

Aplicações da Análise de Sinais na Busca por Exoplanetas

J. W. S. de Lima, D. F. dos Santos, Í. J. M. Moura, J.S de Andrade e R. C. P. Marques

Resumo— O algoritmo BLS e a ferramenta de análise Lightkurve foram usados neste trabalho para identificação de exoplanetas por meio do sinal característico da curva de luz, via bibliotecas em Python. Com os procedimentos de separação e tratamento de dados, foi obtido um sinal característico de trânsito planetário, o qual a partir disso foi possível obter o valor do período orbital do planeta e assim compará-los a repositórios. A proximidade dos resultados obtidos com a literatura, vieram a demonstrar a eficiência dos procedimentos de tratamento e das bibliotecas destinadas a esse estudo de exoplanetas.

Palavras-Chave— algoritmo BLS, Lightkurve, curva de luz, exoplanetas, periodograma.

Abstract— The BLS algorithm and the Lightkurve analysis tool were used in this work to identify exoplanets through the characteristic light curve signal, via Python libraries. With the data separation and processing procedures, a characteristic signal of planetary transit was obtained, which made it possible to obtain the value of the planet's orbital period and thus compare them to repositories. The proximity of the results obtained with the literature demonstrated the efficiency of the treatment procedures and libraries intended for this study of exoplanets.

Keywords— signal processing, light curve, exoplanets, periodogram, frequency.

I. INTRODUÇÃO

A busca por exoplanetas é dificultosa, pois consiste basicamente na observação de um astro muito distante e de tamanho ínfimo quando comparado a estrela que ele orbita. Devido à escala das distâncias usualmente envolvidas, a própria estrela apresenta-se também com tamanho aparente diminuto.

Não obstante, existem alguns métodos de detecção de exoplanetas. Dentre eles, o método do trânsito planetário, que se fundamenta na observação da redução do brilho de uma estrela causado pela passagem de um exoplaneta, é bastante utilizado, com 70% de casos confirmados de exoplanetas por esse método [1]. Com ele é possível determinar, além da própria existência do exoplaneta, parâmetros característicos desse objeto, como raio, massa e período orbital. Contudo, a técnica

está limitada aos casos em que é possível observar o trânsito planetário, ou seja, o plano da órbita do objeto deve estar bem próximo à linha de visada que liga a estrela e o observador [2].

Com o advento tecnológico e o crescimento da quantidade de observações obtidas por missões como KEPLER [3] e TESS [4], dados fotométricos de grandes quantidades de estrelas são muitas vezes acessíveis ao público geral. Isso torna possível o aumento do interesse no seu estudo e contribui para aumentar a quantidade de detecções de exoplanetas.

O tratamento desses dados por meio de algoritmos e bibliotecas por uma forma objetiva e automática é possível hoje. Um exemplo é a biblioteca “lightkurve”, que trabalha com séries temporais de fluxo luminoso provindas de estrelas observadas pelas missões citadas. Um outro exemplo é o algoritmo BLS, que produz periodogramas e cria modelos com ajustes de funções de graus, caso que mais se assemelha com um sinal de trânsito planetário [5].

Neste cenário, este trabalho objetivou demonstrar a aplicação destas técnicas e discutir a eficiência dos resultados no contexto do processamento de sinais, comparando-os com os disponíveis na literatura. Para isso, foram apresentadas uma fundamentação teórica que justifica o uso da técnica, a metodologia de aplicação algorítmica e a verificação dos resultados obtidos em um caso concreto de exoplaneta conhecido.

II. A CURVA DE LUZ E O BLS

As curvas de luz, são gráficos do fluxo luminoso de determinada estrela em função do tempo. A partir dessa medida, interpretada como um sinal, pode-se utilizar técnicas específicas de processamento que permitem obter dados importantes, como a composição química, a temperatura, o raio, a massa e até o período de rotação de uma estrela. A detecção de exoplanetas, ou outros corpos que orbitam a estrela observada também é possível, bem como calcular seus raios e períodos, entre outras aplicações [2].

