



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES – CFP
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

JAQUELINE FONSECA DOS SANTOS

ASTRONOMIA HOJE: UM ROTEIRO PARA CARACTERIZAÇÃO DE
EXOPLANETAS DESCOBERTOS NA MISSÃO TESS USANDO A
LINGUAGEM PYTHON

CAJAZEIRAS – PB
2024

JAQUELINE FONSECA DOS SANTOS

**Astronomia hoje: Um roteiro para caracterização de exoplanetas descobertos na missão
TESS usando a linguagem Python**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora, como
componente obrigatório para a obtenção do
título de Licenciado em Física.

Orientador: Dr. Caio Fabio Teixeira Correia

**CAJAZEIRAS – PB
2024**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação -(CIP)

S237a Santos, Jaqueline Fonseca dos.
Astronomia hoje: um roteiro para caracterização de exoplanetas descobertos na missão TESS usando a linguagem Python / Jaqueline Fonseca dos Santos. - Cajazeiras, 2024.
95f. : il. Color.
Bibliografia.

Orientador: Prof. Dr. Caio Fabio Teixeira Correia.
Monografia (Licenciatura em Física) UFCG/CFP, 2024.

1. Técnicas astronômicas. 2. Exoplanetas. 3. Método de trânsito. 4. Parâmetros físicos e orbitais. 5. Python. 6. Ciência computacional. 7. TESS -Transiting Exoplanet Survey Satellite. I. Correia, Caio Fabio Teixeira. II. Título.

UFCG/CFP/BS

CDU – 520

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Denize Santos Saraiva Lourenço CRB/15-046



FICHA DE AVALIAÇÃO FINAL DE MONOGRAFIA

Discente: Jaqueline Fonseca dos Santos

Título do Trabalho: Astronomia hoje: Um roteiro para
caracterização de exoplanetas descobertos na Missão
TESS usando a linguagem Python

Orientador: Caio Fabio Teixeira Correia

Membro 1 da Banca Examinadora: João Maria da Silva

Membro 2 da Banca Examinadora: José Amaro Neto

Itens avaliados	Orientador(a)	Membro 1	Membro 2
Trabalho escrito (Nota de 0,0 a 10,0 - Peso 5)	10,0	10,0	10,0
Apresentação oral (Nota de 0,0 a 10,0 - Peso 3)	10,0	10,0	10,0
Desempenho na Arguição (Nota de 0,0 a 10,0 – Peso 2)	10,0	10,0	10,0

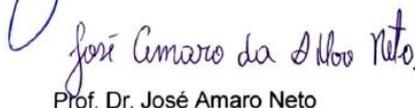
NOTA FINAL: A nota final será calculada pela média aritmética das notas finais de
cada membro da banca.

Observações: **A discente foi aprovada com média final 10,0**

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Caio Fabio Teixeira Correia


Prof. Dr. João Maria da Silva


Prof. Dr. José Amaro Neto

Cajazeiras/PB, 18 de julho de 2024.

À Jaqueline de 9 anos, que era apaixonada pela ciência e sabia que não havia possibilidade de seguir outro caminho. À de 19 anos, que desistiu do curso porque, em meio às dificuldades, sentiu mais dor do que amor pela vida. E, por fim, à de 23 anos, que provou às duas versões anteriores que tudo é possível quando se ama o suficiente.

Não explicar a ciência me parece perverso. Quando alguém está apaixonado, quer contar a todo mundo.
Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao Universo, por ser tão lindo e incrível de tal forma que fez da minha vida um caminho para estudá-lo.

Aos meus pais, Bonifácio e Carmelita, que nunca questionaram minhas escolhas e fizeram minha trajetória muito mais colorida e feliz, sabendo que os tinha comigo.

À minha irmã, Júlia, por sempre confiar em mim acima de qualquer pessoa e acreditar, antes de qualquer outra, que eu conseguiria.

Aos meus familiares que sempre confiaram na minha capacidade e sempre comemoraram minhas vitórias como se fossem deles. Pelas palavras de carinho, pelos conselhos e até pelos puxões de orelha. Em especial aos meus primos Igor e Vinícius, cujos ensinamentos e trocas me fizeram alguém muito mais consciente. Sou grata por tê-los nessa caminhada.

Ao meu orientador, Caio Correia, por ter aceito desde o início o convite para me acompanhar nessa etapa final e não mediu esforços para me ajudar, sendo paciente e solícito em todas as fases deste trabalho. Sem seus ensinamentos eu certamente não teria chegado até aqui, muito obrigada por confiar em mim.

Aos meus colegas, que estiveram comigo desde 2018.1, bem como aos amigos que fiz ao longo do curso: Thalles, Thatiane, Felipe, Carlos, Emily, Hianne, Luciana. Com vocês, a faculdade se tornou um local muito melhor. Obrigada pelos momentos, eventos e risadas.

À quem sempre falou de ciência comigo e me ajudou a ver ainda mais beleza no universo: José Felipe.

À Izabel, que dividiu o curso, o apartamento e a vida comigo. Por todos os momentos, pela amizade, pelos conselhos, pelo companheirismo e pela confiança. Você sempre será minha irmã mais velha.

Aos amigos maravilhosos que a vida me deu, que estiveram comigo em todos os momentos que precisei, que sempre acreditaram em mim e me encheram de esperança, que confiaram no meu potencial e enxergaram esse dia antes que eu pudesse fazer isso: Renan, Liana, Pedro, Renata, Nágela, Danielly, Amanda, Kelly e Letícia. Vocês são a certeza de que amizade verdadeira existe.

Aos meus professores durante esse percurso: João Maria, Gustavo, Douglas, Heydson, Diego. Vocês representam todas as qualidades que um profissional poderia ter. O curso não seria o mesmo sem as contribuições de cada um de vocês.

Ao preceptor da Residência Pedagógica, José Amaro Neto, que dividiu experiências, conhecimentos e uma sala de aula comigo. Obrigada por todos os ensinamentos.

E a todos em especial que estiveram comigo ao longo desses anos e participaram, direta ou indiretamente, de tudo o que me tornei ao longo do caminho. Muito obrigada!

RESUMO

A pesquisa em astronomia atualmente é populada por diversas missões de levantamento de dados, como a missão espacial TESS – *Transiting Exoplanet Survey Satellite*, cuja missão principal é encontrar exoplanetas através do método de trânsito. Estes dados são disponibilizados em catálogos virtuais próprios ou agregados por agências de fomento à pesquisa, como é o caso do *Encyclopaedia of exoplanetary systems* e o *Exoplanet Follow-up Observing Program* (ExoFOP), que foram utilizados nesta pesquisa. Para acessar, analisar e processar eficientemente tais bancos de dados para solucionar problemas relativos à astronomia, em especial a exoplanetologia, faz-se necessário o uso de métodos computacionais para o tratamento estatístico e visualização dos resultados. Desta forma, foi desenvolvido um código na linguagem de programação Python para analisar as curvas de luz de estrelas com exoplanetas descobertos pelo método de trânsito e pela missão espacial TESS, a fim de obter três parâmetros dos exoplanetas: período orbital, semi-eixo orbital e raio planetário, em conjunto com dados da estrela hospedeira, como massa e raio, obtidos através de outros métodos e missões de levantamento. Utilizando princípios básicos de física e matemática, como a 3ª Lei de Kepler e o cálculo da área de um círculo, foi possível determinar tais parâmetros em boa concordância com a literatura, que usam mais variáveis para modelar os sistemas observados. De modo geral, as estrelas selecionadas para observar as curvas de luz foram estrelas sem variabilidade intrínseca, com exoplanetas maiores que a Terra, mas não tão massivos quanto Júpiter, o que revelou um conjunto de cinco exoplanetas de variados tipos: super-Netunos, mini-Netunos e super-Júpiteres quentes. Como resultado inédito, foi obtido o semi-eixo maior do exoplaneta 1173 b, no valor de 0.07034 UA. O presente resultado comprova a eficácia da metodologia adotada de utilizar ciência computacional, demonstra a facilidade de acesso e verificação de dados científicos e como modelos simples podem atuar como facilitadores do entendimento da pesquisa contemporânea.

Palavras-chave: Exoplanetas; Método de trânsito; Parâmetros físicos e orbitais; Python; TESS.

ABSTRACT

Research in astronomy is currently populated by several survey missions like TESS – Transiting Exoplanet Survey Satellite space mission, whose main mission is to find exoplanets through the transit method. Such data are made available in their own virtual catalogs or aggregated by research funding agencies, such as the Encyclopaedia of exoplanetary systems and the Exoplanet Follow-up Observing Program (ExoFOP), which were used in this research. To efficiently access, analyze and process such databases to solve problems related to astronomy, especially exoplanetology, it is necessary to use computational methods for statistical treatment and visualization of results. In this way, a code was developed in the Python programming language to analyze the light curves of stars with exoplanets discovered by the transit method and by the TESS space mission, in order to obtain three parameters of the exoplanets: orbital period, semi-axis major and planetary radius, along with data on the host star, such as mass and radius, obtained through other methods and survey missions. Using basic principles of physics and mathematics, such as Kepler's 3rd Law and the calculation of the area of a circle, it was possible to determine those parameters in good agreement with the literature, which use more variables to model the observed systems. In general, the stars selected to observe the lightcurves were stars without intrinsic variability, with exoplanets larger than Earth, but not as massive as Jupiter, which revealed a set of five exoplanets of varying types: super-Neptunes, mini - Neptunes and hot super-Jupiters. As a new result, the semi-major axis of the exoplanet 1173 b was obtained, with a value of 0.07034 AU. This result proves the effectiveness of the adopted methodology of using computational science, demonstrates the ease of access and verification of scientific data and how simple models can act as facilitators of understanding contemporary research.

Keywords: Exoplanets; Physical and orbital parameters; Python; TESS; Transit method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ILUSTRAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DA 1ª LEI DE KEPLER.....	19
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DA 2ª LEI DE KEPLER.....	20
FIGURA 3 – SIMULAÇÃO DA OSCILAÇÃO DE UMA ESTRELA E MEDIÇÃO ASTROMÉTRICA.....	28
FIGURA 4 – CURVA DE VELOCIDADE RADIAL DA ESTRELA 51 PEGASI.....	29
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE MICROLENTE GRAVITACIONAL.	31
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DE UM FILME DE QUATRO EXOPLANETAS EM ÓRBITA DA ESTRELA HR 8799.....	32
FIGURA 7 – TRÂNSITO DE UM EXOPLANETA EM FRENTE À SUA ESTRELA HOSPEDEIRA.....	33
FIGURA 8 – O MÉTODO DE TRÂNSITO UTILIZA CURVAS DE LUZ PARA DETECÇÃO DE EXOPLANETAS.....	33
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DE COMO UM OBSERVADOR EXTERNO VERIA O TRÂNSITO DE UM EXOPLANETA.....	34
FIGURA 10 - HD 209458 B, MOSTRANDO O FLUXO MEDIDO VERSUS TEMPO.....	35
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DO TELESCÓPIO ESPACIAL TESS.....	36
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO CAMPO DE VISÃO DE UMA CÂMERA DO TESS, BEM COMO SEU CONJUNTO DE 4 CCDS.....	37
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DA TRAJETÓRIA DO TRANSITING EXOPLANET SURVEY SATELLITE.....	38
FIGURA 14 – COMPARATIVO ENTRE OS CAMPOS DOS SATÉLITES KEPLER (REGIÃO LARANJA) E TESS (REGIÃO AZUL).....	39
FIGURA 15 – ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS DE 2 SEGUNDOS PARA PRODUZIR OS TPFs E AS FFIS DE 30 MINUTOS.....	41
FIGURA 16 – PRODUTO DE DADOS FOTOMÉTRICOS.....	42
FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO DAS MASSAS E SEMI-EIXO MAIOR DE EXOPLANETAS DETECTADOS PELO MÉTODO DE TRÂNSITO ATÉ MARÇO/2024.....	44
FIGURA 18 – EXEMPLO DE ESTRELA VARIÁVEL ENCONTRADA NA AMOSTRA (TOI 1135 NA TABELA 2).....	48
FIGURA 19 – EXEMPLO DE ESTRELA (TOI 2015 NA TABELA 2) ENCONTRADA NA AMOSTRA.....	49
FIGURA 20 – EXEMPLO DE ESTRELA (TOI 4010 NA TABELA 2) ENCONTRADA NA AMOSTRA COM PRESENÇA DE MÚLTIPLOS TRÂNSITOS.....	49
FIGURA 21 – ILUSTRAÇÃO DA PERIODIZAÇÃO DO TRÂNSITO PARA O TIC 232967440.....	55
FIGURA 22 - CURVA DE LUZ GERADA A PARTIR DOS COMANDOS ANTERIORES.....	61
FIGURA 23 – DETERMINAÇÃO DO PERÍODO APROXIMADO A PARTIR DO PERÍODO ESTIMADO.....	63
FIGURA 24 – GRÁFICOS INTERATIVOS GERADOS.....	66
FIGURA 25 – PERIODOGRAMA FINAL.....	67

FIGURA 26 – PERIODOGRAMA UTILIZADO PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO.....	71
FIGURA 27 – PERIODOGRAMA DA ESTRELA TOI 1134.....	73
FIGURA 28 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1173 B.....	73
FIGURA 29 – PERIODOGRAMA DA ESTRELA TOI 1728).....	74
FIGURA 30 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1728 b.....	75
FIGURA 31 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA 2134 b.....	76
FIGURA 32 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 2134 b.....	77
FIGURA 33 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA TOI 2000 b.....	78
FIGURA 34 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 2000 b.....	78
FIGURA 35 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA TOI 1130 c.....	79
FIGURA 36 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1130 c.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO SITE EXOPLANET.EU PARA DETECTAR ESTRELAS CATALOGADAS NA MISSÃO TESS.....	49
TABELA 2 – DADOS OBTIDOS COM O AUXÍLIO DO EXOFOP, SOBRE OS PARÂMETROS JÁ MENCIONADOS.....	51
TABELA 3 - LISTA DE REFERÊNCIAS UTILIZADAS PARA EXTRAÇÃO.....	55
TABELA 4 – RESULTADO DOS PARÂMETROS ENCONTRADOS DA AMOSTRA E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 LEIS DE KEPLER.....	20
2.2 EXOPLANETAS.....	26
2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE EXOPLANETAS.....	31
2.4 MÉTODO DE TRÂNSITO.....	36
2.5 MISSÃO TESS.....	40
2.6 DADOS DO TESS.....	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 SELEÇÃO DA AMOSTRA.....	46
3.2 COLETA DE DADOS.....	49
3.3 SOFTWARES UTILIZADOS.....	57
3.3.1 <i>Lightkurve</i>	58
3.3.2 <i>Astropy</i>	58
3.3.3 <i>Matplotlib</i>	59
3.4 PROPRIEDADE DO EXOPLANETA – PERÍODO.....	59
3.5 PROPRIEDADE DO EXOPLANETA – RAIOS.....	61
3.6 CÓDIGO PARA OBTER O PERÍODO ORBITAL DO EXOPLANETA.....	63
3.7 CÓDIGO PARA OBTER O RAIOS DO PLANETA.....	73
3.8 SEMI-EIXO MAIOR.....	75
3.9 ERRO RELATIVO.....	76
3.10 CÓDIGO DO ERRO RELATIVO.....	76
4 RESULTADOS	78
4.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.....	86
5 CONCLUSÃO	88
6 REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

O ato de olhar para cima e imaginar o que pode existir além da percepção humana não é uma atitude exclusiva da sociedade contemporânea: é uma indagação ancestral que acompanha a humanidade desde seus primórdios. Esta busca pelo entendimento do cosmos está intrinsecamente ligada aos anseios e dúvidas acerca do que poderia existir além da escala macroscópica. Não por acaso, atualmente dispõe de inúmeras sondas espaciais, telescópios e missões com um objetivo singular: compreender a origem do universo, mapeá-lo e descobrir o que pode existir nas fronteiras além do planeta Terra e do Sistema Solar.

Desde então, inúmeras descobertas têm sido acrescentadas ao grande leque do conhecimento científico, dentre elas, a existência de planetas distantes parecidos com a Terra, chamados de exoplanetas ou planetas extrassolares. Fato este que revolucionou o entendimento sobre o cosmos, além de despertar questionamentos, confusões e ainda mais a vontade de explorar esses objetos, sob diferentes perspectivas (Lopes, 2014).

A descoberta de planetas extrassolares tem sido alvo de diversos estudos, além de ser tema de debates na comunidade científica. O físico americano Michio Kaku fez jus a essa descoberta citando-a em uma de suas obras, intitulada *O futuro da humanidade*: “Ao ouvir a notícia estarrecedora de que, pela primeira vez, fora encontrado um planeta na órbita de uma estrela distante. Essa descoberta permitia aos astrônomos provarem a existência de planetas além do nosso Sistema Solar.” (Kaku, 2019, p 23). Essa frase representa o primeiro passo de uma longa caminhada em busca de outros mundos fora do Sistema Solar ou, como são chamados hoje em dia, os exoplanetas.

Uma figura que contribuiu significativamente para essas discussões foi o filósofo, matemático e teólogo italiano Giordano Bruno, morto pela Inquisição da Igreja Católica em meados do século XVI. Ele acreditava que o Sistema Solar não era o único existente. Para Giordano, o cosmos era composto de outros corpos planetários, possivelmente até habitáveis. Essa visão foi considerada uma afronta ao habitual pensamento da época, uma vez que a Igreja possuía controle e influência sobre a sociedade e, conseqüentemente, sobre o que se sabia de ciência. Ainda assim, Giordano compactuava com as ideias de Nicolau Copérnico, que defendia a existência de tais ideias revolucionárias para a época e lugar, o que levou Bruno à sua triste morte na fogueira (Dos Santos, 2019; Lopes, 2014).

Essas discussões perduraram por muitos séculos, mas, à medida que a ciência progride, novas descobertas são feitas. Com o advento dessas evidências, tem-se, na maioria das vezes,

uma mudança de paradigma. A natureza vai se mostrando ao passo em que revolucionamos nossas teorias e os instrumentos de pesquisa, como aconteceu com a chegada do telescópio. Essa ferramenta foi essencial para se descobrir um mundo completamente estranho àquela época, quando o astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564 – 1642) apontou-o para o céu e descobriu as luas de Júpiter, as crateras da lua e as manchas solares.

A partir dessas observações, percebeu-se que pesquisadores que o antecederam não estavam errados: há outros mundos vagando pelo cosmos. Segundo Bernardes (2013), já em 1564 o italiano Giordano Bruno sugeria a existência de outros planetas: “Existem, pois, sóis inumeráveis e infinitas terras, que giram à volta daqueles sóis, como estes sete giram em torno deste Sol que nos é vizinho [...] A razão é que nós vemos os sóis que são os maiores, antes grandíssimos corpos, mas não vemos as terras, que por serem corpos muitos menores, são invisíveis (...)” (Bruno, 1978). Em razão dessas descobertas, formulou-se um novo modelo de Universo: éramos habitantes de um planeta, compartilhando com mais 7 outros a órbita de uma mesma estrela.

O conjunto desses planetas, suas respectivas luas, cometas e o próprio Sol é o que chamamos de Sistema Solar. Ainda que aparentemente inédito para a época, esse conhecimento não é novidade, pois desde a Grécia Antiga já havia pensamentos similares a tais ideias que pressupunham a existência de um Sistema Solar (Caniato, 1994) embora não houvesse tamanha precisão. No entanto, a noção do lugar em que estamos inseridos induz a curiosidade e a busca por sistemas semelhantes, em busca de respondermos questões que desde os primórdios da humanidade são discutidas.

Atualmente, já foram catalogados cerca de 6705 exoplanetas (ou candidatos), até o dia 02 de julho de 2024 (TEAM, 2024). Esses exoplanetas também formam sistemas multiplanetários, ou seja, com dois ou mais planetas catalogados.

Há alguns métodos utilizados para catalogar esses objetos, sendo alguns deles: velocidade radial, que embora seja uma das técnicas mais utilizadas, não permite determinar o raio do exoplaneta, por exemplo, além de ser sensível apenas a planetas maiores e mais próximos da sua hospedeira; imageamento direto, onde obtém-se a imagem do planeta.

No entanto, até o momento, foi aplicado com sucesso a apenas algumas dezenas dos mais de 5000 exoplanetas conhecidos. Isso ocorre pois, além de estarem muito distantes e não emitirem luz própria, a radiação emitida pelas estrelas ofusca o brilho muito menor dos respectivos exoplanetas, dificultando sua visualização; astrometria, que determina a componente do deslocamento da estrela hospedeira devido à gravidade de um planeta em órbita, entretanto, necessita de dados muito precisos por vários anos seguidos, e ainda assim, capta

apenas planetas de maiores dimensões e mais próximos da estrela; as microlentes gravitacionais, que se trata de um fenômeno raríssimo, em que a observação de uma pequena variação no brilho de uma hospedeira distante indica um efeito de lente gravitacional, sugerindo a presença de um planeta em sua vizinhança e, por fim, o trânsito planetário, no qual um exoplaneta cruza a frente da estrela em relação à nossa linha de visada, sendo um dos métodos mais eficazes (Perryman, 2018; Siffert, 2022) e que será abordado eminentemente a seguir.

Nesse presente trabalho, será analisado uma forma de detecção de exoplanetas, conhecido como método de trânsito, utilizado por diversas missões terrestres e espaciais, como a CoRoT, sendo lançado em 2006 e pioneiro na coleta de curvas de luz de milhares de estrelas, chegando a detectar 34 exoplanetas confirmados (Baglin et al., 2008), a missão Kepler (Borucki et al., 2010) lançada em 2009, que detectou milhares de exoplanetas durante a sua missão, após ser estendida por anos e só recentemente ter sido aposentada, contribuindo para a descoberta de exoplanetas com tamanhos comparáveis ao da Terra (Kjeldsen, Bedding; 2011) e o TESS (Ricker et al., 2015), que deu continuidade ao legado das missões anteriores e contribuiu de maneira significativa para uma vasta base de dados, e por diversos telescópios na Terra.

Embora esta alternativa necessite de condições bastante especiais de orientação da órbita do exoplaneta, ela permite determinar diversos parâmetros do objeto em questão, tais como o período orbital (tempo de duração de uma translação completa em torno da estrela) e o raio, pois este é proporcional à diminuição do brilho. Quanto mais próxima da estrela é a órbita do planeta, menor é o seu período orbital e mais frequentes serão os trânsitos, o que faz com que esse método de detecção preferencialmente detecte planetas grandes que orbitem próximo a estrelas com pouca luminosidade, sendo responsável por pelo menos 23% das descobertas realizadas até anos atrás (Amorim, Santos; 2016) contribuindo, assim, para o crescimento dessa área de estudos, tendo um aumento significativo dessas estatísticas atualmente, como será mostrado na seção referente ao método de trânsito.

Na cronologia das descobertas realizadas nesse âmbito da astronomia, a investigação dos exoplanetas ainda se encontra no início. No entanto, em duas décadas e meia de pesquisa seus resultados obtiveram um crescimento exponencial. Em setembro de 2010, era reportado por Cumming (2010) através do “*Extrasolar Planets Encyclopedia*” um total de 469 planetas confirmados. Já em julho de 2024, esse número está próximo dos 6000 (TEAM, 2024). Isso ilustra a magnitude e potencial dessa investigação, culminando nas pesquisas contemporâneas da astronomia, que envolvem trabalhar com grandes bancos de dados de milhões de estrelas, contendo os mais variados catálogos, que são disponibilizados de forma remota em servidores mantidos por enormes agências de pesquisa espacial, como a NASA, ESA, JAXA etc.

Os dados obtidos através dessas missões são disponibilizados publicamente, o que torna a pesquisa nessa área mais acessível, especialmente no âmbito acadêmico. O processamento desses dados resulta em um catálogo com milhares de exoplanetas (possíveis candidatos e confirmados), usando os mais variados métodos de detecção. As missões de levantamento, como é o caso do TESS, geram uma grande quantidade de informações que podem ser eficientemente analisadas através de linguagens de programação, que facilitam os estudos sobre exoplanetas gerando imagens, gráficos e até resolução de cálculos referentes à exoplanetologia.

Para o desenvolvimento deste trabalho, levando em consideração o vasto acervo disponível, utilizou-se Python, uma linguagem de programação para a qual muitas agências estão migrando e que se mostrou eficaz no que se refere a processamento de dados, bem como criando pacotes de acesso livre às suas ferramentas. Com o aumento significativo da disponibilidade de informações e o rápido desenvolvimento de tecnologias para análise (Domingues et al. 2020; Lopes et al., 2021), torna-se cada vez mais fácil contribuir com pesquisa de base em diferentes áreas da ciência, que exijam uma análise mais aprofundada, especialmente as que contém um enorme acervo, como é o caso da astronomia.

1.1 JUSTIFICATIVA

A exoplanetologia, como descrito na introdução, é um campo em ascensão. Ao longo deste trabalho, há diversas evidências do crescimento exponencial dessas descobertas. Para alunos de graduação, especialmente em Física, que se alegram com a iminência de pesquisar áreas relacionadas diretamente à ciência, existe um campo vasto e promissor que possibilita a realização desse feito.

Os dados fornecidos pela missão TESS são o alicerce de diversos estudos exoplanetários. Embora a técnica de trânsito encontre mais facilmente planetas gigantes de períodos curtos, o maior número de detecções foi de super-Terras e mini-Netunos, que será mostrado ao longo deste trabalho.

Apesar destes avanços, ainda não se tem uma amostra de objetos suficiente para se definir, com uma medida precisa, diversas propriedades desses corpos celestes. Por exemplo, apesar de podermos inferir a frequência de Júpiteres quentes e planetas rochosos que orbitam estrelas do tipo solar na galáxia (Petigura et al., 2018) e utilizarmos os dados para validação dos modelos de formação, bem como de migração planetária (Benz et al., 2014), essas questões são constantemente revisitadas cada vez que novos exoplanetas são encontrados. Mais do que isso, ainda existem divergências significativas entre estimativas de taxas de ocorrência de exoplanetas em função de sua classificação, das propriedades de suas estrelas hospedeiras e do método de detecção utilizado (Winn, 2018). Portanto, a continuidade das buscas por novos sistemas planetários é de extrema importância para que a comunidade solucione estas e outras questões referentes a estes objetos.

Há um grande acervo literário acumulado dos parâmetros encontrados dessas estrelas observadas, o que possibilita estender, através da modelagem do trânsito, os parâmetros físicos e orbitais desses exoplanetas, a partir dos parâmetros físicos já obtidos das estrelas hospedeiras. Para isso, será usado a potencialidade da linguagem de programação, recurso que revolucionou o estudo de ciência de dados e possibilitou, desde pesquisadores experientes a iniciantes na pesquisa, a realização de pesquisa de ponta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em demonstrar como dados científicos de missões espaciais atuais podem ser utilizados para caracterizar objetos extrassolares, utilizando o conhecimento de um curso de graduação nas áreas de física e exatas, através da programação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar ciência de dados com os conhecimentos obtidos em um curso de licenciatura em Física, demonstrando capacidade para realizar pesquisa de ponta em áreas que antes só eram possíveis para astrônomos e cientistas;
- Determinar o período e semi-eixo maior da órbita, assim como o raio de exoplanetas descobertos pelo método de trânsito pela missão espacial TESS utilizando a linguagem de programação Python, com uma modelagem simplificada da órbita e da estrela e planeta envolvidos;
- Comparar os dados obtidos através deste modelo simplificado com o que se é verificado na literatura com os modelos mais completos e atuais;
- Disponibilizar para estudantes e entusiastas da ciência um roteiro que pode ser reproduzido para determinar parâmetros de objetos astronômicos de mesma natureza.

