

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### Construindo estimativas de parâmetros orbitais de exoplanetas detectados pelo método da velocidade radial utilizando o catálogo NASA Exoplanet Archive

DÉRYK MIGUEL V. MAIA<sup>1</sup>, ENIO A. OISHI<sup>2</sup>, ANDRÉ B. NORONHA<sup>3</sup>

1 Estudando do curso técnico integrado ao ensino médio em Informática para Internet no IFSP campus avançado São Paulo/São Miguel Paulista. [deryk.maia@aluno.ifsp.edu.br](mailto:deryk.maia@aluno.ifsp.edu.br).

2 Mestre em Matemática, professor EBTT do IFSP campus avançado São Paulo/São Miguel Paulista. [akira.oishi@ifsp.edu.br](mailto:akira.oishi@ifsp.edu.br).

3 Doutor em Ciências, professor EBTT do IFSP campus avançado São Paulo/São Miguel Paulista. [noronha@ifsp.edu.br](mailto:noronha@ifsp.edu.br).

#### RESUMO:

Objetiva-se neste projeto, trabalhado no nível de ensino médio, construir estimativas dos parâmetros orbitais de exoplanetas com baixa excentricidade a partir dos dados abertos disponíveis no catálogo de planetas confirmados (*Published Confirmed*) da NASA, a serem utilizados como entrada para obter informações como o período (tempo de translação do planeta ao redor da estrela), o valor da excentricidade, a época do periastro (data em que o planeta está mais próximo da estrela), o argumento do periastro e a amplitude. Para medir a proximidade dos dados com os resultados esperados, visou-se também a obtenção de valores de *RMS* (*Root Mean Square*) da velocidade radial para comparação com trabalhos consolidados no catálogo da NASA. Utilizou-se recursos acessíveis, como um computador com acesso à internet e programas de edição de planilhas, bem como ambiente de desenvolvimento integrado para a linguagem de programação Python 3 (*PyCharm*). São apresentados as metodologias utilizadas no projeto, os fundamentos teóricos, exemplos de estimativas, e finalmente uma amostra dos valores de *RMS* obtidos. Do ponto de vista educacional, contemplou-se o desenvolvimento de habilidades científicas como a análise crítica de dados e de modelos físicos e matemáticos, bem como capacidade de realizar reflexões e generalizações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Exoplanetas, NASA, *RMS*, Parâmetros

#### Constructing estimates of orbital parameters of exoplanets detected by the radial velocity method using the NASA Exoplanet Archive catalog

**ABSTRACT:** The objective of this project, worked on at a High School level, is to construct estimates of the orbital parameters of exoplanets with low eccentricity from the open data available in NASA's Published Confirmed Planets catalog, to be used as input to obtain information such as the period (translation time of the planet around the star), the eccentricity value, the periastron epoch (date when the planet is closest to the star), the periastron argument and the amplitude. To measure the closeness of the data to the expected results, we also aimed to obtain *RMS* (*Root Mean Square*) values of the radial velocity for comparison with consolidated works in the NASA catalog. Accessible resources were used, such as a computer with internet access, spreadsheet editing programs, and an integrated development environment for the Python 3 programming language (*PyCharm*). The methodologies used in the project, the theoretical foundations, examples of estimates, and a sample of the *RMS* values obtained are presented. From an educational point of view, the project involved scientific skills such as critical analysis of data related to physical and mathematical models and the capacity to make observations and generalizations.

**KEYWORDS:** Exoplanets, NASA, *RMS*, Parameters

## INTRODUÇÃO

O estudo da Astronomia tem sido reforçado por diversas abordagens educacionais como parte importante do processo de aprendizado e engajamento dos estudantes dentro do campo do conhecimento científico, sendo capaz de aumentar sua curiosidade e seu fascínio (Antônio, Leite e Santos, 2021). A via experimental, amplamente explorada na Astronomia, também estimula a formação de habilidades científicas importantes, como capacidade de realizar reflexões e generalizações, aplicar o tratamento de dados e a crítica de modelos físicos e matemáticos (Abib e Araújo, 2003).