Quando o plano da órbita de um exoplaneta está próximo à linha de visada, torna-se possível observar a obstrução de parte da luz proveniente da estrela quando ele passa através de seu disco. Dependendo das dimensões do objeto, isso gera uma variação significativa do fluxo luminoso observado, gerando uma curva característica, ilustrada na figura 1 [6].

Jhones Wendel Silva de Lima, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, IFCE, Fortaleza-CE, e-mail: jhones.wendel60@aluno.ifce.edu.br; Daiane Fabrício dos Santos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, IFCE, Fortaleza-CE, e-mail: daiane.fabricio03@aluno.ifce.edu.br; Joacir Soares de Andrade, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Laboratório de Fotônica, IFCE, Fortaleza-CE, e-mail: joacirsoares@yahoo.com.; Ícaro Jael Mendonça Moura, Programa de Pós-Graduação em Física, UERN, MossoróRN, e-mail: Ícarojael@gmail.com, Regis Cristiano Pinheiro Marques, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações, IFCE, Fortaleza-CE, e-mail: regismarques@ifce.edu.br; este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa – FUNCAP(BMD0008-02211.01.05/24)

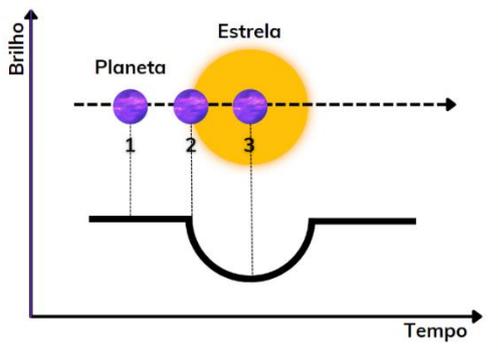


Fig. 1: Representação de um sinal de curva de luz gerado pelo trânsito planetário.

Nestes casos, a curva de luz pode revelar três parâmetros importantes: o período orbital do planeta, o seu raio e o tempo do trânsito. O período pode ser calculado a partir dos intervalos de tempo entre mínimos e máximos sucessivos, o raio do planeta pode ser inferido a partir da profundidade desses pontos mínimos, e o tempo de trânsito é o tempo de alteração do fluxo.

Há contudo, alguns problemas práticos nessa análise. Por exemplo, as bordas das estrelas geralmente são escuras e esse fenômeno óptico interfere na curva observada [7]. Outro problema seria a detecção de mais exoplanetas em um único sistema, pois no periodograma podem aparecer outros picos, que na verdade podem ser valores harmônicos de um período menor já analisado, pois o ideal é verificar as curvas em intervalo de valores, com isso seria necessário verificar a curva dobrada em um intervalo discreto, e seus valores harmônicos, para identificar uma queda no fluxo da estrela e confirmar um trânsito [6].

Uma técnica utilizada para estimar a duração do trânsito é o “Box Least Squares” (BLS), desenvolvido a partir da transformada de Fourier por Kovács et al. [3]. Com isso, é possível analisar a curva de luz e buscar uma função degrau que ajuste ao sinal, como ilustrado na figura 2 [8].

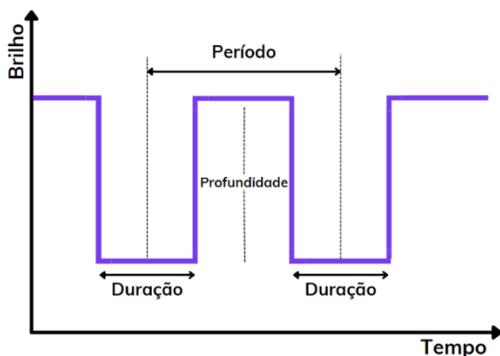


Fig. 2: Esquema do fit criado pelo BLS e parâmetros possíveis a se obter.

