X_gal*	Posição Galáctica em X em coordenadas cartesianas	kpc
Y_gal*	Posição Galáctica em Y em coordenadas cartesianas	kpc
Z_gal*	Posição Galáctica em Z em coordenadas cartesianas	kpc
V_X*	Velocidade cartesiana no eixo X	km s ⁻¹
V_Y*	Velocidade cartesiana no eixo Y	km s ⁻¹
V_Z*	Velocidade cartesiana no eixo Z	km s ⁻¹
Survey_ID	ID do catálogo original	

Continua na próxima página

Tabela A.1 – continuação

Nome da Coluna	Descrição	Unidades
SNR	Sinal ruído do catálogo original	
Survey	Nome do catálogo espectroscópico de origem	
P_D_K	Probabilidade cinemática de pertencer ao disco fino	
P_TD_K	Probabilidade cinemática de pertencer ao disco espesso	
P_H_K	Probabilidade cinemática de pertencer ao halo	
Unique	Flag indicativa da melhor medição obtida para aquele objeto	
Golden Sample	Flag indicativa de velocidade radial precisa	

Os parâmetros sinalizados com * são acompanhados pelos percentis 16 e 84.

Comparação com a literatura

A fim de garantir que os resultados obtidos neste trabalho estivessem em concordância com outros estudos semelhantes disponíveis na literatura, foi realizada uma comparação com o catálogo de abundâncias, distâncias e idades para estrelas do APOGEE DR17, obtido por meio do código de aprendizado profundo AstroNN¹, em conjunto com o Galpy (Bovy, 2015), utilizando o potencial gravitacional MWPotential2014.

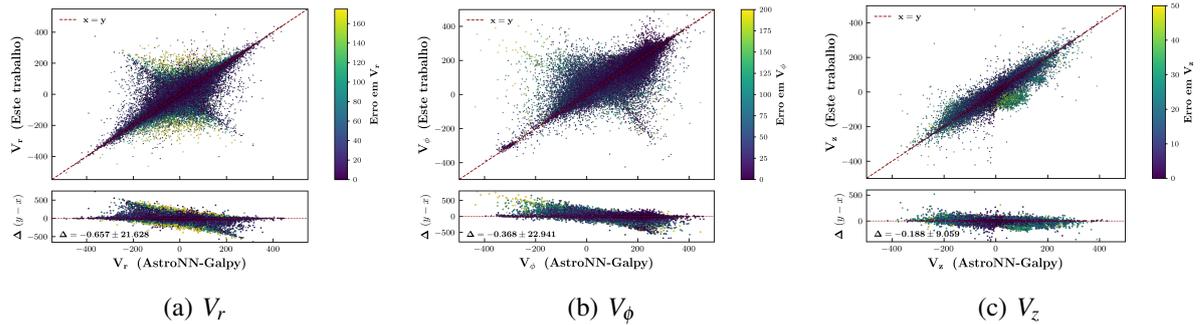


Figura B.1: Comparação entre os valores obtidos para V_r , V_ϕ e V_z no catálogo desenvolvido neste trabalho e o catálogo de abundâncias, distâncias e idades para estrelas do APOGEE DR17.

Foram comparados os parâmetros orbitais V_r , V_ϕ , V_z , excentricidade, L_z e energia, conforme mostrado nas Figuras B.1 e B.2. Nessas figuras, o eixo x representa os valores obtidos a partir do AstroNN, enquanto o eixo y corresponde aos valores calculados neste trabalho. A linha tracejada vermelha indica a igualdade entre x e y . A escala de cores reflete o erro associado a cada parâmetro, conforme disponibilizado no catálogo de abundâncias, distâncias e idades do APOGEE DR17. O subgráfico localizado abaixo de cada painel apresenta a diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos, em que o eixo y mostra essa diferença e o eixo x , novamente, o valor disponibilizado na literatura.

A Figura B.1 apresenta a comparação para as velocidades V_r , V_ϕ e V_z , sendo possível observar boa concordância com os valores reportados na literatura. As diferenças médias entre este trabalho e os valores de referência são, respectivamente, $\Delta = -0,657 \pm 21,628$, $\Delta = -0,365 \pm 22,941$ e $\Delta = -0,188 \pm 9,059$. Já a Figura B.2 mostra a comparação para a

¹ https://data.sdss.org/sas/dr17/env/APOGEE_ASTRO_NN/

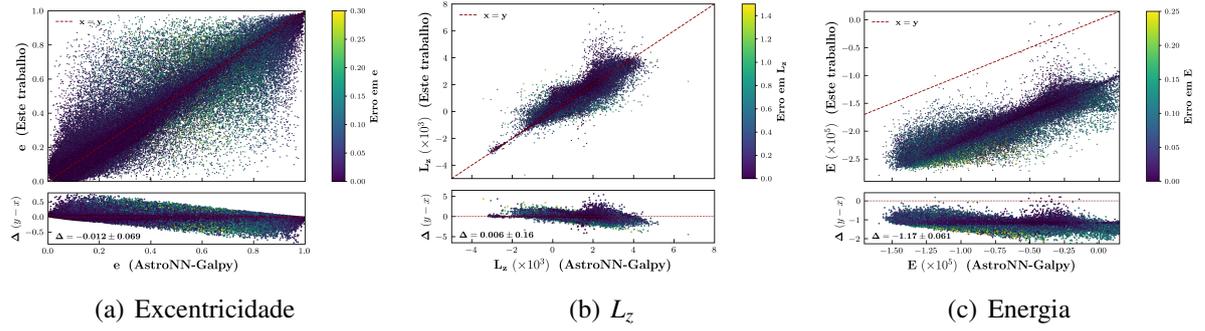


Figura B.2: Comparação entre os valores obtidos para excentricidade, L_z e energia no catálogo desenvolvido neste trabalho e o catálogo de abundâncias, distâncias e idades para estrelas do APOGEE DR17.

excentricidade, L_z e energia. Para a excentricidade, nota-se também boa concordância, com $\Delta = -0,012 \pm 0,069$, apesar da dispersão observada. O momento angular apresenta resultados compatíveis com a literatura, com $\Delta = 0,006 \pm 0,16 [\times 10^3]$. Por outro lado, a comparação da energia evidencia uma discrepância significativa em relação aos valores disponibilizados no catálogo do APOGEE DR17, com $\Delta = -1,17 \pm 0,061 [\times 10^5]$, indicando um deslocamento em relação à igualdade $x = y$. Cabe ressaltar que o catálogo de abundâncias, distâncias e idades do APOGEE DR17 adota um potencial gravitacional distinto, o que influencia diretamente o valor da energia orbital, já que esta depende explicitamente do potencial adotado. Esse fator justifica o deslocamento observado na comparação entre os resultados aqui obtidos e os apresentados no referido catálogo.