Portanto, o presente trabalho está dividido como segue: no capítulo 2, apresenta-se o Referencial Teórico e princípios básicos aqui utilizados; no capítulo 3 se discute a Metodologia utilizada, com subseções inseridas a fim de facilitar a compreensão; no capítulo 4 estão os resultados da pesquisa, finalmente no capítulo 5 tem-se as discussões e perspectivas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 LEIS DE KEPLER

Uma vez que o acesso aos dados mencionados pode ser facilmente obtido, pode-se realizar a caracterização desses objetos por meio dos sinais de trânsitos que foram detectados desde o século passado, sendo possível definir o período orbital, como já mencionado, que é determinado a partir desses sinais regulares. Além disso, a determinação do semi-eixo maior da órbita é uma consequência direta da Terceira Lei de Kepler, $a^3 \propto P^2$; o raio, por sua vez, pode ser obtido a partir do raio da estrela, se esse for conhecido e, graças ao grande banco de dados disponíveis atualmente, isso é possível. Para isso, é necessário compreender de onde vieram os conceitos, leis e teorias responsáveis que permitem o cálculo desses parâmetros, além de nortear as pesquisas realizadas nesse sentido.

Embora a ciência seja construída a partir das contribuições de uma série de pessoas, algumas delas acabam por ter maior reconhecimento, seja durante sua vida ou mesmo após a morte. Uma dessas personalidades foi o astrônomo italiano Johannes Kepler (1571 – 1630), que foi sucessor dos estudos do dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601), importante astrônomo observacional, que construía seus próprios instrumentos a fim de observar estrelas e planetas, realizando registros com a maior precisão possível para observações sem auxílio de instrumentos ópticos, como o telescópio, que ainda não havia sido inventado. Esses dados coletados por Brahe serviram para construir uma ideia sólida e abrangente sobre a dinâmica celeste. Sendo assim, após sua morte, Johannes Kepler estudou e analisou cuidadosamente os dados coletados por mais de 20 anos de observação de seu antecessor, incluindo um grande volume de dados da posição e brilho do planeta Marte.

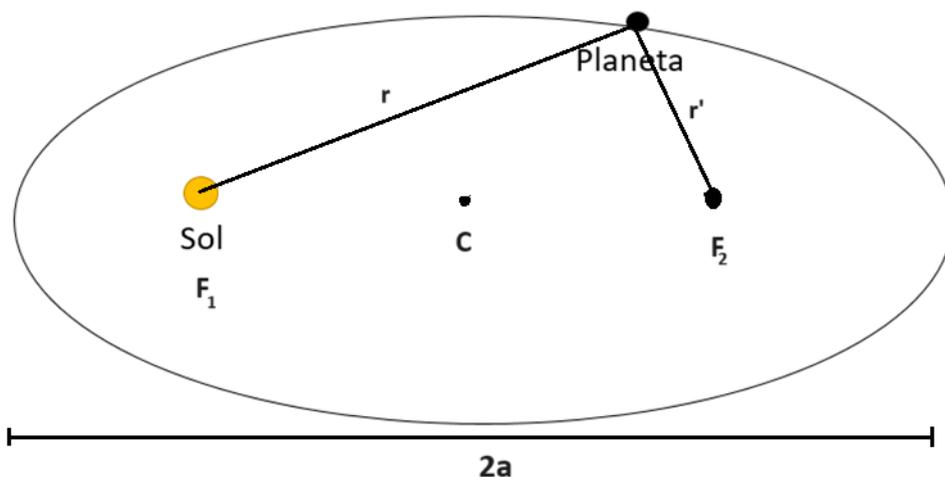
Esses estudos fizeram Kepler inicialmente estabelecer a órbita dos planetas como sendo circulares, embora tivesse tido alguns problemas para corroborar o movimento de Marte, uma vez que este planeta tinha uma órbita mais elíptica e o desvio entre previsão e observação era maior do que a margem de erro das observações colhidas. Alguns anos se passaram até que Kepler consertasse essas análises de forma a ajustar mais satisfatoriamente seus dados observacionais. A partir disso, cunhou três das leis mais importantes da Astronomia.

As Leis de Kepler constituem um elemento fundamental não apenas na análise dos corpos celestes dentro Sistema Solar, mas também na compreensão da mecânica orbital de astros e objetos além do nosso sistema. Se forem derivadas a partir dos princípios da Mecânica Clássica e da Lei da Gravitação Universal de Sir Isaac Newton, que vieram depois, essas leis

forneem um arcabouço teórico crucial para investigações dinâmicas relacionadas a corpos planetários localizados em sistemas estelares distintos do nosso, o que se reveste de significativo interesse no estudo de exoplanetas. Uma descrição detalhada dessas leis é apresentada na literatura especializada (Saraiva et al., 2014; Horvarth, 2008):

1ª Lei (ou Lei das Órbitas): Os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, onde o Sol está localizado em um dos focos da elipse. A Primeira Lei de Kepler é uma consequência do fato da força gravitacional ser inversamente proporcional ao quadrado da distância (ou seja, quanto maior a distância entre os corpos, menor a atração gravitacional entre eles), tal que as trajetórias fechadas possíveis nesse cenário são circulares ou elípticas. A Figura 1 demonstra a representação da 1ª Lei de Kepler ilustrando a órbita de um planeta em torno do Sol.

FIGURA 1 – ILUSTRAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DA 1ª LEI DE KEPLER.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

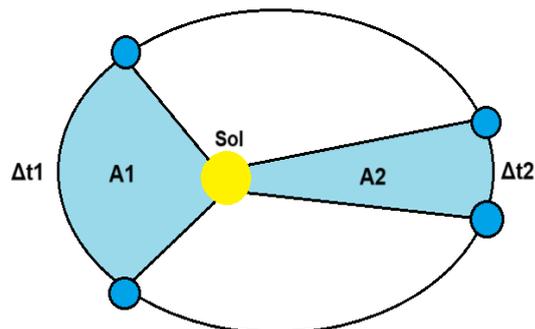
Além disso, sabe-se que, em uma elipse, a soma das distâncias entre um ponto qualquer na curva aos focos da elipse é constante, expressa pela equação $r + r' = 2a$, onde a representa o semi-eixo maior da elipse e $r + r'$ representa a distância dos dois pontos. No contexto de uma órbita planetária, o semi-eixo maior da elipse corresponde à distância média entre o planeta e sua estrela central, no caso do Sistema Solar, trata-se da distância média entre o Sol e a Terra, por exemplo (Horvart, 2008).

Outro conceito importante para a compreensão dessa lei é o de excentricidade das elipses, dada pela razão da distância entre os dois focos e seu semieixo maior (vide Figura 1).

A excentricidade de uma elipse consegue demonstrar o quão diferente de um círculo é a órbita descrita (Saraiva et al., 2014), como da Terra, por exemplo, que tem uma excentricidade próxima a 0.

2ª Lei (ou Lei das Áreas): A linha que une um planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais. Isso implica que um planeta se moverá mais rapidamente quanto mais próximo estiver do Sol, e mais lentamente quando estiver distante. A Segunda Lei é decorrente da lei da conservação do momento angular. Sendo a taxa de variação instantânea da área varrida pelo planeta em relação ao tempo uma constante, isso implica a mesma quantidade de área coberta independente do momento em que se observa esse movimento. A Figura 2 apresenta uma ilustração da 2ª Lei de Kepler ilustrando diferentes áreas correspondentes a diferentes trechos do plano orbital do planeta.

FIGURA 2 - ILUSTRAÇÃO DA 2ª LEI DE KEPLER.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Então a velocidade orbital não é uniforme, variando de forma regular. Quando o planeta está mais próximo de sua hospedeira (no caso de Kepler, ele considerou o Sol) ele se move com uma velocidade maior, em contrapartida, quando encontra-se mais distante, se move mais devagar, o que é possível observar na Figura 2.

3ª Lei (ou Lei dos Períodos): A Terceira Lei de Kepler diz que o tempo que um planeta leva para completar uma volta ao redor do Sol está relacionado ao tamanho da órbita desse planeta da seguinte forma:

$$T^2 = K \cdot a^3 \quad (1)$$

sendo T o período orbital, a o semieixo maior da órbita e K uma constante que depende da massa do corpo central (que no caso do Sistema Solar, corresponde à massa do Sol). Em termos simples, isso significa que planetas que estão mais distantes do Sol (ou da estrela hospedeira) levam mais tempo para completar uma volta que os que estão mais próximos, pois além de precisarem percorrer uma distância maior eles têm menor velocidade.

A Terceira Lei pode ser demonstrada a partir da dedução das leis de Newton para a dinâmica, utilizando a Lei da Gravitação Universal para um planeta com órbita circular, de forma que o raio r da órbita circular é o próprio semieixo maior a ($r = a$),

$$F_G = \frac{GM_1m_2}{r^2} \quad (2)$$

Onde:

G - Constante gravitacional determinada por Isaac Newton;

M_1 - massa da estrela hospedeira;

m_2 - massa do planeta;

r - raio da órbita.

Para encontrarmos a Terceira Lei de Kepler a partir da eq. 2, será considerado os seguintes passos:

- Sabendo-se que a força gravitacional é a responsável por manter o planeta em sua órbita, logo, a força gravitacional faz o papel da força centrípeta, que pode ser escrita como:

$$F_c = \frac{m_2v^2}{r} \quad (3)$$

- Igualando as equações (2) e (3), tem-se que:

$$\frac{GM_1m_2}{r^2} = \frac{m_2v^2}{r}$$

- Simplificando a massa do planeta e o raio da órbita, chega-se à equação:

$$\frac{GM_1}{r} = v^2 \quad (4)$$

- Além disso, a velocidade pode ser expressa em termos do período orbital e o raio da órbita. Sabendo-se que um planeta percorre uma órbita completa, consideramos a circunferência dessa órbita, onde $c = 2\pi r$ e T é o período orbital. Portanto, para determinar a velocidade, tem-se:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (5)$$

- No próximo passo, substitui-se a expressão da velocidade na eq. 4, já demonstrada anteriormente:

$$\frac{GM_1}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2$$

- Quando se isola os termos T e r , tem-se:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_1} r^3 \quad (6)$$

que é o equivalente à eq. (1), lembrando que na órbita circular o raio é o semieixo maior e a constante K é o termo .

Embora numa órbita elíptica de semieixo maior a , a velocidade seja variável, o período orbital será idêntico ao de um planeta com órbita circular com raio de mesmo tamanho. A equação (6) ainda representa a forma simplificada da dedução da 3ª Lei de Kepler, pois ela leva em consideração o fato de o Sol possuir uma massa muito maior que a dos planetas, enquanto na realidade os planetas orbitam em torno do centro gravitacional do Sistema Solar, o que é uma boa aproximação para o interesse deste trabalho.

2.2 EXOPLANETAS

Apesar da definição de planeta hoje ser bem aceita pela comunidade científica, tal conceito só tornou-se possível graças à invenção e aperfeiçoamento do telescópio. Apenas depois de conhecer a vizinhança da Terra em maior detalhe, através das observações, surgiu a necessidade de refinar essa definição e distingui-la de outros corpos celestes. Por sua vez, à medida que esses conceitos ficaram mais definidos, abriu-se espaço para indagações a respeito da possibilidade de existirem outros sistemas planetários semelhantes.

Desta forma, empregou-se uma nova categoria para esses objetos análoga àquela empregada para os planetas do Sistema Solar, com foco nas teorias contemporâneas de formação planetária. De acordo com essas teorias, os sistemas planetários se originam a partir de uma extensa nuvem de gás e poeira (Armitage, 2020), sugerindo que não deve haver diferenças significativas nas características gerais dos planetas extrassolares em comparação com os planetas conhecidos do Sistema Solar.

No entanto, é imprescindível estabelecer uma distinção entre os diversos tipos de objetos que podem orbitar estrelas. Nesse sentido, em 2003, a Comissão F2 da União Astronômica Internacional definiu exoplanetas, anãs marrons e submarrons como (Des Etangs; Lissauer, 2022):

- (1) **Exoplanetas** – objetos com massa real abaixo da massa limite para a fusão termonuclear de deutério (atualmente calculada em 13 vezes a massa do planeta Júpiter para objetos de metalicidade solar) que orbitam estrelas ou remanescentes estelares (não importa como eles foram formados). A massa mínima necessária para que um objeto extrassolar seja considerado um planeta deve ser igual à utilizada no Sistema Solar;
- (2) **Anãs marrons** – objetos subestelares com massa real acima da massa limite para fusão termonuclear de deutério, não importa como elas se formaram nem onde eles estão localizados;
- (3) **Submarrons anãs** – objetos flutuantes em aglomerados de estrelas jovens com massas abaixo da massa limite para a fusão termonuclear do deutério não são planetas (ou qualquer nome que seja mais apropriado).

Consoante a isso, exoplanetas são corpos que orbitam outras estrelas, fora do Sistema Solar. Assim como o Sol, há bilhões de outras estrelas distribuídas pelo Universo e, orbitando-as, encontram-se esses objetos celestes há muito procurados. Por muito tempo, houve especulações sobre a existência de outros mundos, semelhantes ou até iguais ao nosso.

Quase 400 anos depois da morte de Giordano Bruno, já no século XX, mais especificamente em 1917, ocorreu a primeira evidência observacional de um exoplaneta, através da análise de uma estrela denominada de Estrela de Vaan Maanen (Zuckerman, 2014; NASA, 2023a), porém, sem confirmação, de forma que os primeiros resultados realmente relevantes só foram coletados no início da década de 90, devido ao fato da detecção direta desses corpos exigir condições muito específicas, em razão da diferença de brilho da estrela em relação ao brilho refletido pelo exoplaneta, além de ser necessário considerar a separação angular entre os corpos quando vistos da Terra (Perryman, 2018).

Considerando esses fatos, só foi possível realizar estudos mais concretos nessa área quando métodos alternativos indiretos de detecção começaram a ser utilizados, sendo o primeiro deles o método de velocidade radial, que se baseia na perturbação da estrela causada pelo planeta em órbita, fazendo com que, a partir disso, tornasse possível detectar o primeiro exoplaneta, em 1995 (Perryman, 2018).

Essa descoberta foi uma dentre tantas outras que aconteceram ao longo do século XX, como a detecção do primeiro exoplaneta orbitando uma estrela da sequência principal¹, por Michel Mayor e Didier Queloz, no ano de 1995 (Perryman, 2018), pelo método de velocidade radial. Com essa grande notícia, que lhes rendeu o prêmio Nobel de Física em 2019, desencadeou-se uma intensa busca por sistemas planetários de forma excepcional, principalmente em virtude do desenvolvimento instrumental (Soto, 2020; Monzón, 2021). Tal descoberta, bastante referenciada na literatura, trata-se da detecção do exoplaneta 51 Pegasi b, que orbita uma estrela da sequência principal denominada 51 Pegasi. Este foi o primeiro sistema extrassolar a ser identificado, posteriormente seguido pela descoberta de aproximadamente uma dúzia de candidatos, em 1998 (Marcy, Butler; 1999).

Essas detecções, por sua vez, foram pioneiras e resultaram em uma nova área da astronomia: a exoplanetologia, que se tornou bastante popular até os dias de hoje (Chaisson, McMillan; 2014). Além disso, o avanço tecnológico foi um importante aliado no desenvolvimento desse campo de estudo, uma vez que possibilitou a confirmação de exoplanetas que, até então, só existiam em teoria. Um exemplo disso foi a confirmação tardia

¹ Sequência Principal é uma faixa de estrelas descritas no diagrama de Hertzsprung-Russell, ou diagrama HR. Esse diagrama é um gráfico que relaciona luminosidade e temperatura superficial das estrelas.

da detecção do planeta extrassolar que orbitava a estrela Y Cepheus A, que só aconteceu em 2002, com a tecnologia da época.

A exoplanetologia cresceu tão rapidamente que demorou 3 anos para passar de 4.000 para 5.000 exoplanetas detectados. No entanto, precisou apenas de um ano para chegar a 6.000, marco esse que foi atingido no dia 14 de junho de 2024, o que denota um crescimento exponencial dessa área de estudos, segundo o TEAM (2024).

Esses planetas extrassolares podem orbitar outras estrelas, assim como a Terra orbita o Sol, ou podem estar vagando livremente pela galáxia orbitando o centro desta, sendo denominados, neste último caso, de planetas rebeldes (NASA, 2024a). Até o dia 13 de junho de 2024, foram descobertos 5999 exoplanetas (TEAM, 2024) e dezenas de outros aguardam confirmação, sendo esse número atualizado diariamente, pois muitas missões espaciais ainda recebem dados sobre a busca por esses objetos.

As hospedeiras orbitadas por exoplanetas possuem massa entre 0,1 e $30 M_{\odot}$ ² (Perryman, 2001), enquanto os exoplanetas são classificados a partir de sua massa e diâmetro, mostrando-se em diversas formas: rochosos, como a Terra e Vênus ou ricos em gás, como Júpiter e Saturno. Além disso, podem ser dominados por água ou gelo, ferro ou carbono. Até agora, os cientistas caracterizam os exoplanetas nos seguintes tipos: netunianos, super-Terras, gigantes gasosos ou terrestres (NASA, 2024a).

Os planetas classificados como netunianos são semelhantes (em tamanho) a Netuno e Urano. Além disso, também pode ter uma mistura de interiores, mesmo tendo metais pesados em seu núcleo. Além disso, geralmente possuem atmosferas dominadas por hidrogênio e hélio. Um fato interessante é que estes não foram os únicos exoplanetas detectados com essas características, pois também se descobriu mini-Netunos (menores que Netunos e maiores do que a Terra), objetos peculiares que não são vistos no Sistema Solar.

As Super-Terras, outra classificação de extrassolares, também possuem características únicas, uma vez que estes são mais massivos do que a Terra, mas bem mais leves do que Netuno ou Urano, além de serem compostas por gás, rocha ou até uma combinação de ambos. No entanto, apesar do nome sugerir, essa referência é apenas ao tamanho do planeta, o que não infere necessariamente as mesmas propriedades presentes na Terra que se conhece. Dito isso, essa classificação encontra-se ainda envolta em incerteza, já que não há parâmetros comparativos.

² M_{\odot} diz respeito à massas solares.

Já os gigantes gasosos, outra classe de exoplanetas, são comparáveis a Júpiter e Saturno, compostos principalmente de hélio e/ou hidrogênio. Outra característica destes objetos é que eles podem ser muito maiores do que Júpiter e, além disso, são muito mais próximos das suas estrelas do que qualquer coisa encontrada no Sistema Solar. Devido ao seu tamanho e a sua proximidade com a hospedeira, esses super Júpiteres foram os primeiros exoplanetas a serem detectados pelo método de velocidade radial (que será melhor descrito na próxima seção), pois o efeito de oscilação causado facilita a detecção, uma vez que ele causa uma mudança mensurável no espectro da luz da estrela.

Por fim, os terrestres são exoplanetas do tamanho da Terra, também rochosos, compostos sobretudo de silicato, água e/ou carbono. Têm uma composição volumosa dominada por rocha ou ferro, além de uma superfície sólida ou líquida. Também podem ter atmosferas rochosas, mas isso não chega a ser uma característica crucial para a definição. Portanto, a descoberta desse tipo de planeta extrassolar, principalmente os próximos à sua estrela e com potencial para abrigar água em formato líquido, implicam em uma definição muito conhecida na exoplanetologia, que se trata da zona habitável, ou seja, da capacidade que esses mundos podem ter de serem habitáveis.

Algumas características presentes nessas descobertas norteiam o estudo desses objetos, diferenciando-os dos planetas que conhecemos no nosso próprio Sistema Solar. As propriedades orbitais dos exoplanetas variam amplamente. Cerca de um terço possuem órbitas muito elípticas, com excentricidade maior que 0,3, em comparação com as maiores excentricidades do Sistema Solar, que é cerca de 0,2 para Mercúrio e Plutão, e apenas 0,05 para Júpiter. Mais da metade dos exoplanetas descobertos têm cerca da massa de Júpiter ($0,3 - 3 M_J$) e muitos deles orbitam sua estrela hospedeira muito mais próximo do que Mercúrio orbita o Sol, o que seria em torno de $0,39 \text{ UA}^3$. Outros estão mais longes, cerca de 100 UA da sua anfitriã (Perryman, 2018).

A fim de estudar mais profundamente esses objetos, foram lançadas várias missões de levantamento durante os anos 2000, que serão previamente descritas abaixo:

- Missão CoRoT (Convecção, Rotação e Trânsitos planetários), que foi lançada em 2006 e teve suas contribuições estendidas até o ano de 2012, teve cerca de 32 exoplanetas confirmados e mais de 100 aguardando confirmação (Monzón, 2021). Seus dois

³ UA (Unidade Astronômica) é uma unidade de medida utilizada pelos astrônomos para representar a distância média entre a Terra e o Sol. Ela é definida como 149.597.870,7 km.

objetivos primordiais consistiam em: entender a rotação e a convecção nas estrelas, a partir da sismologia estelar e detectar planetas extrassolares a partir do método de trânsito planetário (Soto, 2020). Depois de lançada, a missão permaneceu ativa até 2012, quando parou de funcionar abruptamente. Apesar dos esforços para recuperá-la, isso não foi possível, o que resultou no fim das suas atividades oficialmente em 2013. Ainda assim, as detecções e acúmulos das curvas de luz das estrelas observadas ficou disponível para a comunidade científica em 2016, possibilitando aos cientistas uma melhor compreensão sobre esses corpos ainda pouco conhecidos (Baglin et al., 2016).

- A Missão Kepler, lançada em 2009, entrou para a história como uma das missões mais bem sucedidas da exploração espacial, cujo objetivo consistia em detectar planetas em outros sistemas estelares. Na sua primeira missão, que durou de 2009 a 2013, observou mais de 150.000 estrelas (NASA, 2024b), que podiam estar localizadas a distâncias entre 500 e 3000 anos-luz da Terra (Flório, 2014). No entanto, devido a problemas técnicos, o telescópio espacial ficou inoperante até o ano de 2014, quando retornou suas atividades sob o novo nome: K2. A segunda parte da missão durou até 2018, resultando na descoberta de, pelo menos, 2800 exoplanetas (NASA, 2024b).
- Missão TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*): lançado em 2018. O TESS é conhecido como sucessor do Kepler, com o objetivo de realizar um levantamento do céu, começando de onde seus antecessores pararam. Essa missão teria um campo de visão maior do que os anteriores, observando até 200.000 estrelas semelhantes ao Sol, numa área 400 vezes maior do que a do Kepler (NASA, 2024b). As estrelas observadas são de 30 a 100 vezes mais brilhantes do que as observadas anteriormente, o que facilita detecção de exoplanetas pelo método de trânsito, permitindo caracterizá-los com observações de acompanhamento, resultando em maior facilidade para determinar parâmetros como massa, tamanho, densidade e até condições atmosféricas do planeta (NASA, 2024). Portanto, a sonda, que percorre uma órbita de 13,7 dias em torno da Terra, está equipada com instrumentos de ponta, como espectroscópios que auxiliam na determinação refinada desses dados (Soto, 2020; Monzón, 2021; Ricker et al, 2014).

Essas detecções são possíveis, pois, na astrodinâmica de um sistema com a presença de um planeta e uma hospedeira, ambos se movimentam ao redor do centro de massa desse sistema. Há um certo “bamboleio” nesse padrão, tornando possível a detecção do planeta

extrassolar a partir de variações sistemáticas da estrela, que podem ser visualizadas a partir do método de astrometria, ou pela velocidade radial.

Outros tipos de dados utilizados para detectar a presença de exoplanetas são os fotométricos, ou seja, que observa apenas a variação do brilho da estrela como um todo, mas não os detalhes do brilho em diferentes faixas de comprimento de onda da luz. Essas metodologias demonstraram bastante eficácia na busca por estes objetos, desde os quais destacamos o método de trânsito planetário, que será utilizado nesse trabalho, motivo pelo qual foi também escolhido.

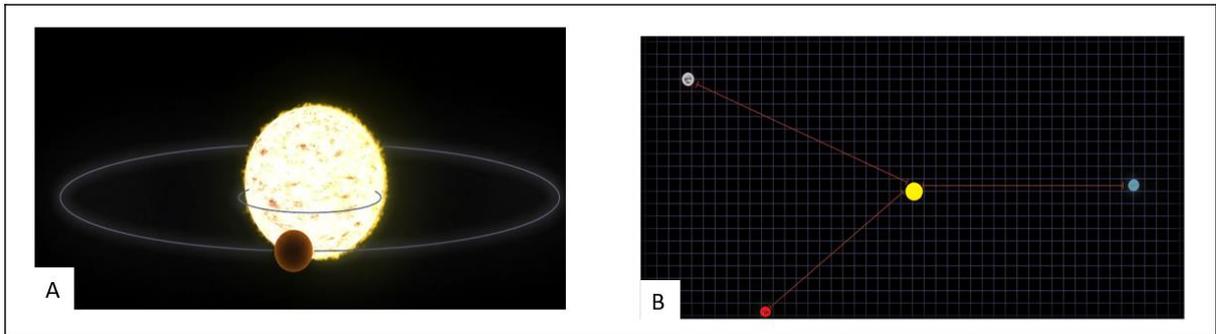
2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE EXOPLANETAS

Atualmente, há um leque de opções referentes à detecção de planetas extrassolares. No entanto, quase todas as alternativas que a atual tecnologia possibilita são detecções indiretas desses objetos. Ou seja, na realidade, procura-se os efeitos que esses planetas causam na sua hospedeira. Alguns métodos mais conhecidos são, como já citados: astrometria, velocidade radial, microlentes gravitacionais, imageamento direto e método de trânsito (Lenchuck et al., 2021). Para esse trabalho, como dito anteriormente, será utilizado apenas o trânsito planetário, no entanto, para melhor compreensão das técnicas existentes e para que o leitor compreenda o motivo pelo qual o trânsito planetário foi escolhido em detrimento dos outros, será brevemente descrito alguns outros métodos existentes.

- **Astrometria:**

Envolve medir a posição de uma estrela em relação a pontos de referência fixos no espaço. A órbita da estrela tem o ângulo do seu semi-eixo maior determinado pela relação entre as massas da estrela e do planeta, pela distância entre o planeta e sua estrela, além de levar em consideração a distância do sistema até a Terra (Perryman, 2001). A Figura 3 ilustra a oscilação de uma estrela e medição astrométrica da posição de uma estrela para detecção de exoplaneta.

FIGURA 3 – SIMULAÇÃO DA OSCILAÇÃO DE UMA ESTRELA E MEDIÇÃO ASTROMÉTRICA.



Fonte: Adaptado de NASA (2022).

Esse método, portanto, observa as modificações de posição da estrela utilizando outras estrelas fixas como referência, como mostrado na Figura 3B. Desse modo, a estrela amarela representada no centro tem sua localização medida em relação as outras três (representadas pelos pontos cinza, azul e vermelho), que não sofrem oscilações ou estas não são visíveis por estarem mais distantes. Quando o planeta é pouco massivo, do tamanho da Terra, por exemplo, o efeito resultante da sua gravidade no movimento da estrela é mínimo, portanto, nesse caso, a astrometria não é a técnica mais adequada para realizar a detecção, uma vez que a oscilação chega a ser tão pequena que praticamente não é percebida (NASA, 2024).