A partir do BLS é possível montar o periodograma levando a série temporal para o domínio da frequência, assim identificando repetições periódicas de picos de força, aumentando a confiança na detecção de um astro orbitando a estrela analisada [5].

A figura 2, demonstra que o ajuste do BLS é feito a partir de caixas periódicas, ou seja, de uma função não senoidal, ao contrário da Transformada discreta de Fourier (DFT). No

modelo BLS, a função que descreve o plot da figura, descreve dois valores possíveis, L durante a duração e H , para todo o restante de tempo [5]:

$$f(t) = \begin{cases} L \\ H \end{cases} \quad (1)$$

O modelo do fit do trânsito é descrito por quatro variáveis, H , L , P_0 (período do trânsito) e q , L é obtido por qP_0 , onde q é a fração do período orbital, que varia entre 1% e 5% do período orbital total [2]. Com isso o BLS cria modelo de fits, e após utiliza uma métrica de ajuste, geralmente baseada em mínimos quadrados, para avaliar o quão bem um determinado conjunto de parâmetros se ajusta à curva de luz observada, assim criando o esboço [2].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

O uso de algoritmos computacionais de processamento de sinais astronômicos é de grande importância, pois facilitam o tratamento e a análise dos dados observados. Uma das bibliotecas mais usadas é a *lightkurve*,

Desenvolvida na linguagem python, a biblioteca *lightkurve* apresenta vários recursos para a análise de séries temporais, providas de observações tomadas por satélites espaciais como o Kepler e o TESS [9]. Entre as dependências dessa biblioteca estão a NumPy [10]. SciPy [11]. Matplotlib [12]. Astropy [13]. e astroquery [14].

No estudo de caso apresentado neste trabalho, buscou-se a detecção e obtenção do período de trânsito do objeto Kepler 21-b, que orbita a estrela Kepler 21-A, foi utilizada a *lightkurve* e suas dependências para a obtenção e pré-processamento de dados.

A. Obtenção de dados

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos do repositório MAST [15], usando o processo automatizado na própria *lightKurve*.

No primeiro momento de análise, todos os períodos de observação do objeto (cuja duração é trimestral) foram selecionados. A figura 3 a seguir apresenta os fluxos obtidos.

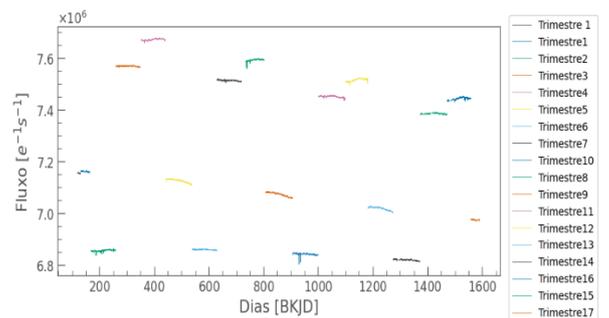


Fig. 3: Plot dos sinais obtidos durante os trimestres de observações, onde $e^{-1}s^{-1}$, representa o fluxo de fótons por segundo, e BKJD, significa Barycentric Kepler Julian Date, uma escala que se refere ao tempo juliano, centrado no observatório espacial Kepler, corrigido para o centro de massa do sistema solar (barycentric).

Devido à movimentação do telescópio, a observação do fluxo do mesmo objeto apresenta variações. Por conta disso, é necessário utilizar a função `stitch()`, presente na biblioteca

lightcurve, que normaliza o fluxo e corrige a tendência de variação linear do ponto final ao inicial de cada período. Após essa correção, o gráfico toma uma forma mais uniforme, como apresentado na figura 4 a seguir.