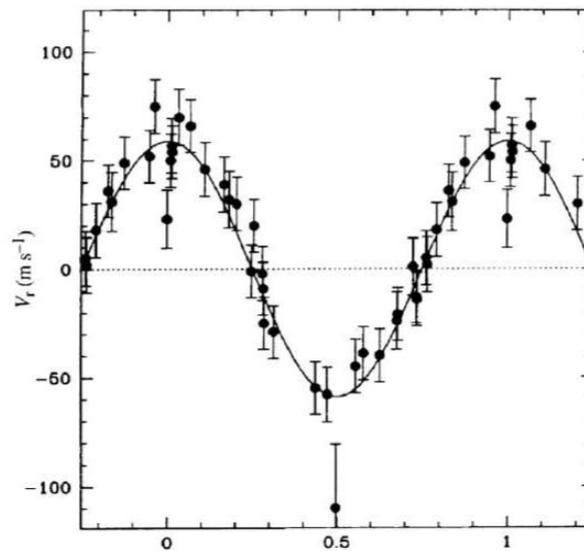
- **Velocidade radial:**

Esse método observa o movimento oscilante de uma estrela causado pela presença de um objeto massivo próximo a ela. A oscilação de uma estrela é percebida, na Terra, pelas variações que afetam a sua cor, em decorrência do efeito Doppler, que é o deslocamento das linhas espectrais do corpo, nesse caso, a estrela (Lenchuck et al., 2021). Isso acontece porque, quando a estrela se aproxima da Terra, as ondas luminosas têm seu comprimento de onda diminuído, pois elas amontoam-se; ao contrário, quando esta se afasta, as ondas luminosas têm seu comprimento de onda aumentado. A leitura do espectro da estrela é capaz de identificar a variação dessa configuração das ondas, o que, por sua vez, terá um desvio para o azul (conhecido como *blueshift*), quando as linhas espectrais estiverem aproximando-se da Terra; ao contrário, o desvio para o vermelho (ou *redshift*) implica que a estrela está se afastando.⁴

⁴ O que é conhecido como Efeito Doppler relativístico.

Os sinais recebidos da estrela que está sofrendo variação podem ser traduzidos de acordo com o gráfico abaixo, onde relaciona-se a velocidade do astro e o tempo. Nesse caso, a Figura 4 relaciona a alteração da velocidade radial da estrela 51 Pegasi, devido a presença do exoplaneta 51 Pegasi b.

FIGURA 4 – CURVA DE VELOCIDADE RADIAL VERSUS TEMPO DA ESTRELA 51 PEGASI.



Fonte: MONZÓN, 2021 apud MAYOR; QUELOZ, 1995.

Essa técnica, portanto, é bastante adequada para detectar gigantes gasosos que estão muito próximos de sua estrela hospedeira e cujo plano orbital está próximo da linha de visada do observador na Terra. Tais medidas não seriam possíveis caso o exoplaneta se encontrasse a uma distância maior da sua hospedeira pois, se fosse o caso, haveria grande imprecisão na medição do semi-eixo maior, excentricidade, dentre outros parâmetros necessários para o estudo desses corpos (Charbonneau et al., 1999). Posto isso, tem-se que planetas com massas muito inferiores à de Júpiter ($9,5 \times 10^{-4} M_{\odot}$) dificilmente conseguem ser identificados por esse método, uma vez que provocam uma oscilação quase irrelevante em sua estrela mãe (Válio, 2009).

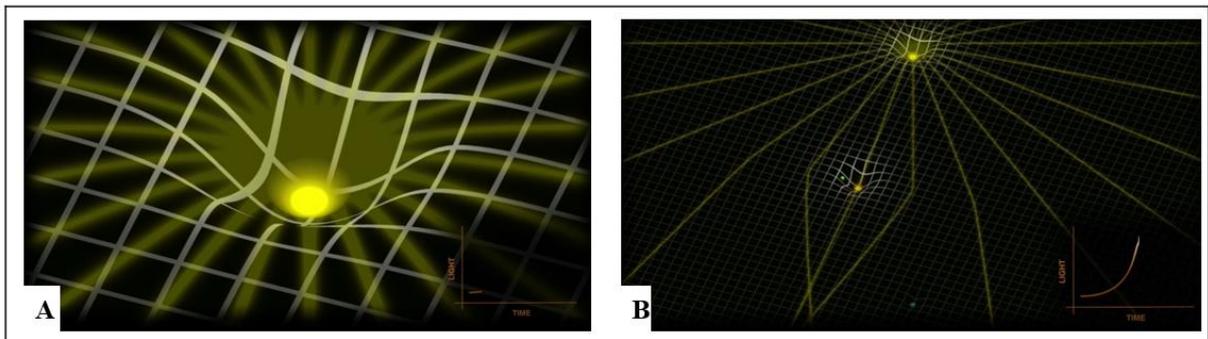
- **Microlentes gravitacionais:**

Ocorrem quando um objeto massivo passa na frente de uma estrela, desviando temporariamente sua luz e aumentando seu brilho. A luz emitida pela estrela de fundo é ampliada e focada quando passa por uma lente, que pode ser formada por um ou mais corpos

massivos que viajam vizinhanças da estrela de fundo, ou seja, pela ação da gravidade de um planeta (ou mesmo um planeta orbitando outra estrela). Sendo assim, a luz de fundo é desviada e o brilho total do sistema, que serve como lente, aumenta temporariamente (Soto, 2020; Monzón, 2021).

De acordo com Albert Einstein, a gravidade é resultado da distorção do espaço-tempo, e é sobretudo por essa característica que há a formação dessas microlentes (NASA, 2024). A partir dessa distorção do espaço-tempo, o planeta e/ou a estrela provoca um desvio na luz da estrela de fundo, feito esse que foi confirmado em 1919 pelo experimento de Sobral – Ceará, e que pode ser observado na Figura 5 abaixo:

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE MICROLENTE GRAVITACIONAL



Fonte: Adaptado de NASA (2024).

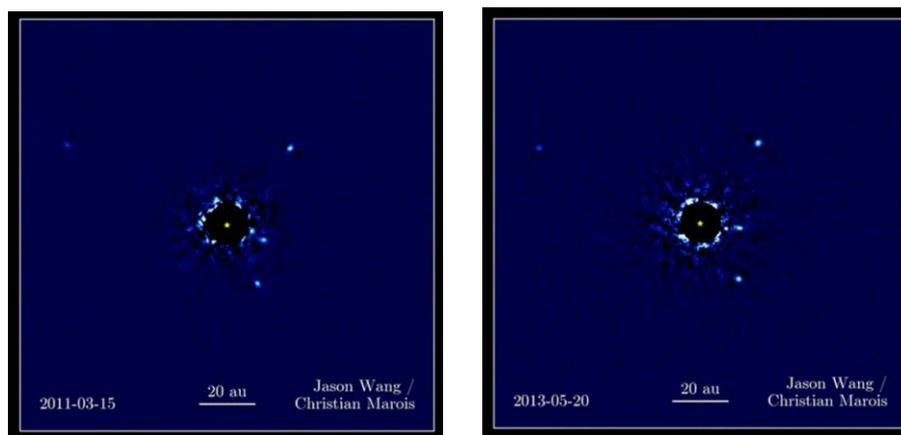
No lado esquerdo da Figura 5, observa-se esse desvio causado; já no lado direito, constata-se a existência de um pico na curva de luminosidade em função do tempo, o que ocorre devido a ampliação da luz da estrela de fundo pela ação da microlente gravitacional. Após isso, o brilho da estrela de fundo desaparece, restando somente o brilho da estrela do sistema planetário principal.

No entanto, o número de sistemas que pode ser detectado utilizando essa técnica é bastante reduzido, em decorrência da raridade com que essas lentes são criadas. Isso acontece porque, para que esse evento ocorra e o exoplaneta seja detectado, é necessário que o planeta passe entre a estrela de fundo e a linha de visão do observador, o que é um fenômeno raro. Além disso, não é possível inferir quando ele ocorrerá nem se pode reproduzir novamente, o que limita e muito a detecção a partir desse método. Ainda assim, há pelo menos 221 exoplanetas detectados (NASA, 2024 c).

- **Imageamento:**

É o processo de capturar imagens diretas de exoplanetas através de fotografias. Esse registro fotográfico, no entanto, é um desafio para a detecção dos extrassolares, uma vez que a estrela que estes habitam, em sua maioria, são milhões de vezes mais brilhantes do que os planetas, o que dificulta sua visualização (Monzón, 2021). Esse tipo de detecção é possível porque o corpo que orbita, no caso, o exoplaneta, reflete o brilho de sua hospedeira. No entanto, esse brilho depende diretamente do tamanho do planeta, de sua proximidade da estrela, da luminosidade da estrela e das propriedades atmosféricas do planeta (NASA, 2024 c). Portanto, esse método favorece bastante a descoberta de gigantes gasosos com órbitas consideravelmente distantes da estrela, podendo estar de dezenas até centenas de UA.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DE UM FILME DE QUATRO EXOPLANETAS EM ÓRBITA DA ESTRELA HR 8799.



Fonte: Adaptado de NASA (2024).

Até agora, essas "imagens diretas" de exoplanetas têm sido responsáveis pela confirmação principalmente de gigantes gasosos, como já é previsto, tendo descoberto 82 exoplanetas (NASA, 2024). Além disso, as imagens diretas podem auxiliar na obtenção de informações primordiais, como o semieixo da órbita, o raio e massa do planeta (Monzón, 2021). Essa técnica, no entanto, ainda é nova e está em desenvolvimento, e a maioria dos exoplanetas detectados através desse método possuem superfícies muito quentes, em torno de 2000 K a 10000 K, pois são novos (Monzón, 2021). Mesmo assim, ela é importante na caracterização dos exoplanetas a partir da identificação de oceanos, atmosfera e massas terrestres (NASA, 2024), de forma que também é uma opção relevante no estudo do cosmos.

2.4 MÉTODO DE TRÂNSITO

Por fim, o trânsito planetário estuda mudanças no brilho de uma estrela quando um exoplaneta passa na frente dela, do ponto de vista do observador (Perryman, 2018). Quando isso ocorre, há uma pequena variação no brilho desse objeto na linha de visada, indicando que possivelmente existe um exoplaneta naquele local observado, causando assim um bloqueio da luz recebida pelo equipamento utilizado, em intervalos de tempo aproximadamente iguais (Perryman, 2018). Detectou-se, até agora, um total de 4193 planetas por método de trânsito, correspondente a 74,3% das descobertas, segundo dados oficiais da NASA, até o dia 28 de junho de 2024.⁵

Um dos parâmetros que o diferencia é a distância angular do astro até o observador. No trânsito, como se é verificado, o objeto que possui tamanho angular menor fica na frente de outro corpo celeste, como é o caso dos trânsitos de Vênus e Mercúrio em relação ao Sol.

FIGURA 7 – TRÂNSITO DE UM EXOPLANETA EM FRENTE À SUA ESTRELA HOSPEDEIRA.

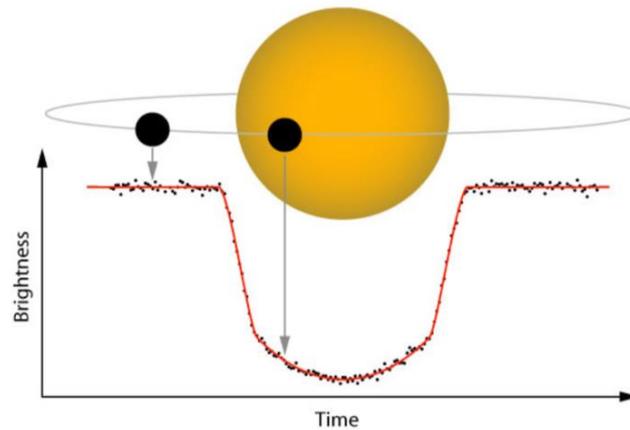


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As figuras 7 e 8 representam a dinâmica desse trânsito, que acontece integralmente entre quatro pontos de contato, divididos entre o disco do planeta e o disco da estrela: o primeiro contato acontece quando o disco planetário encobre o disco da estrela pela primeira vez; o segundo é o momento em que todo o disco planetário obscurece a estrela; já o terceiro contato ocorre quando o disco planetário diminui consideravelmente o brilho, no que seria o trânsito total e, por fim, o quarto contato diz respeito ao final do evento de trânsito.

⁵ <https://science.nasa.gov/exoplanets/discoveries-dashboard/>

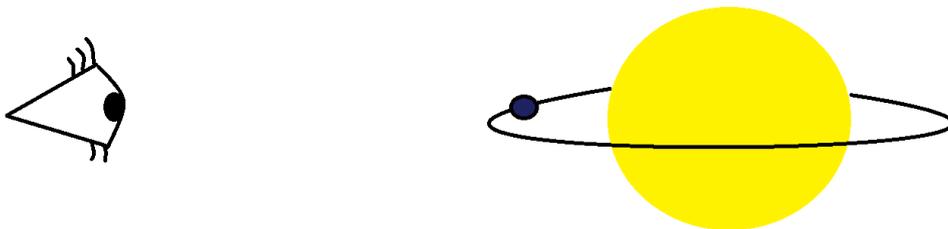
FIGURA 8 – O MÉTODO DE TRÂNSITO UTILIZA CURVAS DE LUZ PARA DETECÇÃO DE EXOPLANETAS.



Fonte: (<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/primary-science.html>)

Ainda na Figura 8, é perceptível a ocorrência desse fenômeno devido a variação periódica na luminosidade da estrela, sendo possível ainda verificar a ocorrência do trânsito em diferentes etapas, o que resulta na curva de luz representada em vermelho. Essas curvas de luz envolvem monitorar o brilho das estrelas a fim de identificar quedas periódicas causadas por planetas que cruzam a hospedeira e bloqueiam uma fração do seu brilho. Com a variação de brilho causada pelo trânsito do exoplaneta, é possível inferir uma série de parâmetros físicos do sistema detectado, tais como o raio do planeta, além de parâmetros orbitais como o período, o semieixo maior e o ângulo de inclinação.

FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DE COMO UM OBSERVADOR EXTERNO VERIA O TRÂNSITO DE UM EXOPLANETA.



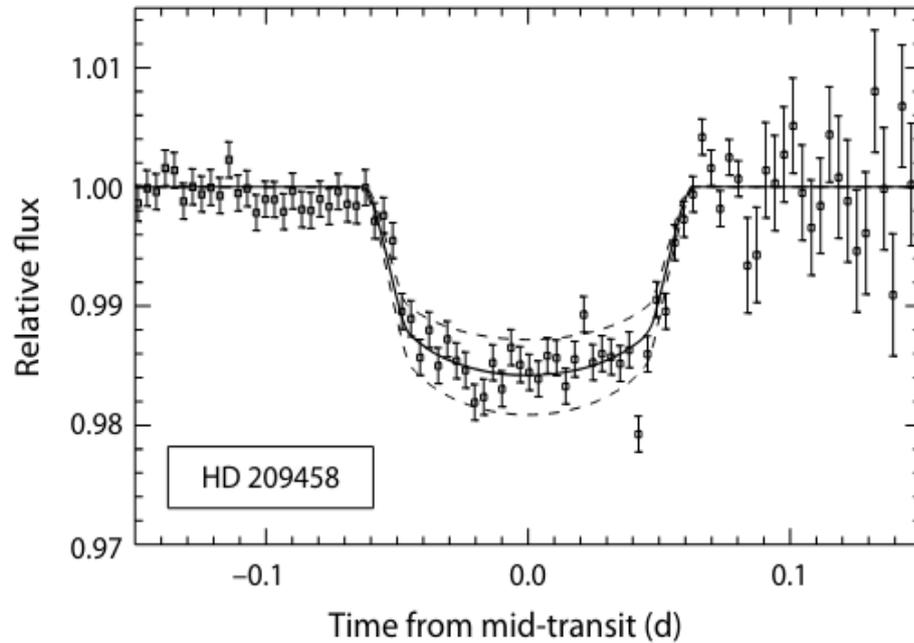
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 9 demonstra como ocorre a dinâmica desse trânsito vista externamente, semelhante ao que acontece com o próprio Sistema Solar, quando Júpiter passa em frente ao Sol e diminui seu brilho em cerca de 1%, ao passo em que a Terra diminui aproximadamente 0,01% (Soto, 2020), do ponto de vista de um observador distante (vide Figura 6).

Portanto, “a diminuição da intensidade da luz da estrela é proporcional à razão entre as áreas do planeta e da estrela e se repete periodicamente de acordo com o período orbital” (Válio, 2009, p. 31), no entanto, um corpo só é de fato confirmado como um planeta extrassolar quando há, pelo menos, três medições de trânsito que resultem em valores similares e, além disso, que sejam separadas por um mesmo intervalo de tempo (Lenchuck et al., 2021). A curva de luz resultante desse fenômeno é a relação entre o brilho recebido da estrela e o tempo. Sendo assim, quando o planeta inicia seu processo de trânsito, a luminosidade cai. Por outro lado, quando há o fim desse “eclipse”, a estrela volta a emitir sua luz, naturalmente (NASA, 2022; Perryman, 2000).

Dada uma geometria de alinhamento adequada, a luz da hospedeira é atenuada pelo trânsito de um planeta em seu disco, com o efeito se repetindo no período orbital. A probabilidade de observar tal trânsito para qualquer estrela, vista de uma direção aleatória e em um momento aleatório, é extremamente pequeno. Além disso, sabe-se que, quanto maior for o tempo de trânsito, maior a distância do planeta da sua hospedeira (NASA, 2022). O efeito procurado também é pequeno: um planeta com, por exemplo, o tamanho de Júpiter transitando por uma estrela de $1R_{\odot}$ (um raio solar) resulta em uma queda do fluxo estelar de aproximadamente, $1,1 \times 10^{-2}$, ou cerca de 0,01 mag. Para planetas com raio da Terra ou de Marte, é 3×10^{-5} , respectivamente. Profundidades de até 7% podem ocorrer para anãs M (Haguigoueur et al., 2010), e ainda mais significativas para planetas em torno de anãs brancas.

O primeiro trânsito de exoplaneta, HD 209458 b, foi observado por Henry et al. (1999, 2000) e independentemente por Charbonneau et al. (2000). Este último observou dois trânsitos (Figura 10), com duração de 2,5 horas e profundidade de 1,5%, em um intervalo consistente com a órbita conhecida. Nesse interim, teve-se a primeira confirmação de que planetas com a massa de Júpiter em órbitas próximas em torno das suas estrelas hospedeiras têm raios e densidades comparáveis aos dos gigantes gasosos do próprio Sistema Solar.

FIGURA 10 - HD 209458 B, MOSTRANDO O FLUXO MEDIDO VERSUS TEMPO.

Fonte: Charbonneau et al. (2000).

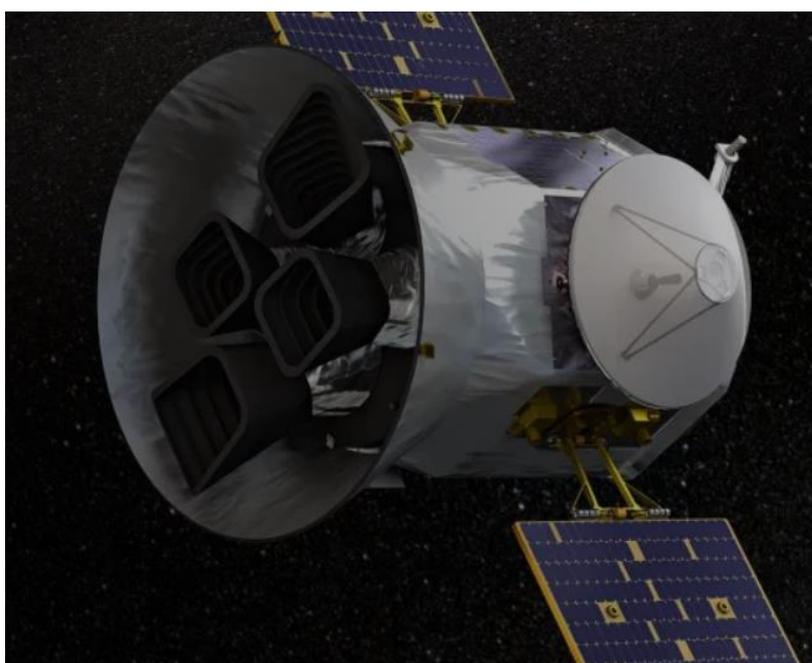
Desde então, a técnica de trânsito planetário tem sido responsável pela grande maioria das detecções, além de fornecer informações cruciais para o entendimento desses corpos extrassolares. Este trabalho, portanto, irá se basear nestes princípios para mostrar como dados científicos atuais podem ser trabalhados com o conhecimento de um curso de graduação nas áreas de física e exatas, com um pouco de programação, a fim de obter valores bem próximos da literatura.

2.4 MISSÃO TESS

O *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) é um satélite espacial concebido e lançado em 2018 como parte do programa *Astrophysics Explorer Mission*, prorrogado pela NASA. Sua missão consiste em suceder o telescópio espacial Kepler, que se encontrava inativo à época, acompanhando a observação de exoplanetas que orbitam estrelas nas proximidades do Sistema Solar. Essa observação se dá através da detecção da diminuição periódica do brilho das estrelas, proporcionando a ocorrência de trânsitos planetários (Schlieder, 2017).

O TESS representa uma evolução natural após o Kepler, concentrando-se na exploração das estrelas mais próximas e luminosas para identificar exoplanetas em trânsito. O principal propósito do TESS consiste em detectar uma ampla variedade de exoplanetas, em especial aqueles de dimensões inferiores às de Netuno, em órbita de estrelas hospedeiras suficientemente brilhantes para possibilitar estudos espectroscópicos detalhados, visando determinar massas e composições atmosféricas. Este feito está sendo realizado por meio de um mapeamento abrangente do céu, sendo conduzido ao longo de um período de dois anos, durante os quais foram realizadas análises fotométricas diferenciais de séries temporais, contemplando centenas de milhares de estrelas (Ricker et al., 2014).

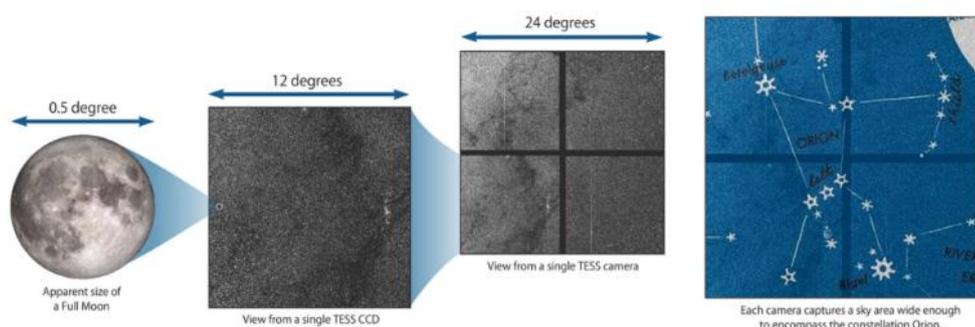
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DO TELESCÓPIO ESPACIAL TESS.



Fonte: NASA Tess Exoplanet Mission. Disponível em: <https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

Diferente do Kepler, a missão TESS possui um campo de visão consideravelmente mais amplo, permitindo a observação e mapeamento da vizinhança de 200.000 estrelas da sequência principal similares ao Sol, utilizando tecnologia de ponta. Para isso, a sonda em questão percorre uma órbita de 13,7 dias em torno da Terra com quatro câmeras CCD ópticas, além de espectroscópios que auxiliam na determinação da massa do planeta e de sua composição atmosférica (Soto, 2020; Monzón, 2021; Ricker et al., 2014).

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO CAMPO DE VISÃO DE UMA CÂMERA DO TESS, BEM COMO SEU CONJUNTO DE 4 CCDS.



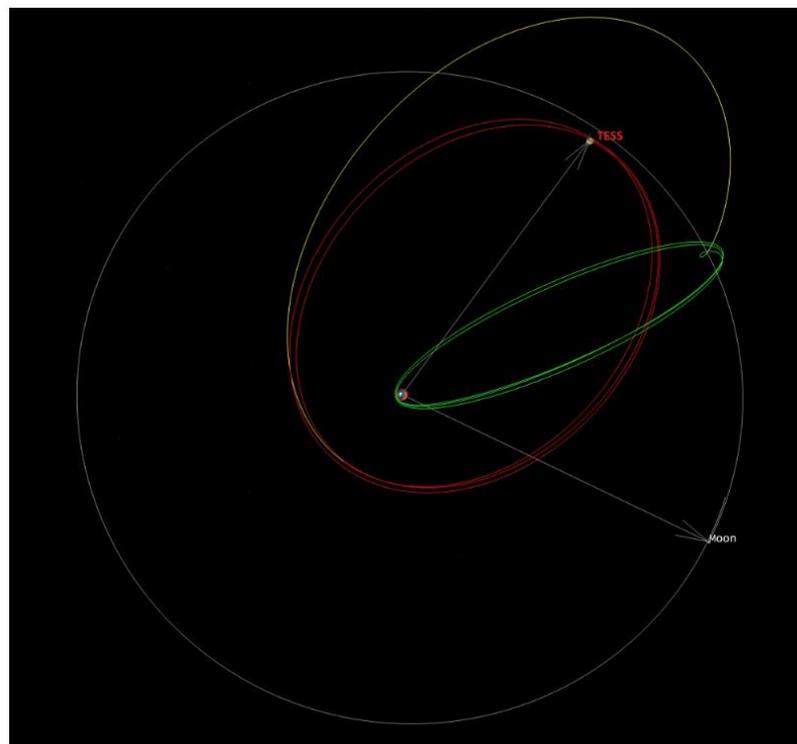
Fonte: MIT. Disponível em: <https://tess.mit.edu/science/>

Um segmento TESS refere-se a dados de quatro câmeras, cobrindo um campo de 24 x 90 graus no céu. Para uma noção de escala, a constelação de Órion cabe inteiramente no campo de visão de uma câmera do telescópio. O TESS consiste em 4 câmeras idênticas equipadas com lentes de f/1.4 personalizadas (o que implica em uma distância focal de 140mm, longa, de menor profundidade de campo) e 24° x 24° de campo de visão ou FOV (do inglês *field of view*), que, combinados, resultam em um FOV de 24° x 96°, o que caracteriza a área de um setor de observação (Figura 12). Cada câmera possui um conjunto de detectores CCDs retroiluminados do MIT, com 4096 x 4096 pixels ajustados em uma área de 62 x 62 mm, sendo que a área efetiva para imagem é de 2048 x 2048 pixels e o restante é utilizado como armazenamento de quadros, permitindo uma leitura rápida, sem obturador e com ruído de leitura de menos de 10 elétrons por segundo. Além disso, a temperatura de operação dos CCDs é de cerca de -75°C, fator que reduz a corrente de escuro a um nível irrelevante (Vanderspek et al., 2018).

A órbita final do TESS, que tem um período de 13,7 dias, coloca-o em ressonância 2:1 com a lua. Esta ressonância implica que as perturbações da gravidade da lua têm uma média aproximada de zero, dado que a lua está sempre à frente ou atrás do TESS em 90 graus no

apogeu. O resultado disso é que esta órbita terrestre elevada (HEO) altamente elíptica permanecerá estável por várias décadas. Assim, uma vez que o TESS atingiu a trajetória final da missão, poucas manobras corretivas foram necessárias para mantê-lo. Isto foi especialmente necessário para uma espaçonave com massa restrita que não pode transportar combustível extra para acionar periodicamente os propulsores para manter uma órbita. A Figura 13 apresenta a trajetória do TESS desde o lançamento até a órbita final da missão. A linha verde representa os ciclos de fase anteriores ao sobrevoo lunar. O amarelo representa a trajetória resultante do sobrevoo, enquanto o vermelho demonstra a órbita final da missão.

FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DA TRAJETÓRIA DO TRANSITING EXOPLANET SURVEY SATELLITE.



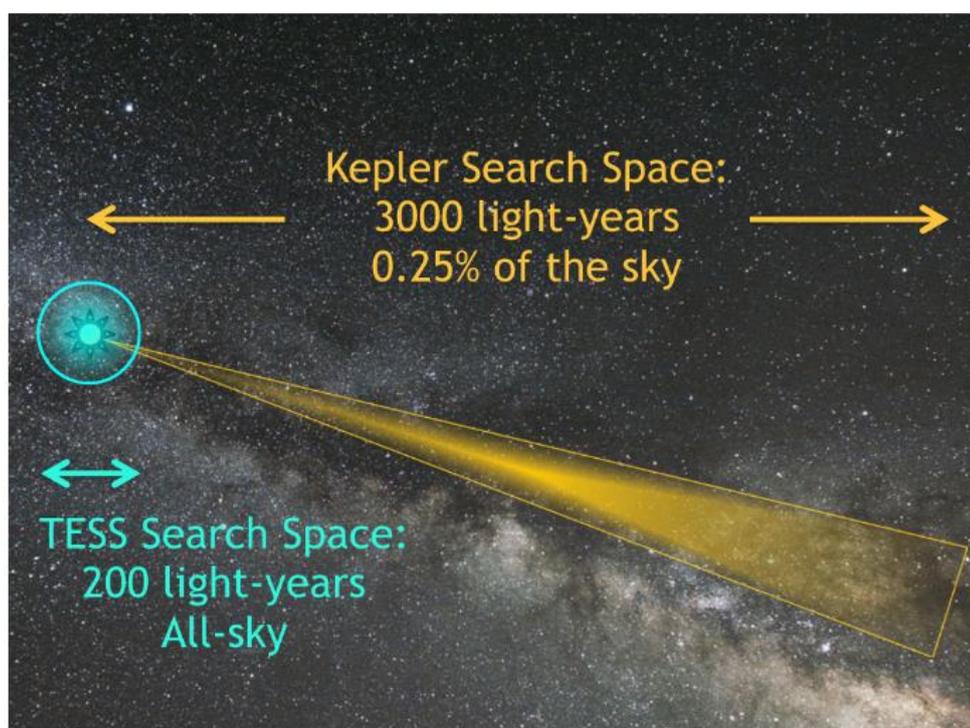
Fonte: NASA (2024).

O campo de visão é orientado ao longo de uma linha de longitude eclíptica com a mira do instrumento geralmente apontando para $\pm 54^\circ$ de latitude eclíptica, que centraliza a câmera 4 em um polo eclíptico. Quando se orienta os campos desta forma, uma região de 24° de diâmetro centrada no polo da eclíptica pôde ser observada durante quase um ano inteiro. Durante certos setores, nos anos 2 e 4, a mira do instrumento é apontada para $+85^\circ$, o que contribui para evitar dispersão excessiva de luz nas câmeras 1 e 2. Como os campos de visão são deslocados para o

norte ao longo de uma linha de longitude eclíptica, a região próxima ao polo da eclíptica era observada continuamente.

Enquanto a abertura do telescópio Kepler era de 0,95m, cada câmera do TESS possui uma abertura de apenas 10,5cm. Dada essa diferença, o Kepler era capaz de coletar mais luz e, por consequência, conseguia observar estrelas menos luminosas e mais distantes, diferente do TESS.

FIGURA 14 – COMPARATIVO ENTRE OS CAMPOS DOS SATÉLITES KEPLER (REGIÃO LARANJA) E TESS (REGIÃO AZUL).



Fonte: (<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/primary-science.html>).

O TESS observou aproximadamente 85% do céu (uma área 400 vezes maior do que a monitorada pelo Kepler), durante os dois anos da missão inicial. Também observou muito mais estrelas próximas e brilhantes em comparação com a missão antecessora, como mostra a figura 14, onde captou-se a luz de estrelas de todo o céu até 200 anos-luz de distância, enquanto o Kepler cobriu estrelas até 3000 anos-luz, porém apenas 0,25% do céu.

O valor primordial dos dados obtidos pelo TESS não reside na sua completude estatística, mas sim na relativa facilidade com que suas descobertas podem ser seguidas e complementadas por instrumentos atuais e futuros. De modo particular, os planetas com dimensões compreendidas entre as das Super-Terras e dos mini-Netunos despertam interesse, uma vez que sua natureza permanece pouco compreendida devido à ausência de exemplares no

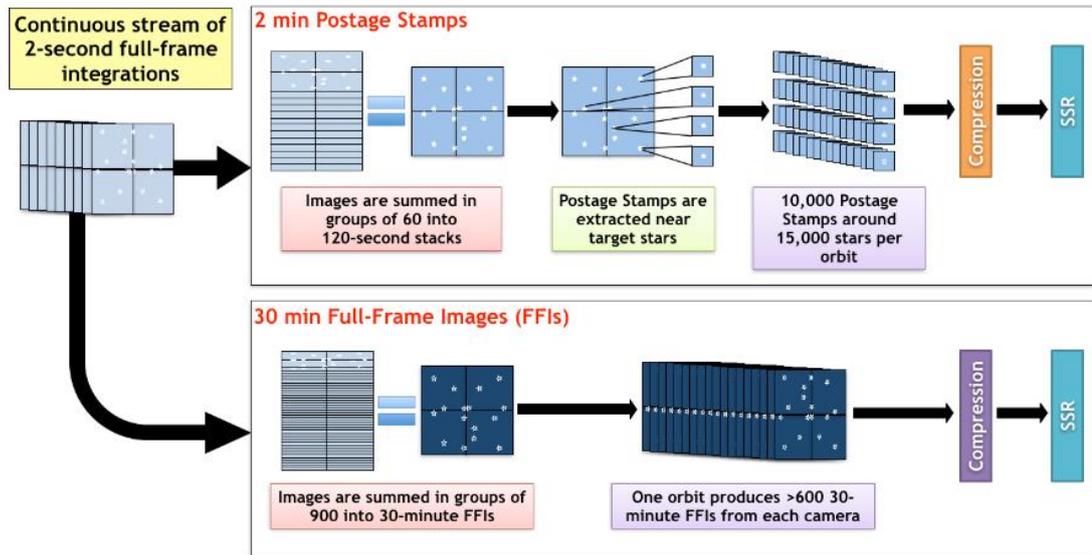
Sistema Solar. A missão precedente da NASA, Kepler, desempenhou um papel revolucionário na pesquisa exoplanetária ao demonstrar que tais corpos são abundantes e exibem uma ampla diversidade de composições (Marcy et al., 2014) e configurações orbitais intrigantes (Lissauer et al., 2011).

2.5 DADOS DO TESS

O TESS possui dois tipos de coleta de dados, que são 1) as imagens *postage stamp* ou *Target Pixel Files* (TPFs), que capturam o brilho das estrelas alvo individualmente, e 2) as imagens *full-frame* (FFIs) que cobrem todo o campo de visão. Os CCDs leem em intervalos de 2 segundos, onde os dados são processados na unidade de tratamento de dados (DHU, do inglês *Data Handling Unit*) no próprio satélite. Então, as imagens são empilhadas em grupos de 60, que produzem uma cadência de 2 minutos dos TPFs e em grupos de 900 para produzir uma cadência de 30 minutos das imagens FFIs (Schliender, 2017), como ilustra a Figura 15.

Os dados da espaçonave TESS são baixados pela *Deep Space Network* (DSN) e entregues ao Centro de Operações de Carga Útil (POC) do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). O POC envia dados de pixels requantizados não calibrados, listas de alvos, configuração de espaçonaves e dados de engenharia, além de modelos de caracterização do plano focal (para calibração) para o Centro de Operações de Processamento Científico (SPOC) da NASA Ames. Já o SPOC é responsável pela calibração dos dados científicos em duas etapas: 1) primeiro pela órbita e 2) pelo setor. Uma vez que um setor completo é calibrado, o software de busca de planetas em trânsito é executado pelo SPOC para identificar e sinalizar eventos de cruzamento de limiar (TCEs). Os pixels de alvo calibrados e FFIs, curvas de luz geradas a partir de alvos de cadência de 20 segundos e 2 minutos e TCEs são enviados ao TESS Science Office (TSO, que inclui o MIT e o Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO).

FIGURA 15 – ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS DE 2 SEGUNDOS PARA PRODUZIR OS TPFS E AS FFIS DE 30 MINUTOS.



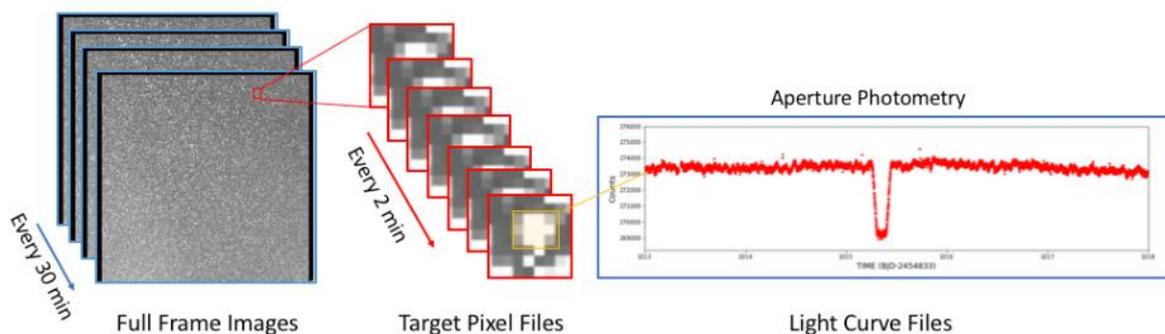
Fonte: NASA. 07 jun. 2024. Disponível em: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/data-products.html>

Existem três tipos de figuras geradas a partir dos produtos de dados produzidos pelo TESS, como ilustrado na Figura 16, são elas (Schieder, 2017):

- 1) *Imagem full-frame* (FFI): É o conjunto completo de todos os pixels capturado em todos os CCDs de uma determinada câmera. Os arquivos FFIs do TESS estão convertidos em formato FITS e estão divididos entre três tipos, são eles: não calibrado, calibrado e com incerteza.
- 2) Target Pixel File: Os arquivos de pixel de destino são a forma mais bruta de dados específicos do TESS. Para cada alvo de cadência de 2 minutos ou 20 segundos em um setor de observação, o TESS obtém somente os pixels contidos em uma máscara predefinida. Esses pixels podem ser de 2 minutos (todos os ciclos) ou 20 segundos (3 em diante). Esses pixels são usados para criar os dados encontrados nos arquivos de curva de luz.
- 3) Arquivos de Curva de Luz: Os arquivos de curva de luz contêm dados de séries temporais de fluxo e são produzidos para cada alvo cadenciado de 2 min e 20 segundos

(dos TPFs descritos acima) usando a fotometria de abertura simples (SAP). Eles são usados para pesquisar planetas em trânsito e outros fenômenos astrofísicos.

FIGURA 16 – PRODUTO DE DADOS FOTOMÉTRICOS.



Fonte: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/data-products.html>>

Os dados processados e os metadados do SPOC são arquivados no *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST, localizado no Space Telescope Science Institute), o principal arquivo de dados científicos do TESS, que pode ser acessado publicamente para se pesquisar, visualizar e recuperar dados.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma pesquisa de natureza aplicada. Para tanto, trata-se de uma pesquisa experimental que teve como amostra dados de estrelas com exoplanetas detectados em sua vizinhança, disponibilizadas no catálogo virtual The Extrasolar Planets Encyclopaedia v.2.18.0⁶, mantido pelo Observatório de Paris, na França. Utilizou-se um filtro contendo certos parâmetros requeridos, que foi pensado com o objetivo de facilitar a análise, o que gerou resultados satisfatórios, que serão descritos a seguir.

3.1 SELEÇÃO DA AMOSTRA

A metodologia adotada neste estudo se baseou em uma abordagem sistemática e criteriosa para a seleção de exoplanetas descobertos pela missão TESS, visando identificar candidatos que atendam a determinados critérios de interesse científico, para as devidas finalidades dessa pesquisa. Esses dados foram adquiridos por meio da consulta de um banco de

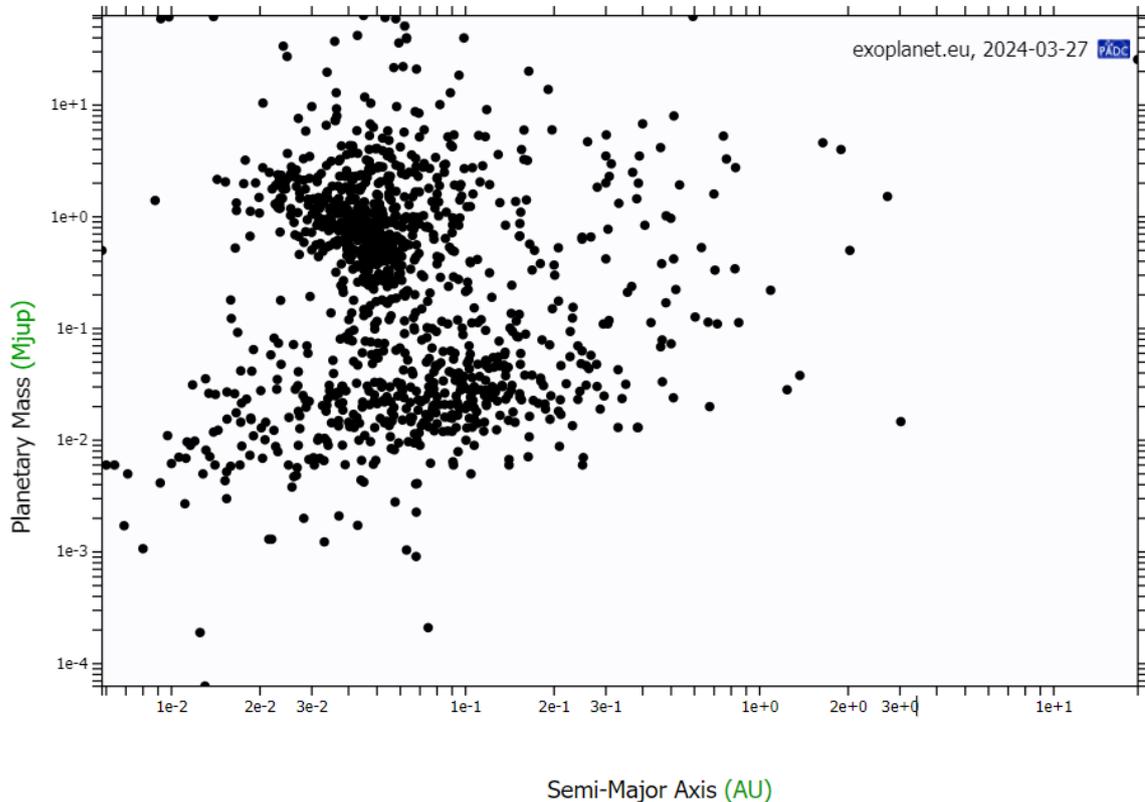
⁶ <http://www.exoplanet.eu/catalog/>

dados do TESS, em linguagem *Python* através da biblioteca *lightkurve*, que será melhor explicada posteriormente (Collaboration et al., 2018), a fim de obter a curva de luz dos exoplanetas.

Alguns parâmetros foram utilizados para a seleção desses dados, tais como: órbitas menos excêntricas e mais circulares e planetas do tipo Netuno, além de um raio menor do que o de Júpiter dentro dos conjuntos de dados disponíveis. Essa escolha se fez necessária porque, em sistemas com exoplanetas consideravelmente menores do que sua hospedeira, não há perturbação na órbita ou nos parâmetros da própria estrela, além de ser possível utilizar a 3ª Lei de Kepler de forma simplificada (eq. 6). No entanto, há um limite para o tamanho desses exoplanetas, uma vez que, se for muito pequeno, pode dificultar a inspeção visual do sinal, fato esse que levou a adotar-se um limite inferior do raio planetário. Portanto, a inclusão desses exoplanetas na análise proporciona uma oportunidade única de explorar a diversidade e complexidade dos sistemas planetários além do nosso próprio Sistema Solar (Ricker et al., 2014).

Adicionalmente, priorizou-se a seleção de exoplanetas com órbitas aproximadamente circulares, em detrimento daquelas com órbitas altamente excêntricas. Essa escolha metodológica foi motivada pelo desejo de simplificar as análises posteriores das dinâmicas orbitais e das interações entre o planeta e sua estrela hospedeira. Órbitas mais circulares tendem a facilitar a modelagem e compreensão dos fenômenos observados, permitindo uma investigação mais precisa das propriedades físicas e características atmosféricas dos exoplanetas selecionados. Assim, essa abordagem cuidadosamente elaborada proporciona uma base sólida para as investigações subsequentes, garantindo a relevância e a robustez dos resultados obtidos neste estudo.

FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO DAS MASSAS E SEMI-EIXO MAIOR DE EXOPLANETAS DETECTADOS PELO MÉTODO DE TRÂNSITO ATÉ MARÇO/2024.



Fonte: The Extrasolar Planets Encyclopedia (TEAM, 2024).

Há uma grande quantidade de exoplanetas detectados, o que fica bem evidente na Figura 17, onde é possível visualizar a massa em função do semi-eixo maior, além de observar a aglomeração em dois tipos: gigantes gasosos próximos à estrela e terrestres até mini-Netunos. Esses dados foram obtidos através do catálogo do The Extrasolar Planets Encyclopedia. O próprio catálogo permite o usuário gerar esses gráficos com os mais variados parâmetros, neste caso, utilizou-se a massa de exoplanetas, em unidades de massa de Júpiter (M_j) em função do semi-eixo maior, em termos de unidades astronômicas.

Com o grande número de dados coletados pela missão escolhida, surge a possibilidade de trabalhar com os mais diversos parâmetros, a depender dos objetivos pretendidos. O catálogo virtual em si disponibiliza um filtro de busca, o que ajuda a refinar os dados que serão utilizados na seleção de amostra.

Sumarizando, as estrelas foram pré-selecionadas no Exoplanet.eu de acordo com o filtro:

TABELA 1 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO SITE EXOPLANET.EU PARA DETECTAR ESTRELAS CATALOGADAS NA MISSÃO TESS.

<p>Exoplanetas confirmados pelo método de trânsito, com as seguintes condições:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● massa: menor do que 0,1 massas de Júpiter (pois objetiva-se a análise de planetas não tão massivos, de forma que pudessem atrapalhar a dinâmica orbital); ● período: menor ou igual a 30 dias (o que facilita a visualização de vários trânsitos); ● excentricidade: menor do que 0,1 (órbitas mais circulares são mais fáceis de modelar); ● semi-eixo maior: menor do que 0,5 Unidades Astronômicas (pois quanto menor o período, menor também vai ser o semi-eixo); ● raio: maior ou igual a 0,2 raios de Júpiter (planetas com pequenas dimensões são mais difíceis de identificar visualmente); ● TOI e b no nome. (TOI refere-se a objeto de interesse do TESS e b, o primeiro exoplaneta descoberto, pois os seguintes são denominados pelas letras c, d, etc.)

Fonte: Autoria própria.

Com o grande número de dados coletados pela missão escolhida, surge a possibilidade de trabalhar com os mais diversos parâmetros, a depender dos objetivos pretendidos. O próprio site disponibiliza um filtro de busca, o que ajuda a refinar os dados que serão utilizados na seleção de amostra, como por exemplo, limitação da massa; permitir uso da 3ª Lei de Kepler simplificada; período curto e semi-eixo pequeno, a fim de visualizar inúmeros trânsitos nos dados, o que facilita a precisão da medida do período; excentricidade baixa, o que ajuda a manter uma curva de trânsito simétrica; raio, para não incluir planetas muito pequenos na análise; TOI e b no nome, para garantir que o objeto foi observado pelo TESS e b, o mais próximo da estrela, embora não seja um critério eliminatório, uma vez que um dos planetas entrou no estudo, como é o caso do TOI 1130 c. Estes critérios, portanto, possibilitaram a filtragem da grande amostra de candidatos, reduzindo a amostragem em 19 estrelas, que serão utilizadas nessa pesquisa apenas para calcular os parâmetros físicos e orbitais dos exoplanetas.

3.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados do satélite TESS para exoplanetas detectados pelo método de trânsito constitui uma etapa fundamental na busca por compreender a diversidade e características desses corpos celestes. Para este trabalho, será empregada uma abordagem sistemática,

utilizando os dados fornecidos pelo Programa de Observação de Acompanhamento de Exoplanetas do TESS, para identificar exoplanetas através da observação de diminuições periódicas no brilho das estrelas hospedeiras.

Com uma ampla cobertura do céu e uma sensibilidade extraordinária, o TESS possibilitou a detecção de um grande número de exoplanetas em trânsito, oferecendo assim uma base sólida para a pesquisa dos parâmetros orbitais desses objetos (Ricker et al., 2014).

Esta pesquisa fez uso do site do Programa de Observação de Acompanhamento de Exoplanetas (ExoFOP; DOI: 10.26134/ExoFOP5)⁷, que é operado pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia, sob contrato com a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço no âmbito do Programa de Exploração de Exoplanetas, com informações de livre acesso dos projetos espaciais Kepler e TESS. Esses dados estão disponíveis para qualquer pessoa com acesso à internet e, segundo o próprio site, foi projetado para otimizar recursos, bem como facilitar a colaboração em estudos de possíveis candidatos a exoplanetas, servindo como um repositório de dados coletados pelo projeto e pela comunidade, o que permite a ação de *uploads* e a exibição de materiais com os mais variados parâmetros astrofísicos.

Há um número considerável de estrelas observadas e planetas detectados, o que facilita as mais diversas possibilidades de trabalhos que podem ser feitos utilizando-o como referência. A principal função de consulta e obtenção destes dados requer um identificador, que podem ser coordenadas, nomes ou TIC ID (que é uma espécie de número de identidade de cada estrela observada pela missão). A ideia de utilizar os dados do satélite, aliada a ferramentas tecnológicas como a linguagem de programação em Python, é extrair informações precisas sobre os parâmetros orbitais dos exoplanetas, como será demonstrado adiante.

Cada missão possui um número próprio de identificação das estrelas, e no site da Enciclopédia dos Exoplanetas contém o identificador geral TOI (que significa objeto de interesse do TESS). Consoante a isso, o banco de dados do TESS contém o identificador próprio, que é o TIC ID, explicado anteriormente. Posto isso, para obter-se a amostra de 19 estrelas fez-se uma correlação dos 2 identificadores (TOI e TIC ID) no exoFOP, ocasião em que também se obteve os parâmetros das estrelas, como a massa e o raio. Os parâmetros estelares servem como base para obter os parâmetros orbitais e planetários dos exoplanetas aqui estudados e os métodos de obtenção de tais parâmetros estelares fogem do escopo desta pesquisa.

⁷ <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

O levantamento dessas estrelas foi realizado no dia 24/04/2024, o que se torna necessário ser destacado pois, caso essa mesma pesquisa seja realizada novamente, há a possibilidade de haver um número maior de estrelas, uma vez que esses dados são frequentemente atualizados e a base de dados cresce rapidamente. Sendo assim, depois de encontradas as referidas TICs, fez-se a inspeção visual da curva de luz dessas estrelas, eliminando as que apresentaram uma variação de brilho incomum, que não eram resultado de nenhum trânsito, ou cuja profundidade do trânsito era baixa em comparação ao ruído de fundo.

Por definição, uma curva de luz está relacionada à evolução da luminosidade da estrela durante um determinado intervalo de tempo. As curvas de luz, portanto, são variações temporais de luz provenientes de algum objeto astronômico e, no caso desta pesquisa, as análises dessas curvas estão interligadas às estrelas. A análise e interpretação desta variabilidade luminosa permite a compreensão de características físicas dos objetos associados a essas variabilidades. De modo geral, as curvas de luz apresentam variações estáveis de amplitudes constantes e com formas aproximadamente senoidais.

A causa dessa variabilidade pode variar entre algumas possibilidades, mas as únicas consideradas ao longo deste trabalho serão as ocasionadas em decorrência do fenômeno de trânsito planetário, amplamente explicado na seção 3.1.

TABELA 2 – DADOS OBTIDOS COM O AUXÍLIO DO EXOFOP, SOBRE OS PARÂMETROS JÁ MENCIONADOS.

NOME	TIC ID	R_{\odot}	M_{\odot}	REF.
TOI-1064	79748331	0.748	0.726	a
TOI-1130	254113311	0.684	0.687	b
TOI-1135	154872375 *	1.125	1.16	c
TOI-1173 A	232967440	0.917	0.96	d
TOI-1201	29960110	0.512	0.508	e
TOI-1231	447061717	0.485	0.476	f
TOI-1260	355867695	0.66	0.65	g
TOI-132	89020549	0.97	0.9	h
TOI-1422	333473672	0.981	1.019	i
TOI-1728	285048486	0.646	0.6243	j
TOI-1759	408636441	0.61	0.6	k

TOI-2000	371188886	1.074	1.113	l
TOI-2015	368287008 *	0.342	0.333	m
TOI-2134	75878355	0.69	0.77	n
TOI-2196	372172128 **	1.032	1.043	o
TOI-4010	352682207 **	0.88	0.83	p
TOI-469	33692729 **	0.89	0.98	q
TOI-763	178819686 **	0.917	0.897	r
TOI-815	102840239 **	0.82	0.75	s

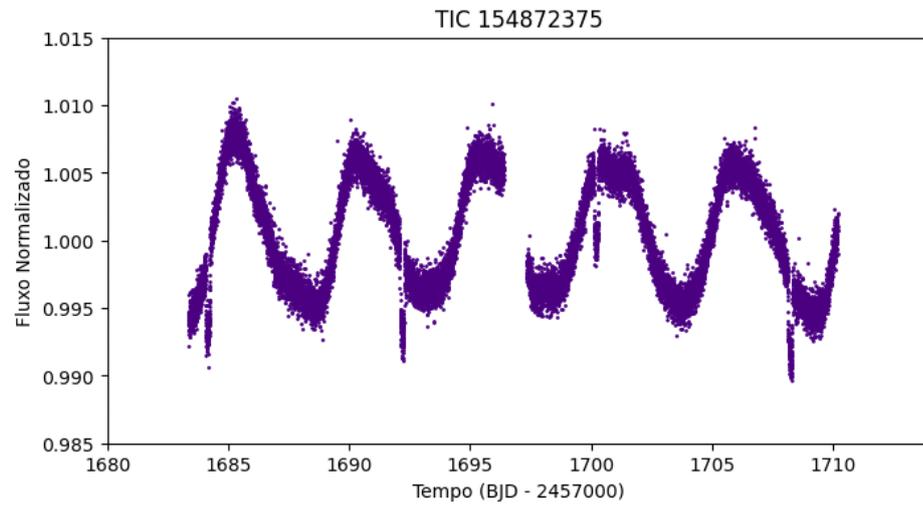
Fonte: Elaborado pelo autor.

A amostra obtida se reduziu a 19 estrelas, listadas na Tabela 2, cujos dados como massa e raio foram encontrados por métodos alternativos, que só serão relevantes posteriormente, para calcular os parâmetros físicos e orbitais dos exoplanetas. O nome TOI refere-se aos exoplanetas detectados na vizinhança das suas hospedeiras. As estrelas encontradas são identificadas pelo número TIC, exibido na segunda coluna. Na terceira e quarta coluna, tem-se a massa e raio da estrela, em termos de massas e raios solares e, na última coluna, as referências identificadas pelas letras a – s.