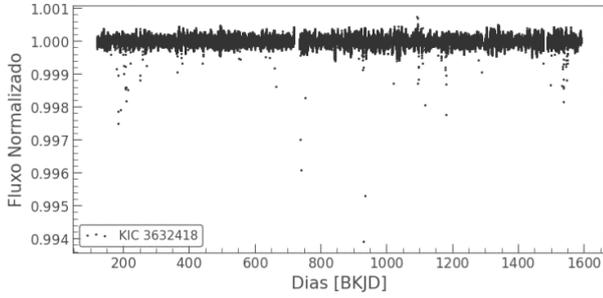


Fig. 4: Plot do sinal normalizado e corrigido

A partir disso, agora podemos tratar os dados e achar o interesse do estudo, que seria a identificação de um exoplaneta e seu trânsito com a utilização do método BLS.

B. Pré-processamento do sinal

Um histograma com curva gaussiana e um boxplot do fluxo foram utilizados para identificar e remover dados discrepantes (outliers) da amostra. O critério utilizado foi o de remoção dos valores com módulo de z-score maior que 5. Foram excluídas 49 medidas da amostra.

As figuras 5 e 6 a seguir apresentam, respectivamente, a amostra antes e depois do procedimento. A nova curva de luz é apresentada na Figura 7.

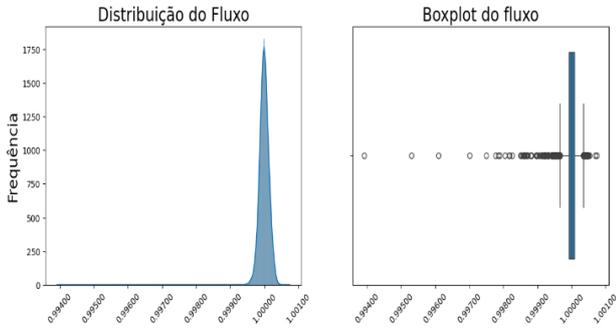


Fig. 5: Histograma com gaussiana e boxplot dos fluxos registrados pela missão

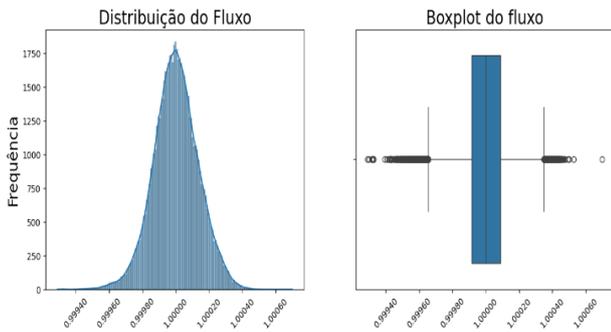


Fig. 6: Histograma com gaussiana e boxplot dos fluxos, após remoção de valores considerados discrepantes

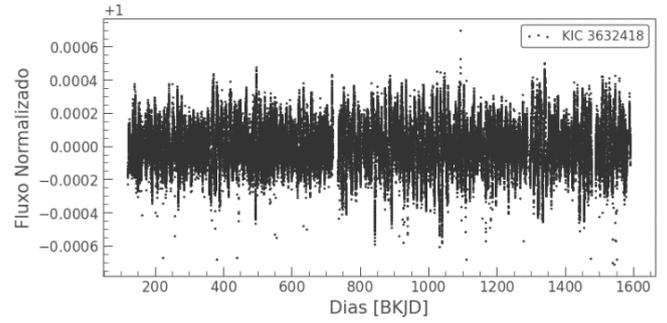


Fig. 7: Plot do sinal normalizado e sem os valores discrepantes

C. Processamento do sinal

O BLS é iniciado a partir da função `LightCurve.to_periodogram`, pertencente à biblioteca `lightcurve` e a partir dos argumentos de método do `periodograma`, período e fator de frequência. O espectro de frequência resultante pode ser adquirido a partir do comando `lc.to_periodogram("bls", intervalo, fator de frequência).plot()`.