Os asteriscos * e ** referem-se a estrelas que foram excluídas da amostra final, seja porque se tratava de uma estrela variável (onde a curva de luz possui naturalmente variação de brilho), ou porque a estrela apresentou múltiplos trânsitos, como é o caso da TOI 4010. Abaixo, segue as figuras 18, 19 e 20 para fins de ilustração e comparação das diferentes características que foram encontradas na amostra, sendo consideradas inadequadas para os fins deste presente estudo.

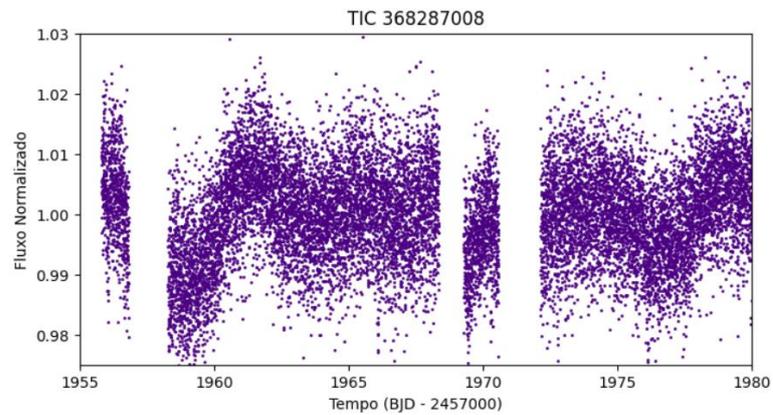
Além disso, as linhas destacadas em amarelo são referentes às estrelas selecionadas na amostra final, que serão descritas posteriormente.

FIGURA 18 – EXEMPLO DE ESTRELA VARIÁVEL ENCONTRADA NA AMOSTRA (TOI 1135 NA TABELA 2).



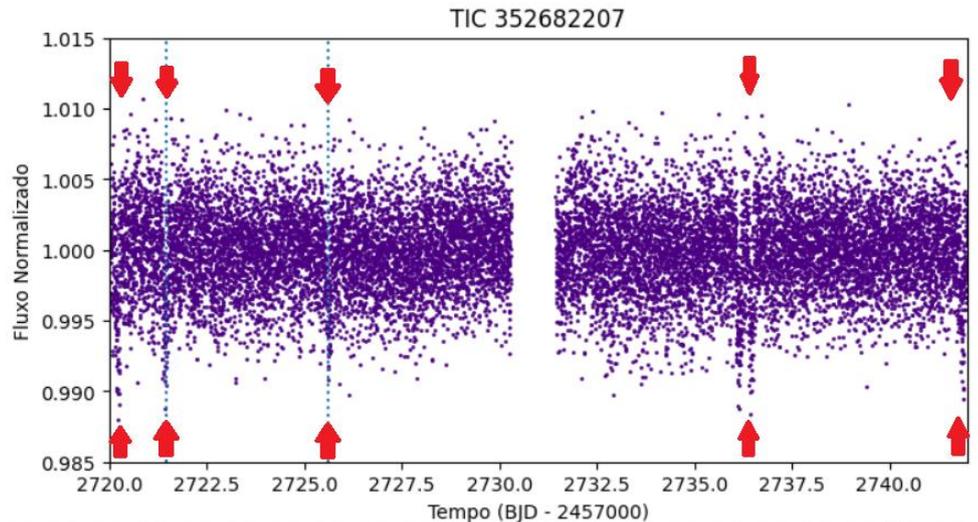
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

FIGURA 19 – EXEMPLO DE ESTRELA (TOI 2015 NA TABELA 2) ENCONTRADA NA AMOSTRA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

FIGURA 20 – EXEMPLO DE ESTRELA (TOI 4010 NA TABELA 2) ENCONTRADA NA AMOSTRA COM PRESENÇA DE MÚLTIPLOS TRÂNSITOS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A inspeção das curvas de luz se torna necessária pela quantidade de informações que oferece ao pesquisador sobre as condições que se encontra aquele objeto de interesse. Nos casos relatados das figuras 18, 19 e 20 é possível perceber como há variações de brilho que não estão diretamente relacionadas aos trânsitos planetários, ou que, mesmo que tenha algum planeta em órbita da estrela, é difícil inferir sob os requisitos utilizados nesta pesquisa. Na Figura 20, por exemplo, se observa múltiplos trânsitos com diferentes intervalos e profundidades parecidas, indicando a presença de mais de um exoplaneta em órbita, o que dificulta a presente pesquisa baseada em estimativas visuais dos parâmetros de período e profundidade do trânsito. Portanto, foi necessária uma análise minuciosa de cada curva de luz, tendo sido reproduzidas mais de uma vez a fim de selecionar apenas as que melhor se adequariam ao presente estudo.

A seguir, encontram-se as referências utilizadas para extrair os dados das 19 estrelas encontradas, e seus respectivos parâmetros, contidos na Tabela 2, nortearam e são importantes de serem mencionadas, uma vez que são estudos relacionados que foram publicados, permitindo ao pesquisador dessa área compreender as metodologias empregadas, bem como os diferentes tipos de sistemas estelares existentes, que ajudam na caracterização dos parâmetros pretendidos e na análise dos resultados encontrados:

TABELA 3 - LISTA DE REFERÊNCIAS UTILIZADAS PARA EXTRAÇÃO

a - WILSON, Thomas G. et al. A pair of sub-Neptunes transiting the bright K-dwarf TOI-1064 characterized with CHEOPS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 511, n. 1, p. 1043-1071, 2022.

b - HUANG, Chelsea X. et al. TESS spots a hot Jupiter with an inner transiting Neptune. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 892, n. 1, p. L7, 2020.

c - MALLORQUIN, M. et al. TOI 1135 b: A young hot Saturn-size planet orbiting a solar-type star. **Astron. & Astrophys**, v. 685, 2024.

d - GALARZA, Jhon Yana et al. TOI-1173 A \$ b \$: The First Inflated Super-Neptune in a Wide Binary System. **arXiv preprint arXiv:2403.06240**, 2024.

e - KOSSAKOWSKI, D. et al. TOI-1201 b: A mini-Neptune transiting a bright and moderately young M dwarf. **Astronomy & Astrophysics**, v. 656, p. A124, 2021.

f - BURT, J.A et al. CE 2021, 'TOI-1231 b: a temperate, Neptune-sized planet transiting the nearby M3 dwarf NLTT 24399', **The Astronomical Journal**, vol. 162, no. 3, 87, 2021.

g - GEORGIEVA, I. Y. et al. Hot planets around cool stars—two short-period mini-Neptunes transiting the late K-dwarf TOI-1260. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 505, n. 4, p. 4684-4701, 2021.

h - DÍAZ, Matías R. et al. TOI-132 b: A short-period planet in the Neptune desert transiting a V= 11.3 G-type star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 493, n. 1, p. 973-985, 2020

i - NAPONIELLO, L. et al. The GAPS programme at TNG-XL. A puffy and warm Neptune-sized planet and an outer Neptune-mass candidate orbiting the solar-type star TOI-1422. **Astronomy & Astrophysics**, v. 667, p. A8, 2022.

j - KANODIA, Shubham et al. TOI-1728b: The Habitable-zone Planet Finder Confirms a Warm Super-Neptune Orbiting an M-dwarf Host. **The Astrophysical Journal**, v. 899, n. 1, p. 29, 2020.

k - MARTIOLI, Eder et al. TOI-1759 b: A transiting sub-Neptune around a low mass star characterized with SPIRou and TESS. **Astronomy & Astrophysics**, v. 660, p. A86, 2022.

l - SHA, Lizhou et al. TESS spots a mini-neptune interior to a hot saturn in the TOI-2000 system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 524, n. 1, p. 1113-1138, 2023.

m - JONES S., STEFANSSON G., MASUDA K., LIBBY-ROBERTS J., GARDNER C. et al. **Astron. J.**, enviado, 2023.

n - RESCIGNO, F. et al. A hot mini-Neptune and a temperate, highly eccentric sub-Saturn around the bright K-dwarf TOI-2134. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 527, n. 3, p. 5385-5407, 2024.

o - PERSSON C., GEORGIEVA I., GANDOLFI D., AGUICHINE A., MURESAN A. et al. *Astron. & Astrofísica.*, 666, 2022.

p - KUNIMOTO, Michelle et al. TOI-4010: a system of three large short-period planets with a massive long-period companion. **The Astronomical Journal**, v. 166, n. 1, p. 7, 2023.

q - CHAKRABARTY, Aritra; MULDER, Gijs D. Where Are the Water Worlds? Identifying Exo-water-worlds Using Models of Planet Formation and Atmospheric Evolution. **The Astrophysical Journal**, v. 966, n. 2, p. 185, 2024.

r - FRIDLUND, M. et al. The TOI-763 system: sub-Neptunes orbiting a Sun-like star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, n. 3, p. 4503-4517, 2020.

s - PSARIDI, Angelica et al. Discovery of two warm mini-Neptunes with contrasting densities orbiting the young K3V star TOI-815. **Astronomy & Astrophysics**, v. 685, p. A5, 2024.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a seleção das 19 estrelas, 9 passaram no critério estabelecido. Dentro dessas 9 estrelas designadas, houve uma nova inspeção das curvas de luz, levando a escolha final de 5 estrelas, que continham melhor clareza de dados e melhores curvas de luz, fato esse que torna a pesquisa mais compreensível, visualmente falando. Os resultados encontrados destas respectivas TIC ID's estarão na seção referente aos resultados.

3.3 SOFTWARES UTILIZADOS

Para processar os dados, utilizou-se a computação em nuvem da Google Cloud Platform, intitulada de *Google Colab*, um ambiente de *Notebook Jupyter* que não requer configuração e é executado na nuvem. Este ambiente permite a execução de diversas linguagens de programação em blocos separados. A linguagem utilizada para este trabalho foi o Python (versão 3.10.12), que é uma linguagem de programação caracterizada por sua simplicidade e por uma sintaxe considerada direta, assemelhando-se, algumas vezes, com um pseudocódigo. (Challenger et al., 2014).

O Python permite a distribuição de bibliotecas específicas que são disponibilizadas por pesquisadores para facilitar a resolução de problemas relativos à astronomia, tais como o *Lightkurve* e *Astropy*, que foram utilizados no presente trabalho e cuja plasticidade e praticidade serão demonstrados a seguir. Além destes, existe também o *Matplotlib*, que, diferente dos anteriores, é mantido pela comunidade em geral de usuários do *Python*.

O *Jupyter Notebook* foi utilizado nesse trabalho como uma forma de facilitar a execução dos códigos, uma vez que ele é o sistema mais utilizado para programação literária interativa (Shen, 2014). Ou seja, ele permite o uso em tempo real de análise de dados, documentando o resultado durante o processo e exibindo-os instantaneamente. Embora suporte diversas linguagens de programação, a mais utilizada para códigos executáveis é o Python (Pimentel et al., 2019). Além disso, utilizou-se o *Google Colab* ou “Colaboratório”, que é um serviço de nuvem gratuito hospedado pela empresa *Alphabet* (Vishaka Lall, 2018). Ele serve como uma espécie de ambiente digital (notebook), em que o estudante pode desenvolver práticas de programação em *Python*.

Consoante ao fato de ser um código simples, também foi amplamente popularizado, o que implica em inúmeras ferramentas disponíveis para seu uso, além de uma grande comunidade que disponibiliza soluções para os mais variados problemas que o usuário pode estar tentando solucionar, viabilizando o estudo dessa tecnologia. Não obstante, vários pacotes estatísticos são compatíveis com essa linguagem, permitindo que a funcionalidade seja personalizada para atender as mais variadas exigências, desde uso de ciência de dados até aprendizagem de máquina. Devido a isso, é uma linguagem bastante utilizada no desenvolvimento de ciências de dados ou até mesmo de pesquisas de cunho científico, o que explica sua utilização para os objetivos pretendidos.

3.3.1 Lightkurve

A biblioteca *Lightkurve* é uma ferramenta de análise de dados de séries temporais de fluxo astronômico, especialmente voltado para examinar os pixels e as curvas de luz provenientes das missões de exoplanetas Kepler, K2 e TESS da NASA. Este pacote, desenvolvido pela comunidade em linguagem Python, foi concebido com o intuito de facilitar sua utilização, reduzindo as barreiras de acesso para estudantes, astrônomos e cientistas interessados em analisar os dados provenientes dessas missões, além de tornar a análise destes dados mais homogênea. O *Lightkurve* oferece uma gama de ferramentas intuitivas para baixar, inspecionar e analisar os dados de séries temporais, contando com suporte documental substancial, incluindo um amplo programa de tutoriais (Collaboration, 2018).

Uma curva de luz, como já explicado, é um gráfico cujas flutuações denotam flutuações na luz em função do tempo (Benet et al., 2017). Essas flutuações são causadas por algum objeto que bloqueia a fonte de luz primária, ou seja, uma estrela. Esse objeto pode ser outra estrela (sistema binário) ou um planeta (Morison, 2008). É exatamente essas curvas de luz definidas que serão analisadas, o que permite identificar a presença de exoplanetas e o seu trânsito, por exemplo. As curvas de luz também são utilizadas no estudo de estrelas variáveis, mas, nesse caso, elas só serão mencionadas rapidamente na seleção de amostra, quando houver a exclusão de estrelas com a presença desse comportamento, sendo inadequadas para os fins desta pesquisa.

3.3.2 Astropy

Considerando a enorme fama e utilidade do Python, tornou-se necessário desenvolver pacotes com funcionalidades específicas, sobretudo no âmbito da astronomia, que é uma área que requer grandes quantidades de dados. Alguns esforços foram empregados no desenvolvimento de ferramentas desse tipo, embora não houvesse homogeneidade e à duplicação desses pacotes, o que tornava difícil a instalação dos mesmos e, por consequência, afetava negativamente a pesquisa e a reprodutibilidade à longo prazo.

Sendo assim, o *Astropy* é um pacote em Python comunitário para pesquisa em Astronomia (Collaboration, 2013), elaborado por um grupo de desenvolvedores que tinham, como principal objetivo, disponibilizar um conjunto de ferramentas na linguagem de programação Python, bem como simplificar pacotes de dados disponíveis que cubram muitas das aplicabilidades necessárias para pesquisadores, complementando pacotes mais gerais, como

Numpy (Oliphant 2006; Van Der Walt et al. 2011) e SciPy (Jones et al., 2004), que são indispensáveis para cálculos baseados em matrizes numéricas e algoritmos científicos mais gerais (como agrupamento e integração, por exemplo).

Posto as inúmeras funções a que ele se propõe, também é relevante acrescentar que a interface do código é feita visando um código descrito sem muitas margens para erro, além de ser de fácil compreensão, o que permite que os pesquisadores concentrem os esforços nos objetivos desejados em vez de se ocupar da conversão das diversas unidades de tempo, massas, distâncias e tamanhos da Astronomia, o que interfere diretamente no tempo da pesquisa.

3.3.3 Matplotlib

O *Matplotlib* (versão 3.9.0) é uma biblioteca Python de criação de gráficos 2D que pode ser usada para desenvolvimento de aplicações, além de geração de gráficos com qualidade e publicação para múltiplos sistemas operacionais. O *Matplotlib* é, segundo Barret et al. “[...] um pacote portátil de plotagem e geração de imagem 2D focado primariamente na visualização de dados científicos, de engenharia e financeiros” (2005, p. 91) o que justifica a sua utilização em pesquisas que trabalhem com um grande número de dados.

Essa biblioteca, desenvolvida inicialmente por John D. Hunter e mantida hoje em dia por uma grande equipe de colaboradores, engloba diversas funcionalidades no que diz respeito à criação de gráficos e geração de imagens, que podem ser salvas em diferentes formatos. Posto isso, a utilização dessa biblioteca é bastante adequada para as finalidades deste trabalho, uma vez que é necessário trabalhar com curvas de luz das estrelas, cujos dados são melhores lidos quando ilustrados em gráficos.

Além disso, o ambiente Jupyter Notebook permite tornar os gráficos e dados interativos, permitindo a ampliação de alguma seção específica, o que foi de extrema importância na análise das curvas de luz, uma vez que se tornara necessário ampliar os dados para visualizar o ruído, o trânsito, a profundidade deste trânsito, dentre outras informações contidas nos gráficos utilizados neste trabalho.

3.4 PROPRIEDADE DO EXOPLANETA – PERÍODO

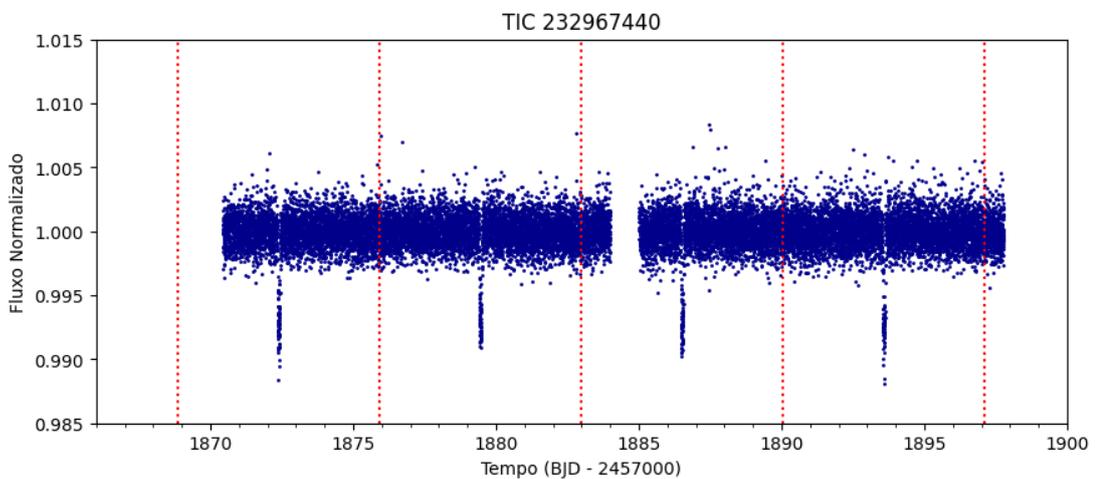
Atualmente, diversos modelos são utilizados na literatura para representar a dinâmica dos trânsitos planetários, baseados no padrão orbital e em parâmetros estelares, como raio, massa e características atmosféricas. Entre esses modelos encontram-se as transformadas de

Fourier e Lomb-Scargle, por exemplo (Vanderplas, 2018). No entanto, o objetivo desse trabalho visa trabalhar com conceitos menos abstratos, assim como mais visuais e didáticos para a obtenção de dados, uma vez que a ideia principal é facilitar o acesso a esse tipo de pesquisa, demonstrando facilidade desde a coleta de dados até a interpretação dos resultados.

O código abaixo demonstra como obter e determinar o período orbital de um planeta em trânsito a partir de uma curva de luz, obtida a partir do satélite espacial TESS. O período orbital é a separação no tempo entre eventos de trânsito consecutivos e representa a duração de um ano para aquele planeta. E o código ilustra um modelo criado a partir de dados reais do fluxo da estrela, obtida através de uma análise de periodicidade.

Para melhor visualização do perfil de trânsito que o planeta realiza na sua hospedeira, pode-se analisar a curva de luz “dobrada em fase” (que seria uma tradução livre para *phase folded*, em inglês). Esse conceito diz respeito à sobreposição de todos os trânsitos observados, que resultam no perfil de trânsito evidente que é possível ver na figuras 25 deste mesmo trabalho.

FIGURA 21 – ILUSTRAÇÃO DA PERIODIZAÇÃO DO TRÂNSITO PARA O TIC 232967440.



Fonte: Imagem produzida pelo código de autoria própria.

Na Figura 21 é possível perceber a presença de um exoplaneta pela variação na curva de luz da estrela, indicada pelo vale que é evidenciado entre o tempo 1870 e 1875, para o primeiro trânsito, por exemplo. A curva de luz está representada pelos pontos azuis e as linhas tracejadas estão espaçadas de acordo com o período do exoplaneta encontrado. Percebe-se que

há uma frequência com que estes vales nas curvas de luz são encontrados, e a periodicidade do trânsito infere a presença de um exoplaneta cujo período pode ser bem definido.

Como observado, a presença de todos os trânsitos observados são úteis para a determinação da profundidade do trânsito e do raio, pois a sobreposição desses dados será capaz de gerar uma única curva de luz periodizada, como já explicado na seção anterior, possibilitando uma melhor visualização dos dados.

3.5 PROPRIEDADE DO EXOPLANETA – RAIOS

Durante um trânsito, tem-se a luz do disco estelar, menos a parte proveniente da fração bloqueada pelo planeta, mais a luz proveniente do planeta. Na maioria das vezes, a luz do planeta é desprezível se comparada à luz da hospedeira, portanto, a queda no fluxo observado da estrela é proporcional à fração do disco estelar que está sendo ocultado pelo exoplaneta. Dispensando o formalismo matemático, é possível estabelecer, a partir da profundidade do trânsito, uma estimativa para o raio do planeta.

Esse é um importante parâmetro que pode fornecer diversas informações sobre os tipos de planetas que pertencem ao referido sinal coletado, ou seja, se é um planeta gasoso ou rochoso. Também pode auxiliar a descartar falsos positivos, como, por exemplo, sinais que são correspondentes a objetos maiores do que cerca de 20 raios terrestres, uma vez que estes provavelmente não são planetas. Para isso, pode-se determinar o raio do planeta usando a ideia da Figura 7, repetida aqui para facilitar o entendimento:



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As relações matemáticas utilizadas são de fácil compreensão, e foram utilizadas nesta pesquisa da seguinte forma:

Área da estrela, como vista da Terra:

$$A_* = \pi R_e^2$$

Área que o planeta encobre da estrela:

$$A_p = \pi R_p^2$$

Observe que não se trata da área superficial da estrela nem do planeta, mas da projeção de uma superfície esférica no plano celeste.

Profundidade do trânsito (P):

$$P = \frac{A_p}{A_*}$$

$$P = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_*^2} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

O que nos leva a uma importante relação:

$$R_p = \sqrt{P} R_* \quad (7)$$

Onde:

- R_p é o raio do planeta;
- R_* é o raio da estrela (que pode ser encontrado em ExoFOP);
- A profundidade do trânsito pode ser determinada experimentalmente pela queda de brilho da estrela durante o meio do trânsito a partir da curva de luz.

Vale salientar que este é um modelo simplificado da distribuição de brilho da estrela em relação a um observador. Na prática, vemos um centro mais brilhante e as bordas ficando gradualmente mais escuras, e esta queda de brilho depende da temperatura da estrela e do comprimento de onda a ser observado, mas para nosso modelo simplificado vamos assumir uma distribuição uniforme de brilho na estrela, o que pode subestimar o tamanho do exoplaneta em relação à estrela.

3.6 CÓDIGO PARA OBTER O PERÍODO ORBITAL DO EXOPLANETA

O primeiro parâmetro a ser determinado a partir do código descrito abaixo é o período, que corresponde à translação do planeta em volta da sua hospedeira. O passo-a-passo a seguir da aplicação do código desenvolvido e os resultados obtidos são referentes à estrela alvo do TESS TOI 1173, de TIC ID 232967440, para a qual a existência de um exoplaneta em órbita já foi confirmada e bem estabelecida na literatura. Além disso, mostrou-se promissora em todas as etapas de execução do código, apresentando trânsitos muito bem definidos, pouquíssimo ruído e bastante clareza na determinação dos parâmetros pretendidos.

O código foi reescrito e revisado diversas vezes até culminar nessa versão final que, quando publicado, poderá servir para outras pesquisas. O código será apresentado a seguir em blocos, onde será explicado, em linhas gerais, o significado de cada código e de linhas específicas importantes para a compreensão do trabalho.

BLOCO 1 – Bibliotecas necessárias para o funcionamento do código.

```
import ipywidgets as widgets
from ipywidgets import interact
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import (AutoMinorLocator)

import lightkurve as lk
from astropy import units as u
from astropy import constants as const
```

O primeiro passo para a obtenção dos dados é a importação de algumas bibliotecas disponíveis no próprio Python, a começar pela *ipywidgets*, que permite fazer gráficos interativos no *jupyter notebook*. Em seguida, importa-se o *numpy*, utilizado para a execução de alguns cálculos necessários. Posteriormente, tem-se o *matplotlib*, responsável pela plotagem dos gráficos presentes no código e ainda, o *lightkurve*. O comando para importar o *astropy* também é utilizado, uma vez que essa biblioteca fornece colaborações entre diferentes tipos de grupos de pesquisa, além de fornecer pacotes relativos à cosmologia, por exemplo, utilitários para a manipulação de dados com especificações típicas da área da Astronomia, como já foi explicado na seção 4.3.

BLOCO 2 - Parâmetros da estrela escolhida obtidos por catálogo

```
TICN = 'TIC 232967440'
M_star = 0.917 * const.M_sun
R_star = 0.96 * u.Rsun
R_plan = 9.39131 * u.Rearth
semiem_plan = 0.0702 * u.au
periodo_plan = 7.06387 * u.day
t0 = 2460341.784305 - 2457000.0
```

Já no segundo bloco, utilizando o catálogo virtual ExoFOP, foi possível obter os parâmetros necessários para a execução do código, que são eles:

- TICN, referente à identificação da estrela;
- `M_star` - A massa da estrela presente no catálogo ExoFOP, em unidades de massas solares;
- `R_star` - O raio da estrela, também obtido no mesmo catálogo, em unidades de raios solares;
- `R_plan` - Raio do planeta, obtido na literatura, em unidade de raios terrestres;
- `semiem_plan` - Semi-eixo maior do planeta do artigo de referência, obtido pelo catálogo;
- `periodo_plan` - Período orbital do planeta, também proveniente do artigo de referência;
- `t0` - Instante da detecção do primeiro trânsito, de onde será subtraído o valor encontrado por 2457000.0, uma vez que no catálogo do ExoFOP esse parâmetro encontra-se em Dias Julianos Baricêntricos (BJD).⁸

É importante destacar que, nessa parte do código, esses parâmetros (raio, semieixo maior e período) são guardados apenas para comparação posterior com os valores encontrados, uma vez que a intenção do código é encontrar esses dados em comparação com trabalhos anteriormente publicados.

BLOCO 3 - Obtenção dos dados

```
available_data_select = lk.search_lightcurve(TICN, author = 'SPOC')
cl_colecao = available_data_select.download_all().stitch()
```

⁸ Dias Julianos é uma data, seu início corresponde ao meio-dia de 1 de Janeiro de 4713 a.C., no calendário juliano. Essa data, que é uma maneira de contar os dias de forma contínua, é utilizada principalmente por astrônomos e pesquisadores, facilitando a diferença entre datas, que permite registrar eventos astronômicos, além de acompanhar observações ao longo do tempo. BJD é uma correção de JD para o baricentro do Sistema Solar.

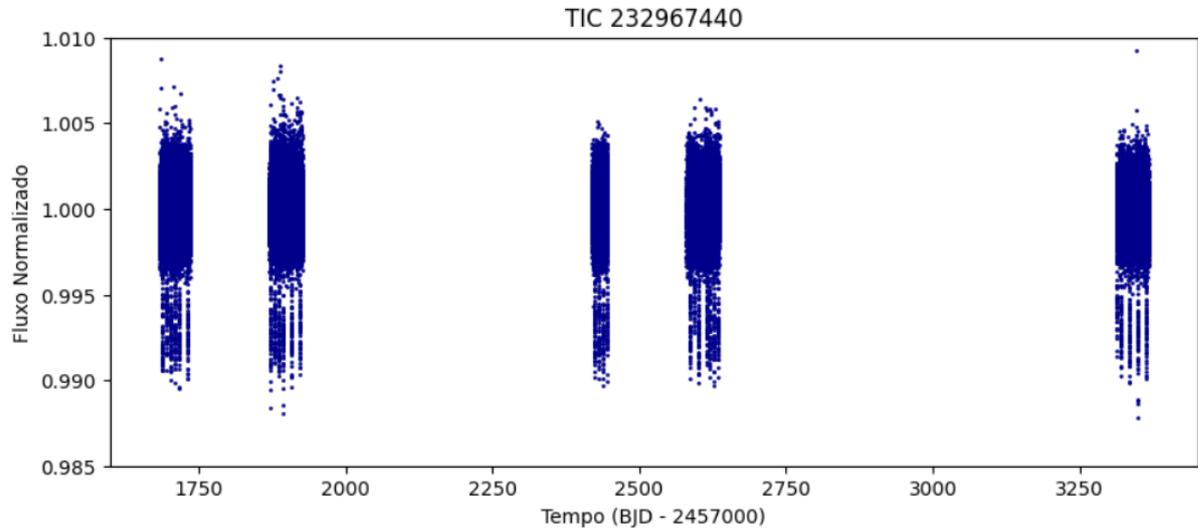
No terceiro bloco, a sequência de comandos acima realizará a busca através do pacote *lightkurve* e em seguida o *download* dos dados, sendo esta primeira linha referente às curvas de luz, enquanto o comando da segunda tem a tarefa de salvar todas as curvas de luz disponíveis, salvando os dados temporariamente na memória, podendo também ser “baixados” para o computador com linhas de comando adicionais, caso seja de interesse do pesquisador. Além disso, as curvas de luz também estão normalizadas, pelo comando “.stitch()” para o valor médio de brilho igual a 1.

BLOCO 3 – FIGURA 20: Todas as curvas de luz obtidas

```
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4))
plt.scatter(cl_colecao.time.value, cl_colecao.flux.value, c = 'darkblue', s =
1)
plt.title(f"{TICN}")
plt.xlabel("Tempo (BJD - 2457000)")
plt.ylabel("Fluxo Normalizado")
plt.ylim(0.985,1.010)
plt.savefig(f"{TICN}_CL_todos_setores.png", bbox_inches='tight')
plt.show()
```

Neste bloco, as curvas de luz obtidas serão exibidas através de um gráfico de fluxo normalizado por tempo. A normalização da curva de luz consiste em dividir os fluxos medidos pelo fluxo mediano. Explicar Na sétima linha, o comando escrito salva a imagem em formato png.

FIGURA 22 – CURVA DE LUZ GERADA A PARTIR DOS COMANDOS ANTERIORES, COM A PRESENÇA DE TODAS AS CURVAS DE LUZ DISPONIBILIZADAS PARA A ESTRELA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Esses vazios presentes na Figura 22 dizem respeito à ausência de observação, portanto, infere-se que a estrela não foi observada continuamente entre cada setor. É perceptível também que esse trânsito compreende um intervalo de tempo muito longo, cerca de 600 dias de observação, o que dificulta a visualização de cada trânsito individualmente.

BLOCO 4 - Estimativa inicial do período

```
transito_t1 = 1872.40 # mudar para alinhar com o primeiro trânsito
transito_t2 = 1879.46 # mudar para alinhar com o segundo trânsito
periodo_inicial = transito_t2 - transito_t1 # 0 período é intervalo entre dois
trânsitos consecutivos
```

A determinação do período é feita em duas etapas, uma estimativa inicial e em seguida uma análise mais precisa das curvas de luz. No bloco 4, é estimado o período a partir do intervalo entre dois trânsitos consecutivos. O parâmetro “`periodo_inicial`” é dado em dias, a partir da diferença de tempo entre a ocorrência de t_1 e t_2 . Após essa estimativa, é necessário alinhar recursivamente t_1 e t_2 para que as curvas tracejadas em vermelho coincidam com o exato momento do trânsito, sugerindo numerações que estejam dentro da faixa do eixo x do gráfico, como veremos a seguir na Figura 21:

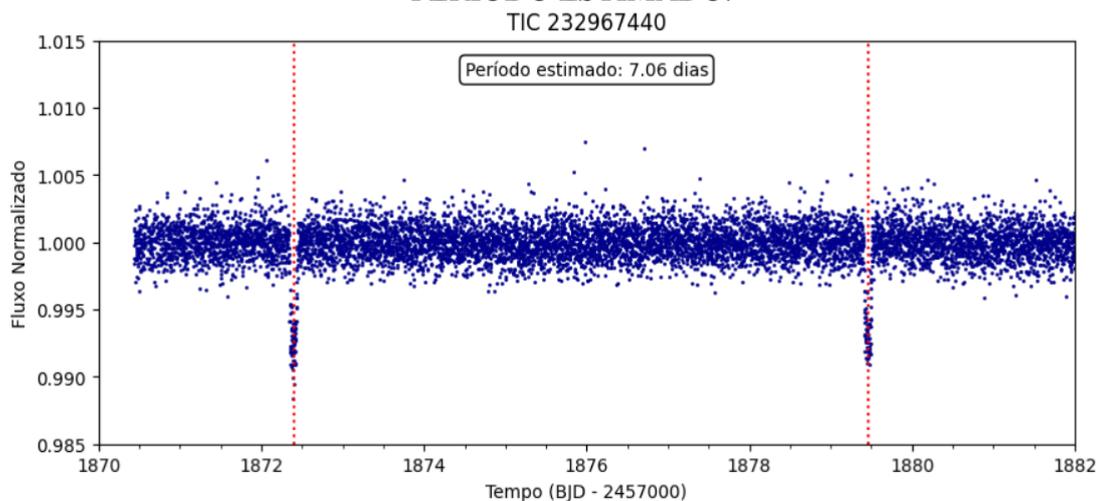
BLOCO 5 – FIGURA 23: Determinando o período

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4))
ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator())
ax.set_axisbelow(True)
plt.scatter(cl_colecao.time.value, cl_colecao.flux.value, c = 'darkblue', s =
1)
plt.axvline(transito_t1, ls=':', c = 'r')
plt.axvline(transito_t2, ls=':', c = 'r')
plt.title(f"{TICN}")
plt.xlabel("Tempo (BJD - 2457000)")
plt.ylabel("Fluxo Normalizado")
plt.xlim(1870,1882)
plt.ylim(0.985,1.015)

plt.text(.5, .95, f"Período estimado: {round(período_inicial, 4)} dias",
ha='center', va='top',
        transform=ax.transAxes, size=10, bbox=dict(boxstyle='round', fc='w'))
plt.savefig(f"{TICN}_CL_transito.png", bbox_inches='tight')
plt.show()
Período: ~ 7.06 dias

```

FIGURA 23 – DETERMINAÇÃO DO PERÍODO APROXIMADO A PARTIR DO PERÍODO ESTIMADO.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do código.

A Figura 23 apresenta uma riqueza maior de detalhes, isso porque nessa etapa do código é feita uma ampliação no eixo x – eixo das abcissas, relativo ao tempo. Ou seja, na Figura 7 é possível ver, no referido eixo, intervalos de dias terrestres dos dados obtidos. O que é feito aqui em relação à Figura 20 é destacar um intervalo de tempo menor, para que os dados sejam melhor verificados, permitindo visualizar inclusive se há a presença de ruído ou variabilidade estelar, o que dificultaria a leitura dos trânsitos e, portanto, a pesquisa.

Sendo assim, escolheu-se o intervalo de tempo entre 1870 e 1882 Dias Julianos (depois da data 2457000 BJD), o que facilitou a visualização da curva de luz, abrindo espaço também para a identificação dos dois trânsitos, pois nota-se claramente uma variação nessa curva, acompanhadas por quedas abruptas, curtas e periódicas no brilho da estrela, inferindo a presença de um exoplaneta. A linha tracejada vermelha foi inserida no código na intenção de facilitar a precisão do instante de cada trânsito, o que é feito lá no bloco 4, após a estimativa feita nesse bloco.

Ao encaixar as linhas tracejadas com a variação na curva de luz representada no gráfico, o período fica mais bem definido e, portanto, é possível avançar para os blocos seguintes.

BLOCO 6 – Função para gerar uma curva de luz periodizada

```
def plot_phase_folded_color(periodo, t_inicial):
    # periodizando a curva de luz
    cl_periodizada = cl_colecao.fold(period = periodo, epoch_time =
t_inicial)
    fig, ax = plt.subplots(figsize = (10,4))
    plt.scatter(cl_periodizada.time.value, cl_periodizada.flux.value, c =
cl_periodizada.time_original.value, alpha = 1, s = 1.5, marker = '.')
    plt.text(.95, .95, f"T = {round(periodo,6)} dias", ha='right', va='top',
transform=ax.transAxes,
size=10, bbox=dict(boxstyle='round', fc='w'))
    plt.title(f"{TICN}")
    plt.xlabel("Fase (JD)")
    plt.ylabel("Fluxo normalizado")
    plt.xlim(-0.4,0.4)
    plt.ylim(0.985,1.015)
    plt.savefig(f"{TICN}_periodograma.png", bbox_inches='tight')
    plt.show()
```

Neste bloco, tem-se a definição da função “plot_phase_folded_color”, do pacote lighkutve, que permite essa parte essencial da análise e, além disso, envolve a curva de luz sobre si mesma em um intervalo de tempo determinado, o que posteriormente servirá para o

gráfico de comando interativo, que logo será explicado. Além disso, esta função ⁹ é adaptada de outra fornecida pelos pesquisadores do TESS, o que corrobora com a acessibilidade desses dados e a facilidade para trabalhar com linguagem de programação, mesmo tendo pouco conhecimento. Para melhor visualização do perfil do trânsito, pode-se analisar a curva de luz “dobrada em fase” (do inglês *phase folded*), que consiste na sobreposição de todos os trânsitos observados.

Para tanto, o algoritmo utiliza o restante da divisão entre os tempos de observação e o período do sinal, que é obtido anteriormente; os trânsitos, que são separados por múltiplos do período, terão o mesmo resto da divisão, de forma que podem ser sobrepostos, sendo assim, o perfil de trânsito se torna evidente (exceto se o período utilizado não for adequado). O código permite, portanto, executar a modelagem a partir da curva de luz dobrada, sendo limitada a valores de tempo que variam de 0 a 1, aplicando o modelo a uma série de valores de mesmo tamanho que a série temporal original, porém no intervalo desejado.

BLOCO 7 - Gráfico interativo

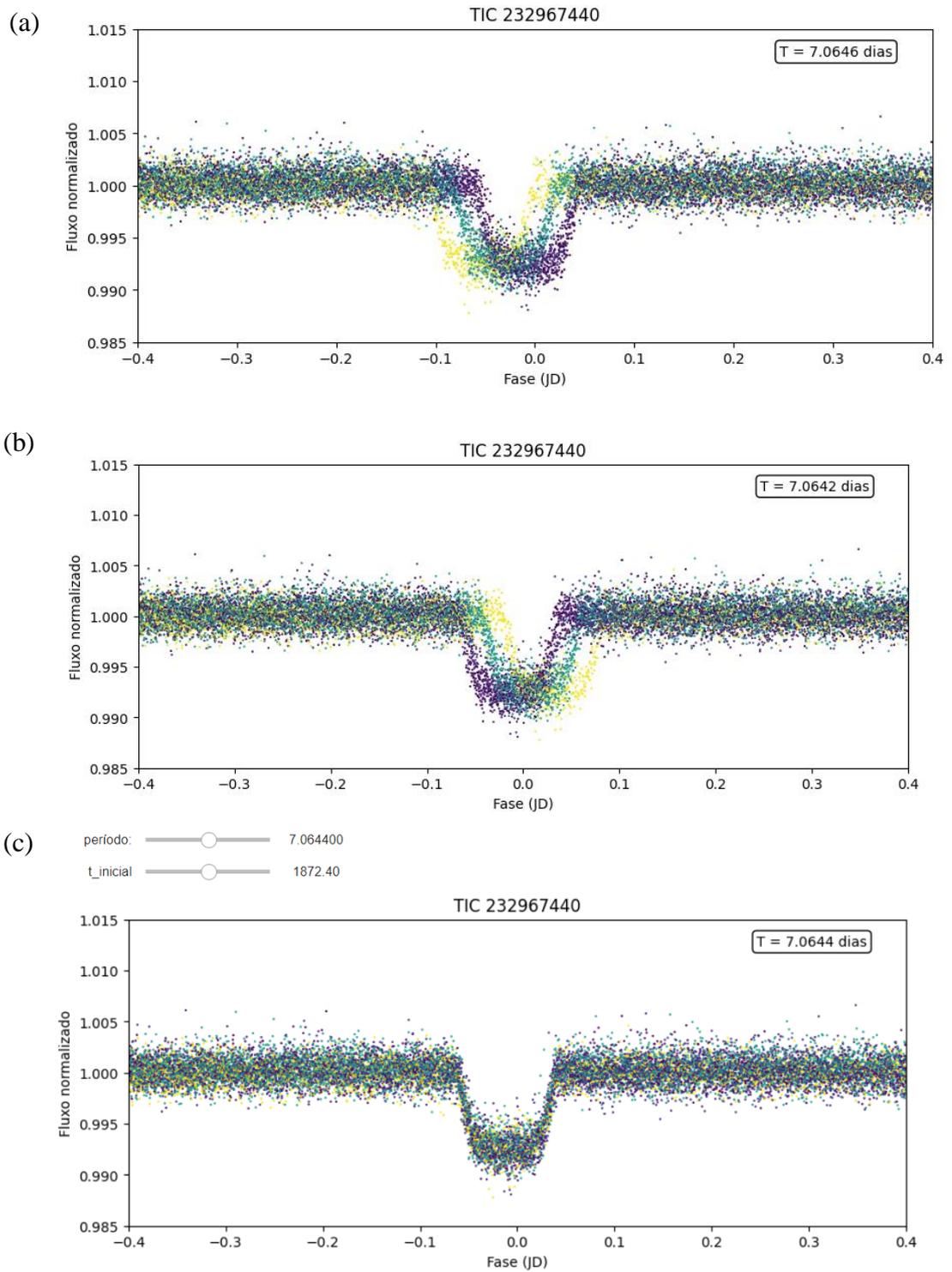
```
período_interativo = 7.06440
interact(plot_phase_folded_color, período =
widgets.FloatSlider(value=período_interativo,min=período_interativo-
0.03,max=período_interativo+0.03,step=0.000001,description='período:',
readout_format='.6f'), t_inicial = transito_t1)
```

Este bloco chama a função “*plot_phase_folded_color*” definida no bloco 7 em um gráfico interativo, permitido pelo pacote *ipywidgets* e o ambiente *Jupyter Notebook*. Este comando irá gerar os gráficos da Figura 24.

Na Figura 24, portanto, é possível observar que as cores dos pontos variam com o tempo, permitindo assim identificar os diferentes trânsitos. Esses trânsitos ficam sobrepostos e podem ser visualizados pela defasagem das cores amarelo, verde e roxo, que correspondem cada uma a um trânsito diferente. Para esse bloco em específico, o valor do período foi alterado diversas vezes até os diferentes trânsitos se encaixarem, o que significa que encontramos o período orbital do exoplaneta, como pode ser visualizado no último painel (c). Os painéis (a) e (b), portanto, correspondem a períodos variando de 0,0002 dias (17,28 segundos) para mais e para menos, o que mostra a precisão com que podemos obter o período orbital de um planeta desde que se tenha à disposição vários trânsitos correspondendo a um longo período de observação.

⁹ Essa função utilizou dados do Planet Hunters Coffee (planethunters.coffee), sendo acessados em 13 de Março de 2024 (está inativo hoje).

FIGURA 24 – GRÁFICOS INTERATIVOS GERADOS.



BLOCO 8 - Período final

```

periodo_final = 7.0644*u.day
print (f"Período encontrado: {periodo_final.value} dias")

```

Nesse bloco, guardamos a informação do período na variável “`periodo_final`”, com a unidade de dias, o que acontece graças ao uso do pacote *astropy* ao multiplicar o valor pelo comando “`*u.day`”.

BLOCO 9 - Periodograma final com o período estimado, com o $t_0 = 0$ do primeiro trânsito.

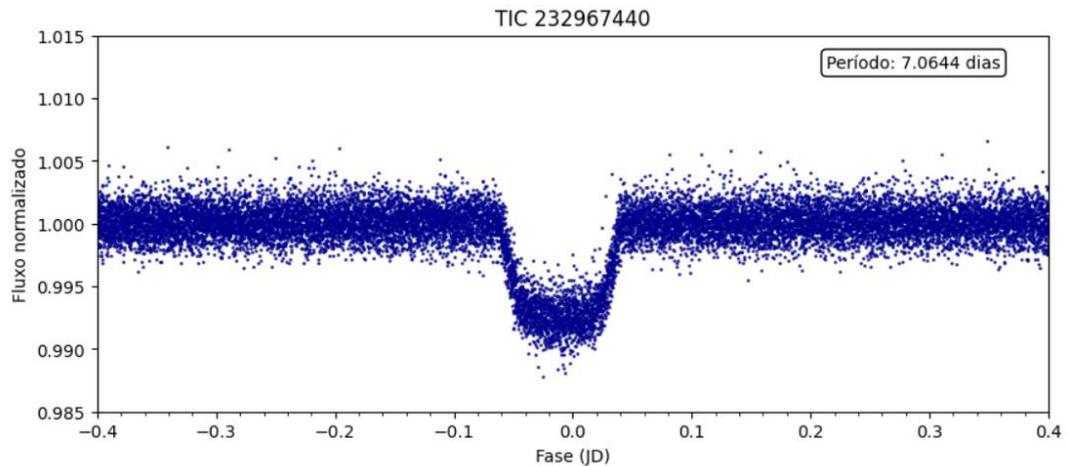
```

lc_phased = cl_colecao.fold(period = periodo_final, epoch_time = transito_t1)

fig, ax = plt.subplots(figsize = (10,4))
ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator())
plt.scatter(lc_phased.time.value, lc_phased.flux.value, c = 'darkblue',
alpha=0.75, s = 1)
plt.text(.95, .95, f"Período: {periodo_final.value} dias", ha='right',
va='top', transform=ax.transAxes,
size=10, bbox=dict(boxstyle='round', fc='w'))
plt.title(f"{TICN}")
plt.xlabel("Fase (JD)")
plt.ylabel("Fluxo normalizado")
plt.xlim(-0.4,0.4)
plt.ylim(0.985,1.015)
plt.savefig(f"{TICN}_periodograma_final_preto.png", bbox_inches='tight')
plt.show()
Período encontrado: 7.0644 dias

```

No bloco acima, o código descrito gera a Figura 25, que se trata do periodograma final, com o período final encontrado a partir dos dados. Esse periodograma é uma junção de todos os trânsitos encontrados, resultando em uma aproximação adequada do período desejado.

FIGURA 25 – PERIODOGRAMA FINAL.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a determinação do período, utilizando a função do periodograma interativo visto anteriormente, encontra-se o exato meio do trânsito, que fica muito evidente com o período correto. Na Figura 25, é possível verificar que o ruído é consideravelmente menos aparente, e a curva de luz fica bem definida, possibilitando a visualização da profundidade do trânsito e a determinação do raio do planeta, que será feito posteriormente. O produto da função é obtido passando os dados resultantes para um gráfico, através da classe `Periodogram` do pacote `Python Lightkurve` (Collaboration et al., 2018).

BLOCO 10 – 3ª Lei de Kepler para obter o semieixo maior

```
Semi_EM = ( ( const.G * M_star * ( periodo_final.to(u.second) ) ** 2 ) / ( 4 *
np.pi ** 2 ) ) ** (1/3)
Semi_EM.to(u.au)
```

O semieixo maior do planeta obtivo através da equação (6) da Terceira Lei de Kepler, deduzida na seção 1 do referencial teórico deste referido trabalho.

Além disso, a presença da biblioteca `astropy`, utilizada nessa célula em específico, demonstra mais uma vez sua versatilidade ao trabalhar com as constantes da física (`const.G`, que é a Constante da Gravitação Universal guardada nos bancos de dados de acordo com a última versão da CODATA, 2018) para chegar ao resultado esperado nas unidades do Sistema Internacional de unidades e em seguida converter o resultado para Unidades Astronômicas

“Semi_EM.to(u.au)”, de forma que é possível focar exclusivamente no problema, ao invés de focar também na conversão de unidades, o que é um tempo desperdido ineficientemente.

3.7 CÓDIGO PARA OBTER O RAI DO PLANETA

BLOCO 11 - Raio do planeta

```
tam_bin = 3/24/60
cl_periodizada_binned = lc_phased.bin(tam_bin
flux_transito = 0.9924
prof_transito = 1.0 - flux_transito
print (f"Profundidade do trânsito: {round(prof_transito,6)} ")
```

A partir da profundidade do meio do trânsito é possível encontrar o raio. A partir daqui o código está escrito com o objetivo de determinar esse segundo parâmetro. Para esta etapa, a quantidade de ruído no brilho da estrela pode ser importante na precisão desta medida, portanto vamos usar um método simples para reduzir este ruído, que é obter a média da intensidade do fluxo da estrela em um certo intervalo de tempo – o que chamaremos de *bin*. Na primeira linha desse bloco, tem-se a definição do *bin*, que é a média do fluxo dentro daquele intervalo de tempo.

O tamanho desse bin pode variar de estrela para estrela de acordo com a qualidade do sinal observado e será dado por T minutos em unidades de dia, dividindo por 24 horas e por 60 minutos. Logo a seguir, o comando do bin de T minutos será utilizado para reduzir o ruído das observações.

BLOCO 12 - Estimando a profundidade do trânsito

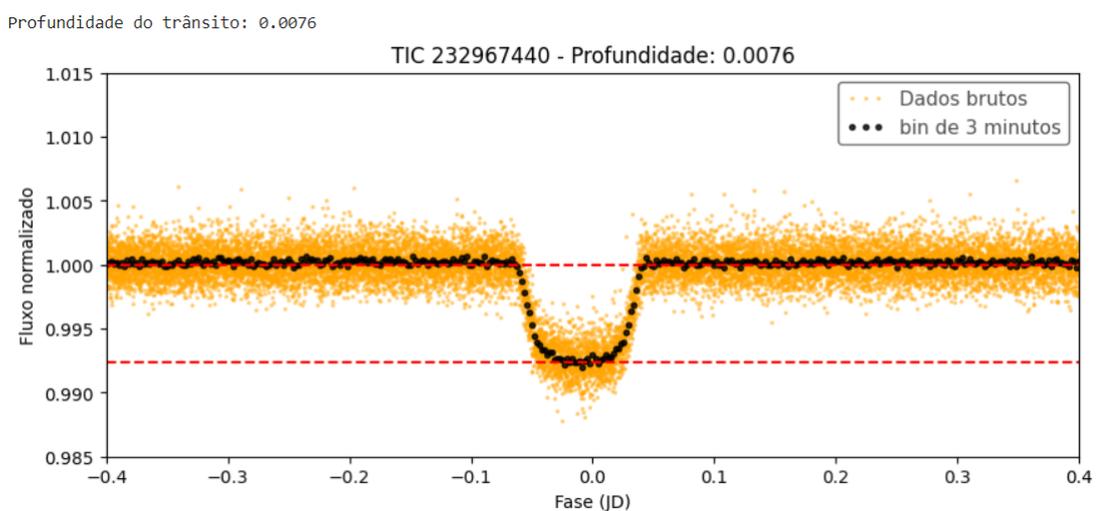
```
fig, ax = plt.subplots(figsize = (10,4))
lc_phased.plot(ax = ax, marker = '.', linewidth = 0, color = 'orange', alpha
= 0.4, markersize = 3, label = 'Dados brutos')
cl_periodizada_binned.plot(ax = ax, marker = 'o', linewidth = 0, color = 'k',
alpha = 0.8, markersize = 3, label = f'bin de {round(tam_bin*24*60)}
minutos')
plt.axhline(1.0, ls = '--', color = 'red')
plt.axhline(flux_transito, ls = '--', color = 'red')
plt.xlim(-0.4,0.4)
plt.ylim(0.985, 1.015)
plt.xlabel('Fase (JD)')
plt.ylabel('Fluxo normalizado')
plt.title(f"{TICN} - Profundidade: {round(prof_transito, 5)}")
plt.savefig(f"{TICN}_periodizada_profundidade.png", bbox_inches='tight')
```

```
plt.show()
```

Similarmente ao que foi feito para a caracterização do período, o valor do fluxo de trânsito (`flux_transito`) é alterado até a linha tracejada inferior coincidir com o meio do trânsito, enquanto o fluxo da estrela, por estar normalizado tem valor de 1,0. e, logo na linha seguinte, seja determinado a profundidade do trânsito na variável “`prof_transito`”.

Já nesse bloco, a estimativa da profundidade do trânsito é feita utilizando os dados brutos, obtidos pela periodização. Mais uma vez, o eixo das abscissas (tempo) pode ser alterado na sétima linha da célula acima, tornando possível diferenciar os alvos, dependendo da duração do trânsito.

FIGURA 26 – PERIODOGRAMA UTILIZADO PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No gráfico acima (Figura. 26), é possível notar a presença de ruído quando há a sobreposição dos dados, ao passo que a preta destacada no meio da curva de luz possibilite uma melhor visualização. É possível, ainda, perceber na legenda imagem que há uma diferença. Os dados destacados em laranja dizem respeito aos dados brutos, enquanto destaque preto indica um bin de 3 minutos, mencionado no código do bloco 13.

3.8 SEMI-EIXO MAIOR

Para calcular o semi-eixo maior, é usada a Terceira Lei de Kepler, de forma que a seguinte seção explica-se pela necessidade de entender qual relação foi utilizada no código a fim de encontrar esse determinado parâmetro. Portanto, temos:

Versão newtoniana simplificada da 3ª Lei de Kepler (assumindo que $M_* \gg m_p$):

$$a = \sqrt[3]{\frac{GM_*T^2}{4\pi^2}} \quad (8)$$

Desta forma, podemos calcular o semi-eixo maior a partir do período que pode ser obtido a partir da curva de luz e da massa da estrela, obtida na literatura científica a partir de métodos independentes.

BLOCO 13 - Cálculo do raio com os resultados obtidos

```
r_pl_solar_radius = np.sqrt(prof_transito) * R_star # raio do planeta em
raios solares
r_pl_Terra = r_pl_solar_radius.to(u.Rearth) # convertendo para raios
terrestres
print (f"Raio do planeta: {round(r_pl_Terra.value,3)} raios terrestres")
```

No último bloco, tem-se a determinação do raio, em raios solares. Na segunda linha dessa célula, converte-se o valor para raios terrestres, o que ajuda na leitura dos dados obtidos.

3.9 ERRO RELATIVO

Nas ciências exatas, a coleta de informações é comumente feita através da realização de um conjunto de medidas de grandezas, relacionadas direta ou indiretamente com a análise do fenômeno em questão. Medir uma grandeza significa compará-la com uma outra de mesma natureza, escolhida como unidade. O resultado dessa comparação denomina-se medida da grandeza e nela estão contidas três informações: 1. o valor numérico, que é um número inteiro ou fracionário; 2. a precisão, expressa pelo número de algarismos significativos; 3. a unidade correspondente adotada.

A precisão de uma medida é inversamente proporcional ao seu erro relativo, ou seja, quanto menor o erro relativo maior é a precisão, e vice-versa. O erro relativo (E_r) de uma medida X é definido como o quociente de seu erro absoluto ΔX pelo seu valor mais provável X . O desvio relativo é quem indica melhor a precisão da medida, sendo comum expressá-lo em termos percentuais.

$$E_r = \frac{\Delta X}{X} \quad (9)$$

Posto isso, dispondo do catálogo do TESS, bem como dos artigos de referências cujos parâmetros podem ser acessados publicamente, fez-se o confronto de informações a fim de comparar a relevância e precisão deste trabalho. Foi também escrito um bloco de códigos para medir o erro relativo entre os dados fornecidos da literatura, adotados como o valor mais provável, e os adquiridos com o algoritmo aqui apresentado, de forma que é possível se ter noção, de imediato, se a execução da pesquisa está indo pelo caminho correto.

A célula abaixo foi retirada do código e representa um exemplo de confronto de dados feitos diretamente no código-fonte. Nesse caso, os dados referem-se ao erro relativo do período e do semi-eixo maior do exoplaneta TOI 1130 b.

3.10 CÓDIGO DO ERRO RELATIVO