A instrução `lc.to_periodogram` realiza a conversão do sinal `lc` para um `periodograma`. A entrada "bls" é o método para plotar o `periodograma`, intervalo é o período analisado, e o fator de frequência, é o parâmetro que testa os intervalos de períodos que serão testados para achar o resultado (quanto maior o número maior o intervalo, assim gerando uma resposta rápida, quanto menor o fator, mais testes serão feitos, pois o intervalo testado será menor de um para outro, logo a resolução do resultado será melhor). O intervalo escolhido para este trabalho foi de 10 dias, usando 5000 amostras nesse período, com um fator de frequência de 400.

O ideal é fazer uma análise aumentando o período aos poucos e as amostras se necessário, pois a contribuição de algum astro pode ser ocultada frente a de algum outro. Por esse motivo deve-se verificar a curva de luz no período indicado pelo `periodograma` para observar se há realmente essa curva característica e confirmar a possibilidade de um exoplaneta. Esse efeito foi considerado neste estudo.

Os mesmos procedimentos anteriores para o pré-processamento foram feitos por Domingues [16], de maneira análoga, nós refizemos alguns passos deste tratamento, porém aplicando filtros nos dados além do gaussiano. Foram aplicados os filtros de média móvel, Savitzky-Golay e Butterworth.

IV. RESULTADOS

O `periodograma` apresenta as frequências que mais contribuem para uma determinada série temporal. Com isso é associado um valor para o respectivo período, que pode ser verificado no gráfico original. Em funções periódicas, haverá valores múltiplos de uma determinada frequência fundamental, que também apresentará maior contribuição nos picos de frequência. Em casos reais, contudo, pode haver interferências e outros fenômenos que alteram esses picos.

Na Figura 8 é apresentado o `periodograma` da curva de luz do astro Kepler 21A, que revela um pico de frequência

fundamental de 2,79 dias, para o objeto Kepler 21B.