```
erroT = abs(periodo_final-periodo_plan)/periodo_plan * 100
print (f"Erro relativo: {round(erroT.value,5)}%")
Erro relativo: 0.00744%
```

```
erro_a = abs(Semi_EM.to(u.au)-semiem_plan)/semiem_plan * 100
print (f"Erro relativo: {round(erro_a.value,2)}%")
Erro relativo: 2.48%
```

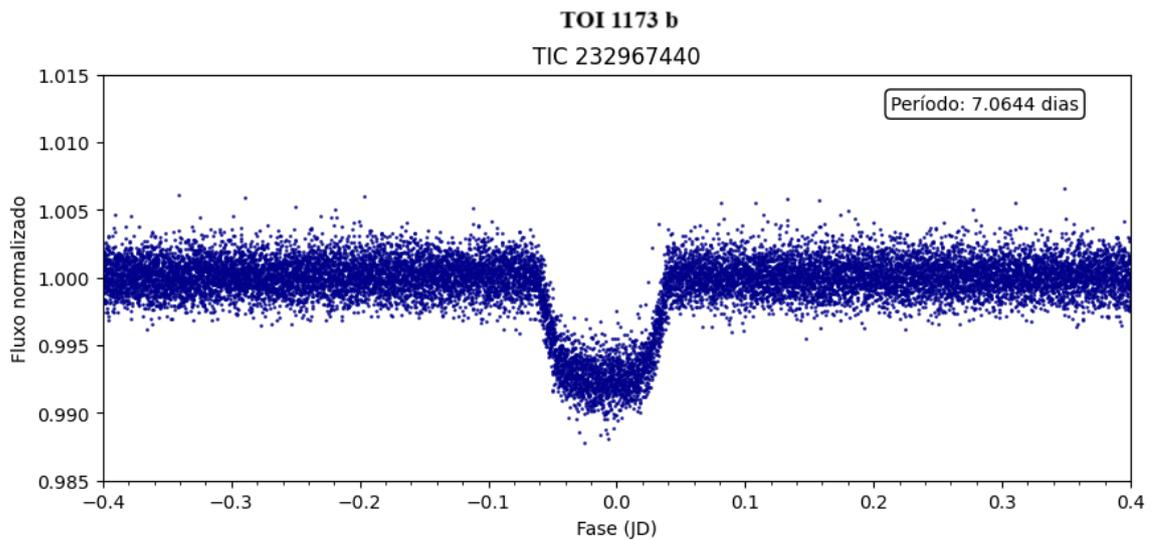
Os dados presentes nos estudos relacionados à descoberta de exoplanetas permitiu a realização de um confronto estatístico no próprio código-fonte, como demonstrado na célula acima.

Sabendo o que é erro relativo, é possível inserir no código a relação (eq. 9) referente a esse tipo de análise, o que facilita esse cruzamento de dados e norteia o pesquisador no que tange aos procedimentos realizados para atingir o resultado, ao mesmo tempo em que demonstra a consonância dos dados utilizados, pois, do contrário, esse erro relativo seria bem maior ou até exorbitante, denotando alguma falha ou na inserção dos dados logo nas primeiras células ou na execução do código ao longo da pesquisa.

4 RESULTADOS

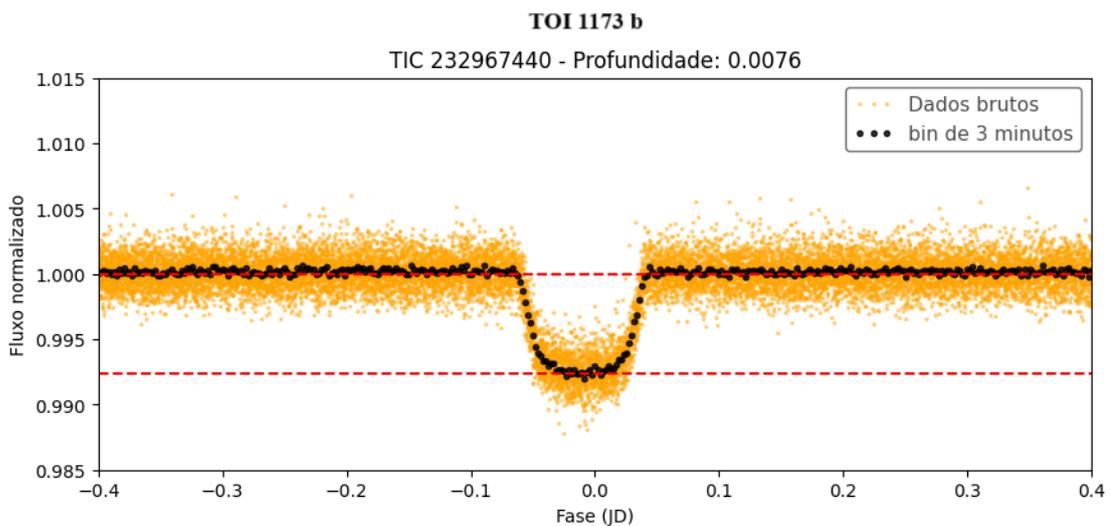
O código-fonte desenvolvido neste trabalho foi utilizado para analisar os dados das estrelas da Tabela 2, seguindo os passos descritos na seção 4, bem como suas respectivas subseções. Os resultados obtidos para cada estrela da amostra final foram comparados com os dados presentes na literatura de estudos relacionados.

FIGURA 27 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA TOI 1173 b.



Fonte: Autoria própria.

FIGURA 28 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1173 b.



Fonte: Autoria própria.

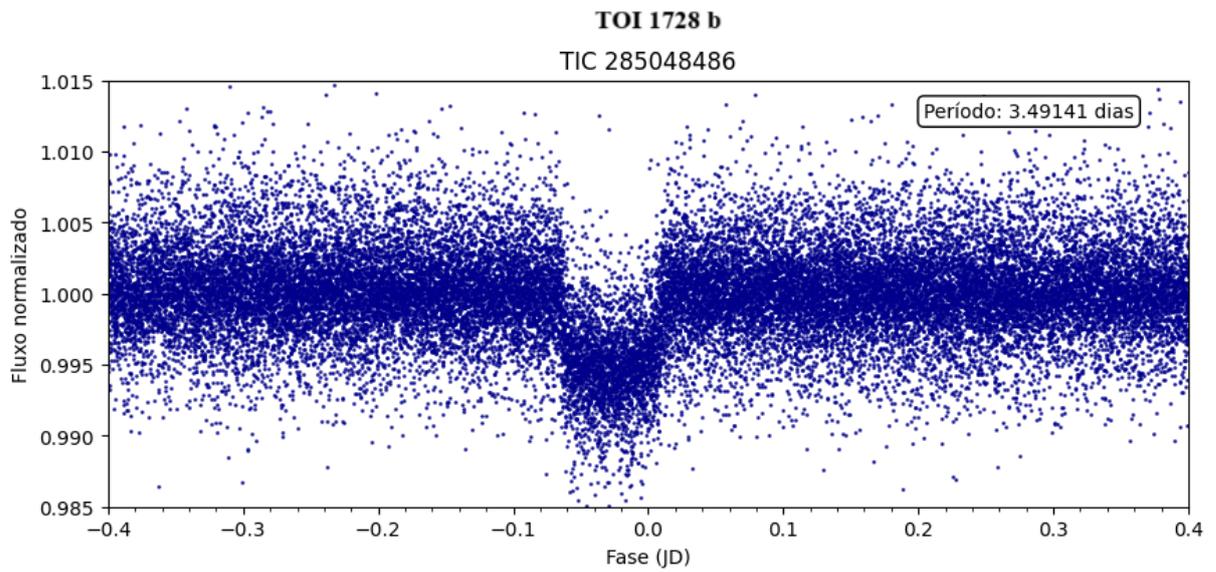
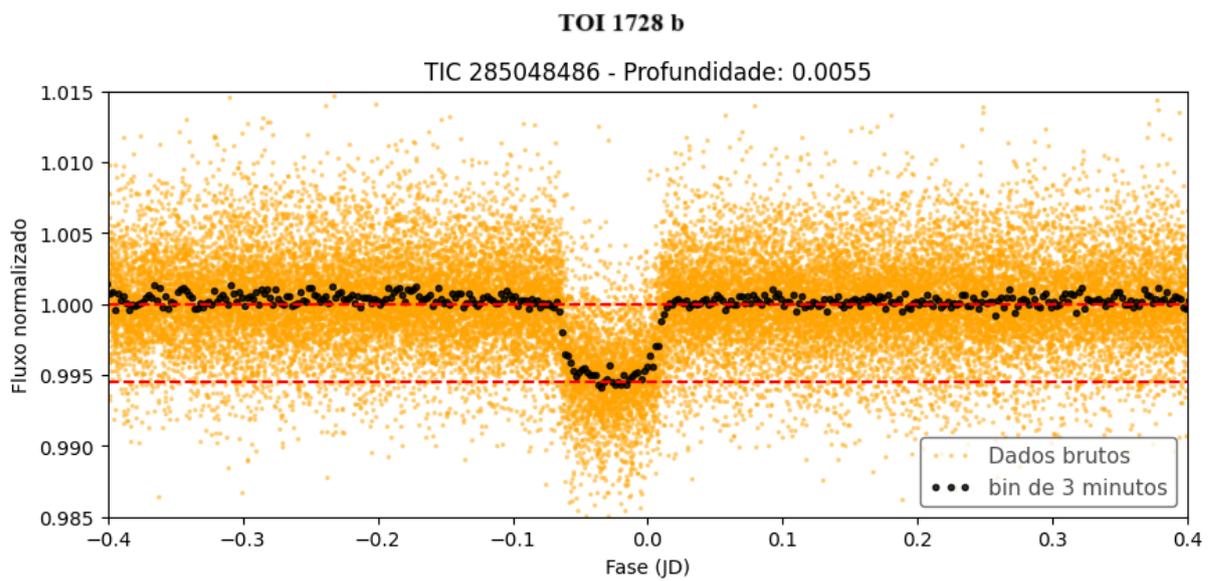
A estrela modelo da referida amostra selecionada trata-se da TOI 1173 (TIC 232967440), sendo a única estrela desse sistema binário a apresentar um exoplaneta detectado em sua vizinhança, que refere-se ao 1173 b. A estrela foi previamente estudada com base nas curvas de luz (Galarza et al., 2024), relevando vários trânsitos periódicos. No presente trabalho, revisitou-se as curvas de luz TESS dessa estrela, explorando os dados obtidos com as ferramentas descritas no capítulo 3.

A estrela foi observada pelo TESS durante os Setores 14, 15, 21, 22, 41, 47, 48, 74 e 75¹⁰(informação essa que pode ser verificada no link presente na nota de rodapé). Identificadores juntos a informações diversas sobre a estrela são listadas no catálogo de entrada do TESS (TIC – TESS Input Catalog, (Stassun et al., 2019)). As curvas de luz da estrela, como já mencionado em seções anteriores, são disponibilizadas publicamente. Com o auxílio do código-fonte, foram removidas eventuais descontinuidades, bem como tendências de longa duração, deixando a curva normalizada em relação à média do fluxo ao longo de sua linha de base. Todos os trânsitos foram sobrepostos de forma a gerar uma única curva de luz, que define precisamente o período final, como é possível observar na Figura 27, cujo parâmetro está identificado no lado superior direito. A Figura ainda mostra as linhas de base (durações totais das curvas de luz), que são mostradas no eixo horizontal pelos dias julianos (JD).

A profundidade do trânsito indica um planeta massivo, de dimensões grandes. Essa informação pode ser corroborada pela literatura, uma vez que há estudos relacionados que afirmam tratar-se de um super-Netuno (Galarza et al., 2024).

A estimativa para o período orbital é $T = 7,0644$, que é utilizado para realizar a dobra de fase, possibilitando uma visualização mais detalhada do perfil do trânsito planetário. Essa diferença pode ser vista nas Figuras 21 e 22 presentes no código, para fins de comparação.

¹⁰ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/tess/webtess/wtv.py?Entry=232967440>

FIGURA 29 – PERIODOGRAMA DA ESTRELA TOI 1728 b.**FIGURA 30** – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1728 b.

.Fonte: Autoria própria.

O mesmo procedimento detalhado na seção anterior foi empregado na análise dos dados da estrela alvo TIC ID 285048846. Nesta seção, portanto, serão apresentados os principais resultados. As observações foram previamente realizadas segundo a referência (j) da seção 3.2.

A estrela foi observada em apenas três setores do TESS, correspondentes ao 20, 47 e 60, respectivamente. Em seus arredores, portanto, foi detectado o exoplaneta TOI 1728 b, tratando-se de outro super Netuno quente, cujo período estipulado pelo código desta presente pesquisa corresponde a aproximadamente 3,5 dias (3,49141 sendo o valor exato encontrado). O periodograma e a curva de luz resultante da sobreposição dos trânsitos podem ser visualizados na Figura 29.

Além disso, é possível perceber ainda na Figura 29 algumas diferenças em relação à curva de luz anterior (Figura 28). Pode-se apontar, por exemplo, a presença de mais ruído nos dados obtidos, sendo perceptível no eixo y, onde a curva de luz se estende desde 0.985 até 1.015, preenchendo todo o espaço da figura. Pode-se notar também a profundidade do trânsito que, tratando-se de um super Netuno, apresenta características similares ao exemplo anterior, o que naturalmente infere que o exoplaneta oculta uma parte considerável da sua estrela hospedeira, o que já foi discutido anteriormente.

FIGURA 31 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA TOI 2134 b.

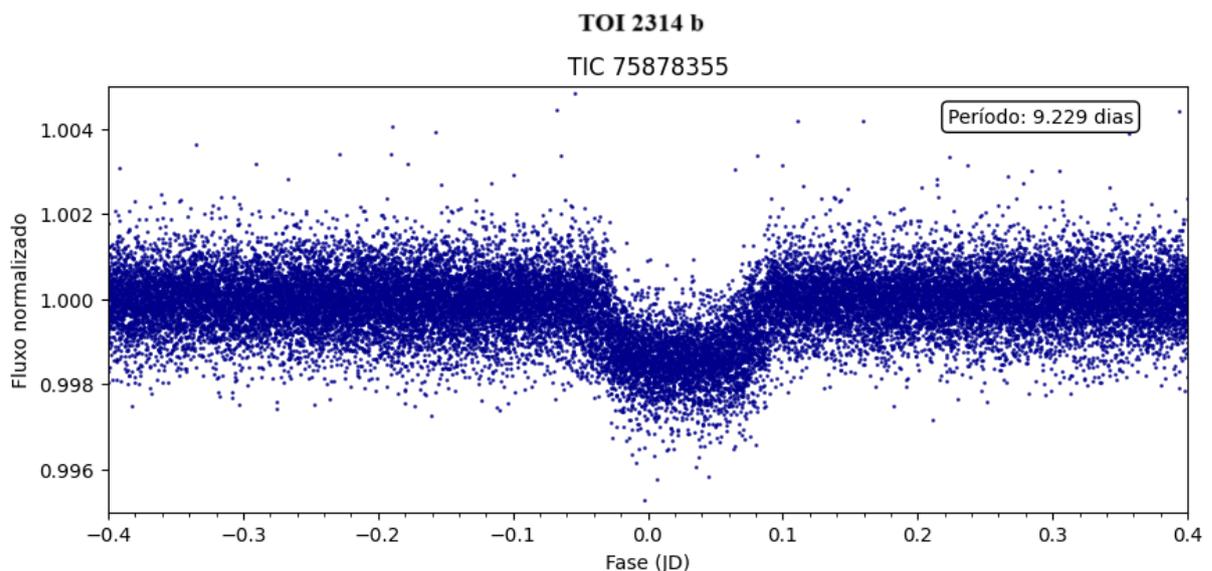
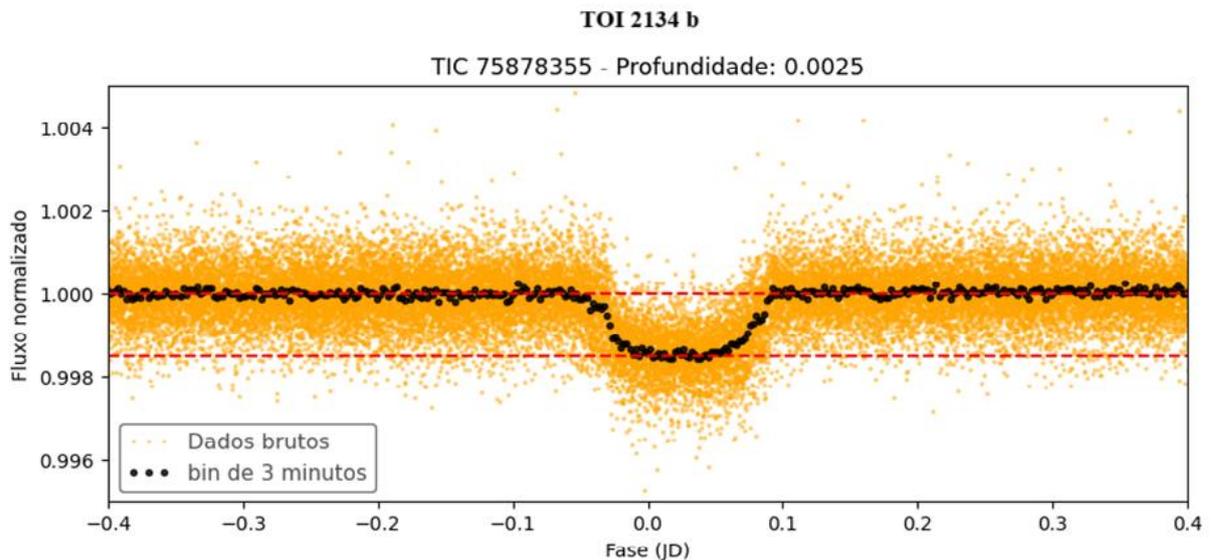


FIGURA 32 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 2134 b.



Fonte: Autoria própria.

A estrela alvo TIC ID 75878355 foi observada previamente e teve seus parâmetros estabelecidos segundo a referência (n) da seção 3.2. Foi observada por 5 setores (26, 40, 52, 53 e 54) do TESS. Em sua vizinhança foi detectado o planeta TOI 2134 b, tratando-se de mais um exoplaneta do tipo mini-Netuno, cujo período estipulado a partir do código foi de 9,229 dias. O periodograma e a curva de luz resultantes da sobreposição dos dados podem ser visualizados na Figura 31.

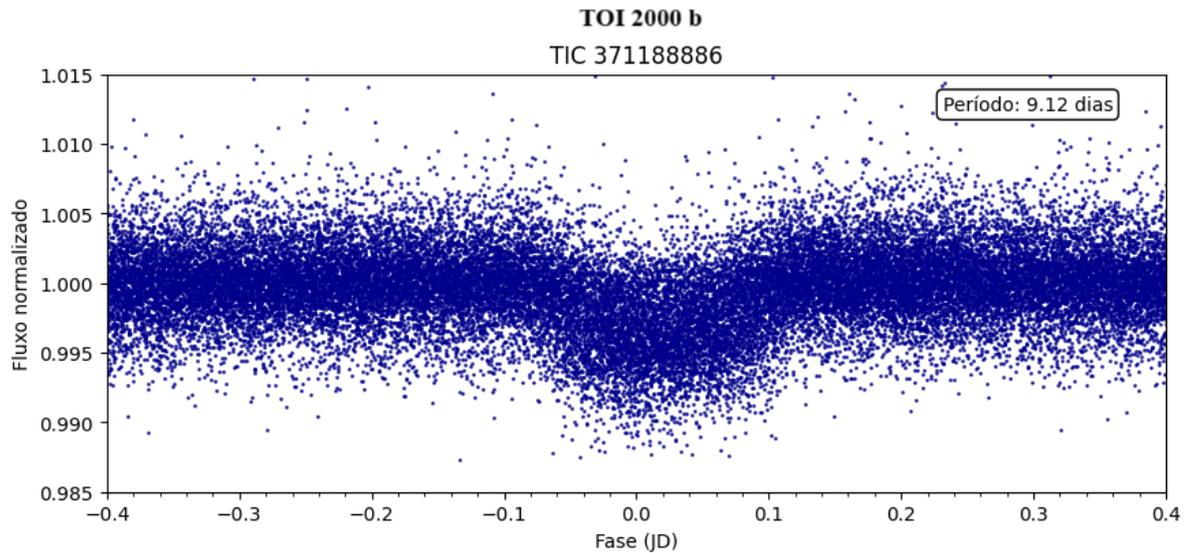
Diferentes curvas de luz anteriormente observadas, é possível perceber que o trânsito desse exoplaneta é raso e curto, o que infere a presença de um objeto com poucas dimensões, o que justifica o fato de tratar-se de um mini-Netuno, diferente dos dois exoplanetas anteriores que foram caracterizados como super-Netunos, cujas dimensões são bem maiores e mais expressivas quando se observa a curva de luz causada pelo trânsito que o mesmo realiza.

É interessante perceber, além de tudo, que a profundidade do trânsito e a própria curva de luz geradas pelo código já é capaz de fornecer algumas orientações sobre o tipo de planeta e algumas características, o que auxilia e norteia o pesquisador na obtenção dos dados posteriores, pois estes precisam estar condizentes com o que é observado em cada etapa do processo.

A profundidade do trânsito apresentada na Figura 33 pode ser usada para a estimativa do raio do planeta, usando-se a equação 1.3. Quando há presença expressiva de manchas estelares em estrelas que apresentam trânsitos planetários, o raio do planeta pode ser superestimado por dois fatores: (1) dependendo da maneira como o planeta cruza uma região

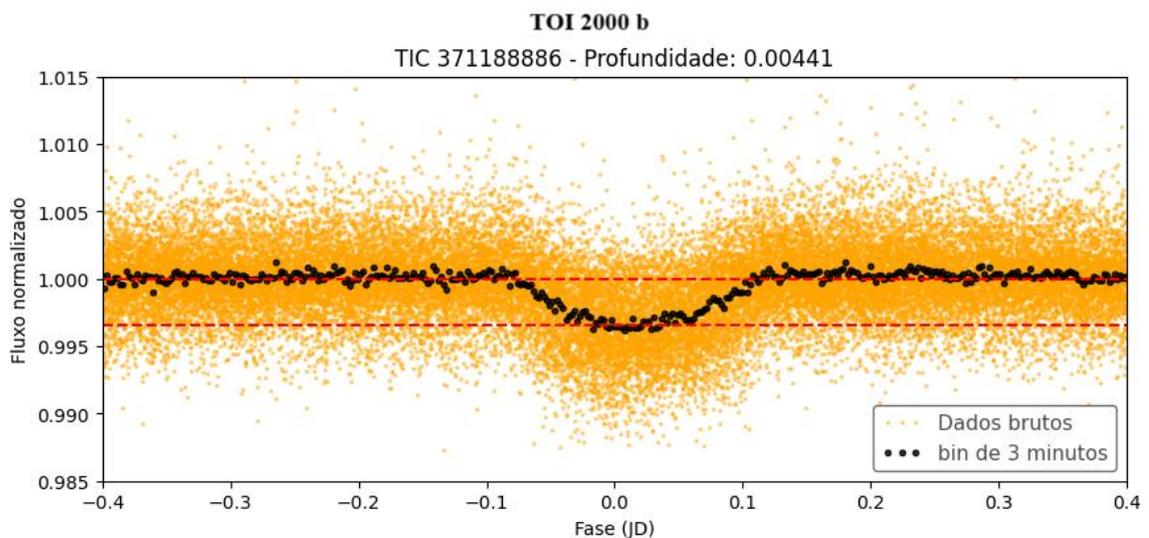
estelar, a forma dos trânsitos podem distorcer a profundidade dos mesmos; (2) o déficit no fluxo das manchas estelares frias resultam em um aumento aparente do fluxo relativo oriundo dos trânsitos planetários, fatores esses que devem ser levados em consideração na análise dos dados.

FIGURA 33 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA TOI 2000 b.



Fonte: Autoria própria (2024).

FIGURA 34 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 2000 b.



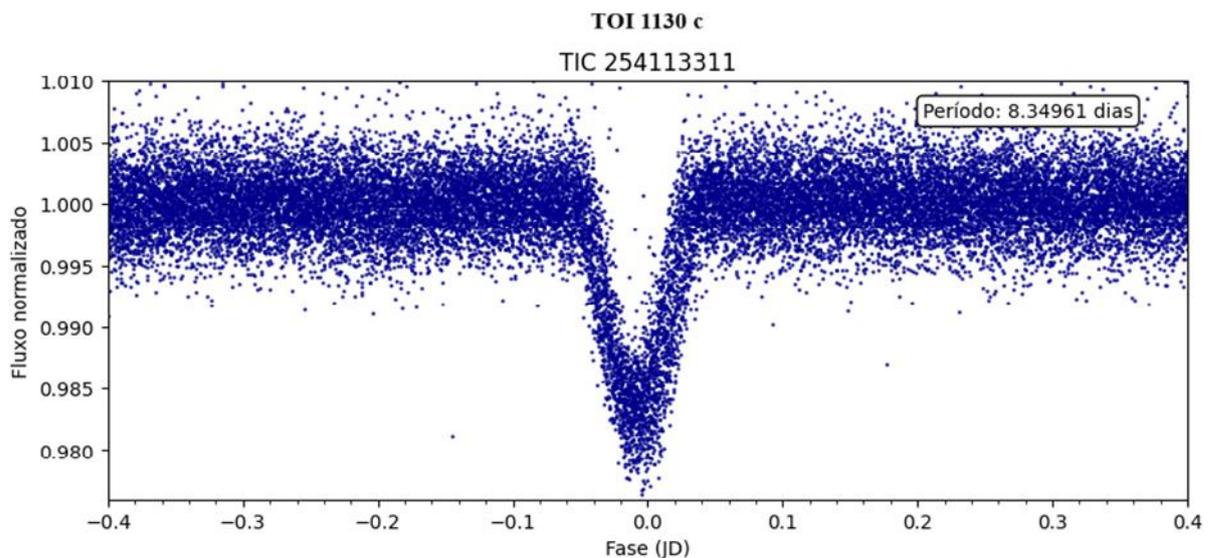
Fonte: Autoria própria (2024).

A estrela alvo TIC ID 371188886 foi observada previamente e teve seus parâmetros estabelecidos segundo a referência (1) da seção 3.2. Foi observada por 9 setores (9, 10, 11, 36, 37, 38, 63, 64 e 65) do TESS, correspondentes à câmera 3, anos 1 e 3 da missão. Em sua vizinhança foi detectado o planeta TOI 2134 b, tratando-se de outro exoplaneta do tipo mini-Netuno, cujo período estipulado a partir do código foi de 9,12 dias. O periodograma e a curva de luz resultantes da sobreposição dos dados podem ser visualizados na Figura 33.

A presença de um terceiro exoplaneta nessa amostra do grupo de mini-Netunos (e pode-se utilizar inclusive os super-Netunos também) indica que há uma variabilidade muito maior de planetas extrassolares do que se imaginava, uma vez que inicialmente só foram detectados exoplanetas do tipo super-Júpiteres. Os estudos relacionados à esses exoplanetas de categorias diferentes permitem uma maior robustez e precisão na hora de classificar e caracterizar esses objetos, uma vez que, à medida que mais observações são realizadas, mais dados são coletados a fim de produzirem estudos capazes de mapear mais fielmente esses sistemas.

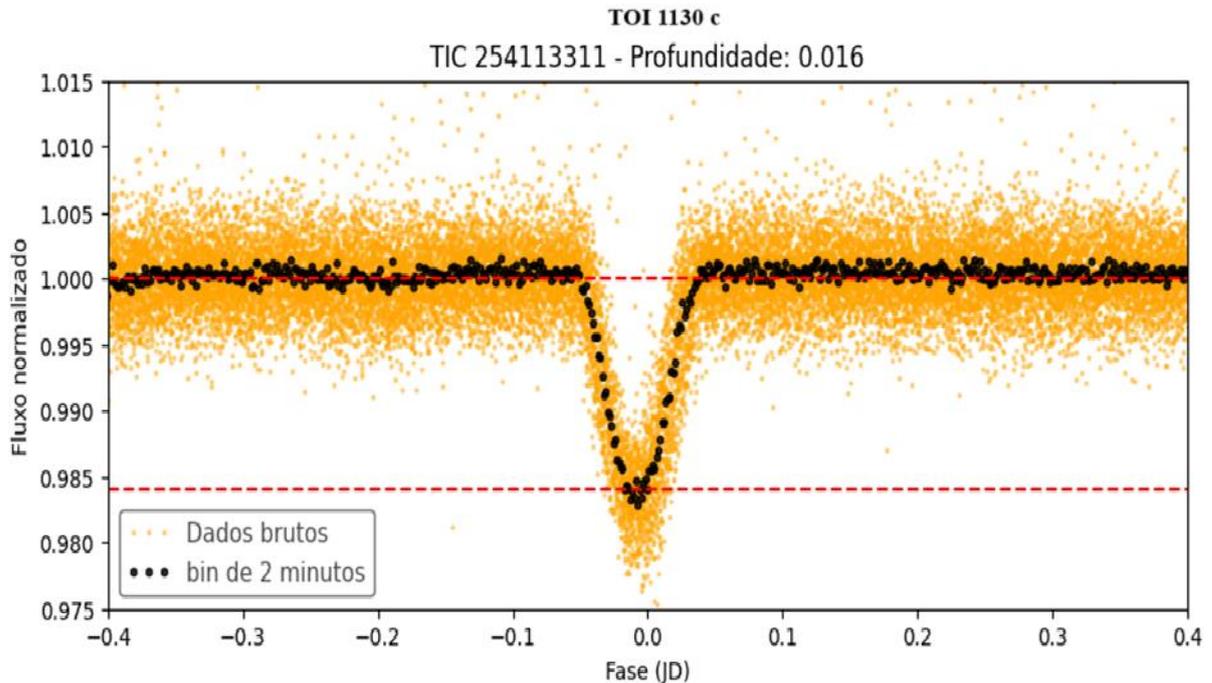
Corroborando o que foi exposto sobre o TOI 2134 b, é possível perceber, na Figura 34, características referentes ao exoplaneta apenas observando sua curva de luz, nesse primeiro momento. Por se tratar de um mini-Netuno, é esperado que a profundidade de trânsito seja menor e mais rasa, considerando que é um planeta sem dimensões muito grandes, se comparadas aos super-Júpiteres, por exemplo.

FIGURA 35 – PERIODOGRAMA DO EXOPLANETA 1130 c.



Fonte: Autoria própria (2024).

FIGURA 36 – PERIODOGRAMA COM BIN UTILIZADO PARA DETERMINAR A PROFUNDIDADE DO TRÂNSITO DO EXOPLANETA TOI 1130 c.



Fonte: Autoria própria (2024).

A estrela alvo TIC ID 254113311 foi observada previamente e teve seus parâmetros estabelecidos segundo a referência (b) da seção 3.2. Foi observada por 3 setores (13, 27 e 67) do TESS. O setor 13 foi observado entre 18 e 19 de julho de 2019, cobrindo seis trânsitos do TOI-1130 b e o setor 27 foi observado entre 5 e 30 de julho de 2020 pelas câmeras 1 e 3. Em sua vizinhança foram detectados dois exoplanetas TOI 1130 b e TOI 1130 c, sendo este último utilizado na pesquisa, por ser bem maior e gerar um trânsito mais profundo, tratando-se de um exoplaneta do tipo Júpiter quente, cujo período estipulado a partir do código foi de 8,34961 dias. O periodograma e a curva de luz resultantes da sobreposição dos dados podem ser visualizados na Figura 35.

Os super-Júpiteres e Júpiteres quentes referem-se à classe de planetas mais comumente encontrados, principalmente pelos métodos de trânsito, uma vez que a ocultação que o exoplaneta causa na estrela consegue baixar consideravelmente seu brilho, facilitando a detecção por meio desse método. É possível corroborar analisando a curva de luz que um planeta desse tipo causa. Na Figura 36, vemos o vale protuberante que ele causa, indicando um planeta massivo, de grandes dimensões.

4.1 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

A Tabela 4 sintetiza todos os parâmetros encontrados da seleção final da amostra, com os 5 exoplanetas correspondentes. Os parâmetros são, respectivamente, P (período do planeta), r (raio do planeta) e a (semi-eixo maior). Os algarismos significativos, na ocasião, foram reduzidos dos parâmetros encontrados na literatura para o mesmo número ou maior do que encontrado na presente pesquisa, a fim de igualar os números. Antes de explicar os resultados encontrados, é necessário ressaltar que a coluna referente à literatura são os mesmos estudos utilizados para definir os parâmetros da Tabela 1. As referências estão na seção 5, na descrição de cada exoplaneta encontrado e ao final deste trabalho.

TABELA 4 – RESULTADO DOS PARÂMETROS ENCONTRADOS DA AMOSTRA E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.

<i>Identificação</i>	<i>Este Trabalho</i>			<i>Literatura</i>			<i>Erros relativos</i>		
	<i>P (dias)</i>	<i>R_p</i> <i>(R_Terra)</i>	<i>A (AU)</i>	<i>P (dias)</i>	<i>R_p</i> <i>(R_Terra)</i>	<i>A (AU)</i>	<i>P(%)</i>	<i>R_p(%)</i>	<i>a(%)</i>
TOI 1173 b	7.0644	9.129	0.7000	7.06439	9.391	0.07034*	0,0075	2,79	0,28
TOI 1728 b	3.49141	5.096	0.0382	3.49151	5.05	0.0391	0,00042	2,07	0.916
TOI 2000 b	9.12	8.554	0.08	9.127	8.14	0.0878	0,07716	2,29	0,0036
TOI 2134 b	9.229	4.198	0.076	9.2292	3.09843	0.078	0,00224	35,48	2,45
TOI 1130 c	8.34961	9.812	0.07013	8.35023	1.1883	0.0719	0,00744	11,04	2,48

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Antes de analisar a tabela e seus resultados, é necessário especificar que: os P , relativo a período, está em dias terrestres. O R_p (raio do planeta), está em raios terrestres e, por fim, o A (semi-eixo maior do exoplaneta) está em termos de unidades astronômicas. Dito isso, é possível perceber, para o primeiro parâmetro, que a margem de erro entre o período obtido através do código e os relatados na literatura são bem próximos, o que justifica o erro relativo de menos de 1%. Também são períodos curtos, não chegando nem a 10 dias (considerando a conversão para dias terrestres).

O raio do exoplaneta, correspondente às colunas 3, 6 e 9 da Tabela 2, também apresenta resultados consistentes com os obtidos através de estudos relacionados, embora manifeste uma margem de erro superior a todos os outros parâmetros, possivelmente em função do modelo

super simplificado da distribuição de brilho uniforme da estrela, entre outros fatores, como a inclinação da órbita do planeta em relação à linha de visada do satélite TESS.

O semi-eixo maior do exoplaneta, obtido a partir da 3ª Lei de Kepler, apresentou uma pequena taxa de erro em relação aos dados presentes na literatura. É importante destacar, portanto, que o * presente na Tabela 4 refere-se à ausência desse parâmetro na literatura utilizada, sendo este trabalho o primeiro até a data de sua publicação a caracterizá-lo. O maior erro relativo foi de 2,48%, que será discutido posteriormente na seção referente às discussões.

5 CONCLUSÃO

Em suma, o presente trabalho mostra que a técnica de trânsito depende da configuração entre a estrela, o planeta e o observador; sua probabilidade de detectar exoplanetas aumenta para maiores planetas e menores estrelas hospedeiras, além de levar em consideração a distância entre os dois, bem como, demonstra que trânsitos apresentam quedas de fluxo mais acentuadas quanto maiores forem a razão entre os raios do planeta e sua estrela hospedeira.

Assim, a técnica nos permite derivar o raio de um planeta relativo ao de sua estrela hospedeira, seu período orbital e seu semi-eixo maior (através da terceira lei de Kepler). Além disso, variações do período encontrado em torno de um valor médio estão normalmente associadas à presença de mais corpos no sistema. Estes podem ser detectados e, seus parâmetros físicos podem ser inferidos através da técnica de detecção de exoplanetas chamada de “variação de tempo de trânsito” (transit-timing variation ou TTV, em inglês), que não será abordada neste trabalho. Desta forma, as técnicas de trânsito e TTVs se mostram eficientes métodos para detecção e caracterização de exoplanetas, sendo responsáveis por mais de 76,6% das descobertas realizadas até o momento, de acordo com o NASA Exoplanet Archive.¹¹

As missões de levantamento astronômico, como é o caso do TESS, cujo objetivo consiste em capturar a maior quantidade possível de informações do céu, utiliza-se de diferentes comprimentos de onda, profundidades e perspectivas. Os dados coletados a partir dessas missões resultam em um vasto banco de dados, acessível a qualquer astrônomo ou até mesmo astrônomos independentes que, munido de uma pergunta ou teoria, deseja explorar e/ou analisar diversas informações e parâmetros desses corpos estudados. Estes levantamentos, por sua vez, possuem um forte papel de democratizar a astronomia, não sendo mais necessário redigir a proposta perfeita para obter tempo de observação em telescópios famosos, como o Hubble ou o James Webb.

Sendo assim, com habilidades em programação e manipulação de banco de dados, estas informações podem ser extraídas e analisadas para a realização de pesquisas no âmbito da ciência. Essa abordagem é, portanto, particularmente relevante e benéfica para recém-graduados e profissionais em formação, que têm a oportunidade de examinar e trabalhar com os mesmos conjuntos de dados.

Nesta pesquisa, se utilizou bancos de dados dessas missões espaciais (*TESS*, especificamente) a fim de caracterizar exoplanetas descobertos pelo método de trânsito, a partir

¹¹ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

de um código desenvolvido em Python. Para a caracterização desses objetos se utilizou relações consideradas simples, que um estudante da área de Física (ou outras ciências exatas) conseguiria facilmente compreender e aplicar, o que justifica o uso das Leis de Kepler, por exemplo.

O procedimento foi aplicado para as estrelas selecionadas TOI 1173, TOI 1728, TOI 2134, TOI 2000 e TOI 1130, com o intuito de observar as suas curvas de luz, identificar os trânsitos dos exoplanetas descobertos em suas órbitas e caracterizá-lo sob a ótica de parâmetros físicos e orbitais, como período, raio e semi-eixo maior. Os parâmetros determinados a partir de um código escrito na linguagem de programação Python permitiu um confronto com parâmetros já existentes na literatura, de forma que estes serviram como norte no que tange à eficácia dessa ferramenta.

Feita a análise dos dados, viu-se que os parâmetros encontrados com o código escrito e com os encontrados em estudos relacionados possuem equivalência, possuindo uma margem de erro consideravelmente pequena e pode ser explicada pela simplicidade do modelo que, apesar disso, demonstrou precisão nos resultados, tendo uma taxa de erro relativo aceitável dentro do que a pesquisa se propõe a realizar. A precisão das medidas foi satisfatória, a exemplo da determinação do período, como é possível ver na tabela, que variou de 0,00042 a 0,075%, não chegando nem a 1% de erro relativo. Já a variação do semi-eixo maior tem uma variação de até 2,48%, sendo uma boa aproximação dos resultados esperados, uma vez que é uma porcentagem baixa de erro, o que ainda é um bom indicativo da precisão com que o código consegue determinar os mesmos parâmetros. Por fim, o raio apresentou uma margem de erro maior do que todos os outros parâmetros, contudo, é ainda aceitável em detrimento do modelo simplificado que foi utilizado nessa pesquisa, nesse sentido, podemos dizer que os valores determinados no presente trabalho são essencialmente compatíveis com aqueles fornecidos no referido banco de dados.

Nessa perspectiva, é possível colocar como prioridade a importância do uso de programação nas pesquisas contemporâneas, como forma de acessar grandes bancos de dados, podendo desenvolver (com um conhecimento considerável em programação) códigos que possibilitem caracterizar objetos de mesma natureza, gerar gráficos utilizando os mais variados parâmetros, entre outras possibilidades que existem no que tange ao uso dessas tecnologias.

Sendo assim, com habilidades em programação e manipulação de banco de dados, estas informações podem ser extraídas e analisadas para a realização de pesquisas no âmbito da ciência. Essa abordagem é, portanto, particularmente relevante e benéfica para recém-graduados e profissionais em formação, que têm a oportunidade de examinar e trabalhar com os mesmos conjuntos de dados.

5 REFERÊNCIAS

AMORIM, R.G.G; SANTOS, W. C. Determinação da massa e dados orbitais de exoplanetas pelo método Doppler. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, 2016.

ARMITAGE, Philip J. **Astrophysics of Planet Formation**. Cambridge University Press, 2020.

BAGLIN, A. et al. **The CoRoT legacy Book: The CoRoT Story**. Disponível em: <edppen.org/images/stories/books/contentes/corot/cl_3.pdf>, acesso em 10 de fevereiro de 2022.

BAGLIN, Annie et al. CoRoT: Description of the mission and early results. **Proceedings of the International Astronomical Union**, v. 4, n. S253, p. 71-81, 2008.

BARRETT, Paul et al. matplotlib--A Portable Python Plotting Package. In: **Astronomical data analysis software and systems XIV**. 2005. p. 91.

BENNETT, Jeffrey O. et al. **The cosmic perspective**. Pearson, 2014.

BENZ, W. et al. Planet Population Synthesis. **Protostars and Planets VI**, p. 691-713, 2014.

BERNARDES, Luander. **Exoplanetas, extremófilos e habitabilidade**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BONOMO, Aldo Stefano et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission-X. CoRoT-10b: a giant planet in a 13.24 day eccentric orbit. **Astronomy & Astrophysics**, v. 520, p. A65, 2010.

BORUCKI, William J. et al. Kepler planet-detection mission: introduction and first results. **Science**, v. 327, n. 5968, p. 977-980, 2010.

BRUNO, Giordano. *Acerca do infinito, do universo e dos mundos*. 1978.

BURT, JA et al., CE 2021, 'TOI-1231 b: a temperate, Neptune-sized planet transting the nearby M3 dwarf NLTT 24399', **The Astromical Journal**, vol. 162, no. 3, 87, 2021.

CANIATO, R. **O que é Astronomia**. 8ed. São Paulo: Brasiliense, 1994.

CARDOSO, José Vinícius de Miranda et al. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. **Astrophysics Source Code Library**, p. ascl: 1812.013, 2018.

CHAISSON, E.; MCMILLAN, S. **Astronomy Today**. 9ª edição. Reino Unido: Acadêmico Pearson, 2014.

CHAKRABARTY, Aritra; MULDER, Gijis D. Where Are the Water Worlds? Identifying Exo-water-worlds Using Models of Planet Formation and Atmospheric Evolution. **The Astrophysical Journal**, v. 966, n. 2, p. 185, 2024.

CHALLENGER-PÉREZ, I.; DÍAZ-RICARDO, Y.; BECERRA-GARCÍA, R.. **El lenguaje de programación Python**. Ciencias Holguín [en línea]. 2014, XX(2), 1-13. Acesso em: 09 de Abril de 2024. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=18153123200>>

CHARBONNEAU, David et al. Detection of planetary transits across a sun-like star. **The Astrophysical Journal**, v. 529, n. 1, p. L45, 1999.

COLLABORATION, Lightkurve et al. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. **Astrophysics Source Code Library (ascl: 1812.013)**, 2018.

CUMMING, A. **Exoplanets**, 2010. Statistical Distribution of Exoplanets.

DES ETANGS, A. Lecavelier; LISSAUER, Jack J. The IAU working definition of an exoplanet. **New Astronomy Reviews**, v. 94, p. 101641, 2022.

DÍAZ, Matías R. et al. TOI-132 b: A short-period planet in the Neptune desert transiting a $V = 11.3$ G-type star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 493, n. 1, p. 973-985, 2020.

DOMINGUES, Augusto et al. Dados geoespaciais: Conceitos e técnicas para coleta, armazenamento, tratamento e visualização. **Sociedade Brasileira de Computação**, 2020.

DOS SANTOS, Willian Ricardo et al. " Natura est Deus in rebus": a filosofia da natureza de Giordano Bruno e a ideia de mínimo. 2019.

ExoFOP (2023), 'The exoplanet follow-up observing program'. Último acesso em: 13 de Jun. de 2024. Disponível em: <<https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>>

FLÓRIO, Victória. Descobrimos mundos: a reinvenção da sonda espacial Kepler. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 4, p. 14-16, 2014.

FRIDLUND, M. et al. The TOI-763 system: sub-Neptunes orbiting a Sun-like star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, n. 3, p. 4503-4517, 2020.

GALARZA, Jhon Yana et al. TOI-1173 A \$ b \$: The First Inflated Super-Neptune in a Wide Binary System. **arXiv preprint arXiv:2403.06240**, 2024.

GEORGIEVA, I. Y. et al. Hot planets around cool stars—two short-period mini-Neptunes transiting the late K-dwarf TOI-1260. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 505, n. 4, p. 4684-4701, 2021.

GW Marcy et al., "Massas, raios e órbitas de pequenos planetas Kepler: a transição de planetas gasosos para rochosos", *Astrophys. J. Supl. Ser.*, 210 (2), 20

(2014). Acesso em: 16 de Abril de 2024. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/210/2/20 APJSA2 0067-0049>

HAGHIGHIPOUER, Nader et al. The Lick–Carnegie exoplanet survey: a Saturn-mass planet in the habitable zone of the nearby M4V star HIP 57050. **Astrophysical Journal**, v. 715, no 1, 2010.

HENRY, Gregory W. et al. A transiting “51 Peg-like” planet. **The Astrophysical Journal**, v. 529, n. 1, p. L41, 1999.

HORVATH, Jorge E. **O ABCD da Astronomia e Astrofísica**. Editora Livraria da Física, 2008.

HUANG, Chelsea X. et al. TESS spots a hot Jupiter with an inner transiting Neptune. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 892, n. 1, p. L7, 2020.

JONES, D. Heath et al. The 6dF Galaxy Survey: samples, observational techniques and the first data release. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 355, n. 3, p. 747-763, 2004.

JONES S., STEFANSSON G., MASUDA K., LIBBY-ROBERTS J., GARDNER C. et al. *Astron. J.*, enviado, 2023

KAKU, Michio. O futuro da humanidade: Marte, viagens interestelares, imortalidade e nosso destino para além da Terra. **Tradução J Biaggio. Planeta, São Paulo**, 2019.

KANODIA, Shubham et al. TOI-1728b: The Habitable-zone Planet Finder Confirms a Warm Super-Neptune Orbiting an M-dwarf Host. **The Astrophysical Journal**, v. 899, n. 1, p. 29, 2020.

KJELDSEN, Hans; BEDDING, Timothy R. Kepler, corot and most: Time-series photometry from space. **Proceedings of the International Astronomical Union**, v. 7, n. S285, p. 17-22, 2011.

KOSSAKOWSKI, D. et al. TOI-1201 b: A mini-Neptune transiting a bright and moderately young M dwarf. **Astronomy & Astrophysics**, v. 656, p. A124, 2021.

KUNIMOTO, Michelle et al. TOI-4010: a system of three large short-period planets with a massive long-period companion. **The Astronomical Journal**, v. 166, n. 1, p. 7, 2023.

LALL, Vishakha. Google colab—the beginner’s guide. Consultado em:
 <<https://medium.com/lean-inwomen-in-tech-india/google-colab-the-beginners-guide-5ad3b417dfa>>, 2018.

LENCHUK, Adryan Petry et al. Como identificar exoplanetas. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 191-191, 2021.

- LISSAUER, J. J. et al. Architecture and dynamics of kepler's candidate multiple transiting planet systems. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 197, n. 1, p. 8, 2011
- LOPES, Gesiel Rios; DELBEM, Alexandre CB; DE SOUSA, Joécio Braga. Introdução à análise de dados geoespaciais com python. **Sociedade Brasileira de Computação**, 2021.
- LOPES, Ideusa Celestino. Giordano Bruno: entre o geocentrismo e o heliocentrismo. **Griot: Revista de Filosofia**, v. 9, n. 1, p. 1-25, 2014.
- MALLORQUIN, M. et al. TOI 1135 b: A young hot Saturn-size planet orbiting a solar-type star. **Astron. & Astrophys**, v. 685, 2024.
- MARCY, G. W.; BUTLER, R. P.; FISCHER, D. A. Doppler Detection of Extrasolar Planets. **International Astronomical Union Colloquium**, 170, 121–130, 1999.
- MARTIOLI, Eder et al. TOI-1759 b: A transiting sub-Neptune around a low mass star characterized with SPIRou and TESS. **Astronomy & Astrophysics**, v. 660, p. A86, 2022.
- MAYOR, Michel; QUELOZ, Didier. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. **nature**, v. 378, n. 6555, p. 355-359, 1995.
- MONZÓN, Carlos Vázquez. **Detección, dinámica y habitabilidad de exoplanetas y exosatélites**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de Santiago de Compostela.
- MORISON, Ian. **Introduction to astronomy and cosmology**. John Wiley & Sons, 2013.
- NAPONIELLO, L. et al. The GAPS programme at TNG-XL. A puffy and warm Neptune-sized planet and an outer Neptune-mass candidate orbiting the solar-type star TOI-1422. **Astronomy & Astrophysics**, v. 667, p. A8, 2022.
- NASA (2023a), 'Overlooked treasure: The first evidence of exoplanets'. Último acesso em: 30/04/2024. Disponível em: <https://www.nasa.gov/feature/jpl/overlooked-treasure-the-first-evidence-of-exoplanets>
- NASA (2023b), 'Tess science support center'. Último acesso em: 30/04/2024.
- NASA (2024 a) – National Aeronautics and Space Administration. **Exoplanet exploration: Planets beyond our solar system**. Atualizado em 13 de junho de 2024. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/>, acesso em 13 de junho de 2024.
- NASA (2024 b) – National Aeronautics and Space Administration. **Exoplanets**. Atualizado em 13 de junho de 2024 (a). Disponível em: <https://science.nasa.gov/exoplanets/>, acesso em: 13 de junho de 2024.

NASA (2024 c) – National Aeronautics and Space Administration. **Missions**. Atualizado em 18 de Junho de 2024. Disponível em: <https://science.nasa.gov/exoplanets/missions/>. Acesso em: 18 de Junho de 2024.

OLIPHANT, Travis E. et al. **Guide to numpy**. USA: Trelgol Publishing, 2006.

PERRYMAN, M. A. C. Extra-solar planets. **europysics news**, v. 32, n. 1, p. 9-13, 2001.

PERRYMAN, Michael. **The exoplanet handbook**. Cambridge university press, 2018.

PERSSON C., GEORGIEVA I., GANDOLFI D., AGUICHINE A., MURESAN A. et al. *Astron. & Astrofísica.* , 666, 2022

PETIGURA, Erik A. et al. The California-Kepler survey. IV. Metal-rich stars host a greater diversity of planets. **The Astronomical Journal**, v. 155, n. 2, p. 89, 2018.

PIMENTEL, João Felipe et al. A large-scale study about quality and reproducibility of jupyter notebooks. In: **2019 IEEE/ACM 16th international conference on mining software repositories (MSR)**. IEEE, 2019. p. 507-517

PSARIDI, Angelica et al. Discovery of two warm mini-Neptunes with contrasting densities orbiting the young K3V star TOI-815. **Astronomy & Astrophysics**, v. 685, p. A5, 2024.

RESCIGNO, F. et al. A hot mini-Neptune and a temperate, highly eccentric sub-Saturn around the bright K-dwarf TOI-2134. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 527, n. 3, p. 5385-5407, 2024.

RICKER, George R. et al. Transiting exoplanet survey satellite. **Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems**, v. 1, n. 1, p. 014003-014003, 2015.

SARAIVA, M. F. O; OLIVEIRA FILHO, K. S. Aula 6: Movimento dos planetas – as leis de Kepler. Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula6-132 .pdf](http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula6-132.pdf)

SCHLIEDER, J. TESS Observatory Guide, version 1.1. **TESS Guest Investigator Program: TESS Observatory Guide**, 2017.

SIFFERT, Beatriz. A procura por exoplanetas habitáveis. **Cadernos de Astronomia**, v. 3, n. 2, p. 4-15, 2022.

SHA, Lizhou et al. TESS spots a mini-neptune interior to a hot saturn in the TOI-2000 system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 524, n. 1, p. 1113-1138, 2023.

SOTO, D. Diego Hidalgo. **Detección y caracterización de exoplanetas con telescopios espaciales**. 2020. Tese de Doutorado. Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain).

STASSUN, K. G. et al. The Revised TESS Input Catalog and Candidate Target List., v. 158, n. 4, p. 138, out. 2019.

TEAM, E. (2023), **The extrasolar planets encyclopaedia**. Último acesso em: 10/04/2024. URL: <http://exoplanet.eu/>

VALIO, Adriana. Procuram-se planetas. **Cienc. Cult.**, São Paulo , v. 61, n. 4, p. 28-32, 2009 . Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252009000400011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 01 de Jul. de 2024.

VAN DER WALT, Stefan; COLBERT, S. Chris; VAROQUAUX, Gael. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. **Computing in science & engineering**, v. 13, n. 2, p. 22-30, 2011.

VANDERSPEK, Roland. et al. TESS Discovery of an ultra-short-period planet around the nearby M dwarf LHS 3844. **Astrophysical Journal Letters**, v. 871, n. 2.

VANDERPLAS, Jacob T. Understanding the lomb–scargle periodogram. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 236, n. 1, p. 16, 2018.

VOGT, Steven S. et al. The Lick–Carnegie exoplanet survey: A 3.1 M_{\oplus} planet in the habitable zone of the nearby M3V star Gliese 581. **The Astrophysical Journal**, v. 723, n. 1, p. 954, 2010.

WILSON, Thomas G. et al. A pair of sub-Neptunes transiting the bright K-dwarf TOI-1064 characterized with CHEOPS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 511, n. 1, p. 1043-1071, 2022.

WINN, J. N.; DEEG, H. J.; BELMONTE, J. A. Handbook of Exoplanets. 2018.

ZUCKERMAN, B. Recognition of the first observational evidence of an extrasolar planetary system. **arXiv preprint arXiv:1410.2575**, 2014.