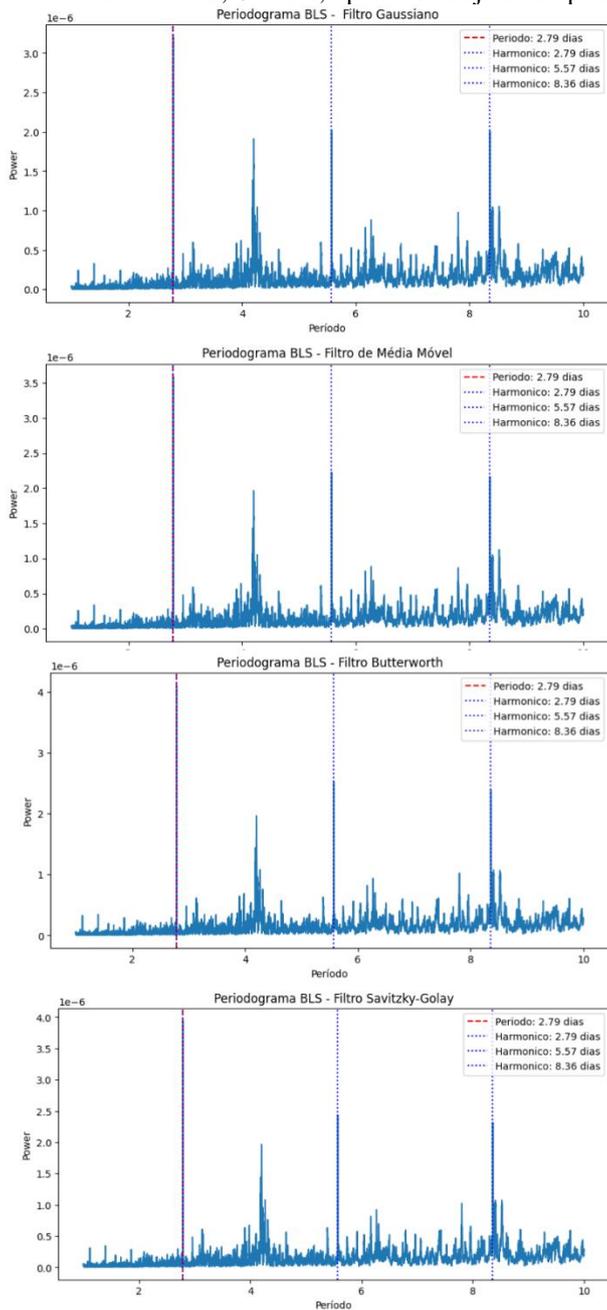


Fig. 8: Periodograma da curva de luz do Kepler 21A, utilizando o BLS, após a aplicação de filtros nas amostras.

Os periodogramas apresentam valores semelhantes de período orbital (frequência fundamental) para todos os filtros, além das frequências harmônicas também apresentarem mesmos valores e serem múltiplos da fundamental e terem menor contribuição que ela, aumentando a confiabilidade do resultado.

O que difere nos gráficos são os valores absolutos da contribuição da frequência no sinal, que efetivamente não influenciam o resultado desejado, o período orbital. A fase do sinal nesta região foi verificada usando o modelo teórico ajustado. Os dados iniciais e o fit do modelo teórico da curva são apresentados na Figura 9, a seguir, que permite verificar que o modelo do fluxo, gerado pelo método BLS, se assemelha com o sinal estudado.

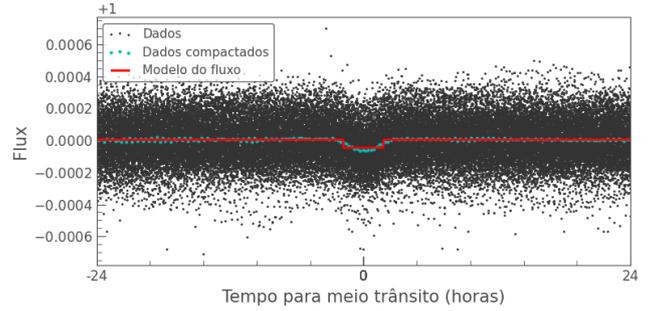


Fig. 9: Curva teórica em vermelho comparada aos dados e aos dados compactados em azul.

Onde o modelo do fluxo, indica o fit feito pelo método BLS, ao qual seria um sinal de duas funções degraus opostas, assim criando um modelo de sinal que se assemelha com o sinal de uma curva de luz.

V. CONCLUSÃO

A aplicação de técnicas de processamento de sinais e a filtragem de dados coletados por meio das missões como Kepler e TESS permitiram não apenas a identificação do possível candidatos a exoplanetas, mas também obter seu período orbital de 2.79 dias a partir do método de identificação BLS. O valor de referência no repositório da NASA é de 2.8 dias [17]. O objeto transeunte é o Kepler 21b, uma super Terra descoberta em 2011, pelo método de trânsito. O resultado também é bem próximo ao encontrado por Bonomo et al [18], com a utilização do método da velocidade radial obteve o valor aproximado de 2.78, para o período do Kepler 21b.

O valor obtido neste trabalho é bem aproximado à medida aceita na literatura dentro de uma margem de aproximadamente 4% de erro. Com isso se evidencia a eficácia e a boa acurácia da do método BLS para esse tipo de análise, bem como a eficiência dos resultados obtidos usando a biblioteca lightcurve.

Convém destacar que outros parâmetros do sistema orbital podem ser estimados a partir do mesmo sinal analisado utilizando técnicas mais avançadas. Isto pode ser objeto de estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela agência FUNCAP.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Siffert, "A procura por exoplanetas habitáveis", *Cad. Astro.*, vol. 3, n° 2, p. 4–15, ago. 2022.
- [2] C.A.S. Silva, F. F. Prado, J. V. B. G. Ramos e L. Bresciani, "Análise de curvas de luz obtidas com o Transiting Exoplanet Survey Satellite com técnicas de machine learning". Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia de Controle e Automação Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2021.G.
- [3] G. Kovács, Z. Shay e M. Tsevi, "A box-fitting algorithm in the search for periodic transits". *Astronomy & Astrophysics*, vol. 391, no. 1, pp. 369–377, 2002.
- [4] G. Basri, F. Ramos-Stierle, K. Soto et al. "The Kepler Mission: Terrestrial Extrasolar Planets and Stellar Activity". In: VAN BELLE, G. (Ed.). 14th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun. [S.l.: s.n.], abr. 2008. p. 281. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 384. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ASPC..384..281B>>. Acesso em: 26 maio 2024.

- [5] G. R. Ricker and D. W. Latham and R. K. Vanderspeket et al. "Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)". In: American Astronomical Society Meeting Abstracts \#214. [S.l.: s.n.], maio 2009. p. 306.05. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009AAS...21430605R>>. Acesso em: 28 maio 2024.
- [6] A. A. Souza e A. Valio, "Estudo da atividade estelar da Kepler-289 a partir da modelagem de trânsitos planetários". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 41, no. 4, p. e20180323/1-e20180323/9, 2019. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0323.
- [7] N. Espinoza e A. Jordan. "Limb darkening and exoplanets: testing stellar model atmospheres and identifying biases in transit parameters". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 450, n. 2, p. 1879-1899, 2015.
- [8] M. A. F. Keniger. "Investigando sistemas planetários através do método de trânsitos". Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul - Instituto De Física Curso De Física - Bacharelado em Astrofísica, Porto Alegre, RS, 2019.
- [9] Lightkurve Collaboration, J. V. D. M. Cardoso, C. Hedges, M. Gully Santiago, N. Saunders, A. M. Cody, T. Barclay, O. Hall, S. Sagar, E. Turtelboom, J. Zhang, A. Tzanidakis, K. Mighell, J. Coughlin, K. Bell, Z. Berta-Thompson, P. Williams, J. Dotson e G. Barentsen, "Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python". *Astrophysics Source Code Library*, Dec. 2018. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018ascl.soft12013L>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- [10] C. R. Harris, K. J. Millman, e S. J. Vander Walt et al., "Array programming with NumPy". *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357-362, Sep. 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [11] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant et al., "SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python". *Nature Methods*, vol. 17, p. 261-272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [12] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment". *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [13] Astropy Collaboration; A. M. Price-Whelan, P. L. Lim et al., "The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package". *The Astrophysical Journal*, vol. 935, no. 2, p. 167, Aug. 2022. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7c74.
- [14] A. Ginsburg, B. M. Sipőcz, C. E. Brasseur et al., "astroquery: An Astronomical Web-querying Package in Python". *The Astronomical Journal*, vol. 157, no. 3, p. 98, Mar. 2019. DOI: 10.3847/1538-3881/aafc33.
- [15] D. Swade, S. Fleming, J. M. Jenkins, D. W. Latham, E. Morgan, S. E. Mullally, W. Sparks, and R. Vanderspek, "The TESS science data archive". Proc. SPIE, vol. 10704, Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII, 1070415, July 2018. doi: 10.1117/12.2312066.
- [16] D. L. V. Domingues, "A física do processo de detecção de exoplanetas através da ciência de dados". Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Física: Licenciatura), Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Física, Maceió, 2022.
- [17] NASA, "Kepler-21 b - NASA Science." [s.d.]. Disponível em: <https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/kepler-21-b/>. Acesso em: 17 maio. 2024.
- [18] A. S. Bonomo et al., "Cold Jupiters and improved masses in 38 Kepler and K2 small planet systems from 3661 HARPS-N radial velocities. No excess of cold Jupiters in small planet systems". *Astronomy & Astrophysics*, Volume 677, id. A33, p. 18, Sep. 2023, doi: 10.1051/0004-6361/202346211