Diversas pesquisas apontam para a importância da Astronomia, enquanto área do conhecimento de grande relevância. Gama e Henrique (2010), por exemplo, discutem a riqueza dos debates em torno do tema astronômico, que podem conduzir a múltiplas visões a respeito da natureza da Ciência.

Com o atual avanço da tecnologia, as novas ferramentas digitais se tornaram mais acessíveis e aplicáveis para o ensino de diversas áreas. Dessa forma, uma abordagem viável para o ensino de Física e Astronomia consiste no uso de aplicações computacionais e linguagem de programação.

Um dos principais temas estudados na Astronomia atual são os exoplanetas, isto é, planetas localizados fora do Sistema Solar. Para detectá-los, é possível a utilização de diversos métodos, como imageamento ou método do trânsito estelar. Considerando a proposta do projeto do uso de tecnologias acessíveis a estudantes do Ensino Médio, convém a utilização de dados disponibilizados publicamente pelo NASA Exoplanet Archive obtidos por meio do método da velocidade radial, técnica responsável pelas primeiras descobertas de exoplanetas (Lovis e Fischer, 2011). A partir dos dados, o projeto visa o uso de bibliotecas de linguagem de programação Python para obtenção de diferentes propriedades dos exoplanetas, comparando-os com os valores de trabalhos consolidados.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Fundamentos teóricos

O interesse deste projeto é a obtenção de parâmetros orbitais de exoplanetas, especificamente de sistemas com um planeta e uma estrela, a partir de dados disponibilizados publicamente no catálogo *Published Confirmed* da NASA. A base de dados inclui três principais informações: o momento da medição em dias julianos, a velocidade radial em metros por segundo e por fim a sua incerteza, a partir das quais é possível utilizar o pacote Lomb-Scargle, da comunidade *Astropy* (ASTROPY, 2024) no Python para medição das oscilações periódicas da velocidade radial e verificar a frequência de maior potência nos dados, apontada por meio do periodograma (frequência x potência). Para isso, é necessário considerar a frequência de Nyquist, isto é, a máxima frequência utilizada (metade da taxa de amostragem) necessária para evitar ambiguidade na detecção de sinais periódicos (ASTROPY, 2024).

No código, esse processo é feito por meio da função *periodogramaLombScargle(x, y, erro)*, onde *x* é o registro de tempo, *y* representa as velocidades radiais e o erro se refere às velocidades radiais. A função é indicada na figura 1 abaixo:

```
def periodogramaLombScargle(x, y, erro):
    intervalosTempo = np.diff(x)
    mediaTempo = np.median(intervalosTempo)
    frequenciaNyquist = 1 / (2 * mediaTempo)
    frequencia, potencia = LombScargle(x, y,
    dy=erro).autopower(samples_per_peak=11, maximum_frequency=frequenciaNyquist,
    nyquist_factor=5.5)
    return frequencia, potencia
```

FIGURA 1. Função *periodogramaLombScargle*; produção dos autores.

Utilizando os resultados retornados a partir da função, é possível realizar o ajuste das variações periódicas da velocidade radial do exoplaneta em função do tempo. Também se torna possível obter o gráfico usado para identificação da evidência visual do período do exoplaneta por meio de uma série de Fourier truncada (ASTROPY, 2024), usada como indicação da regularidade do período:

$$y(t) = a \sin(2\pi ft) + b \cos(2\pi ft) + c \quad (1)$$

Onde  $f$  é a frequência,  $t$  é o instante de tempo.

Considera-se, contudo, que a função 1 produz uma aproximação, uma vez que a variação da velocidade radial não pode ser representada precisamente como uma função senoidal para órbitas elípticas. Assim, tendo em vista a descoberta de outros parâmetros orbitais e considerando  $n = 2\pi f$ , é necessário utilizar a série de Fourier expandida:

$$y(t) = a_1 \text{sen}(nt) + b_1 \text{cos}(nt) + a_2 \text{sen}(2nt) + b_2 \text{cos}(2nt) + c \quad (2)$$

No caso, os valores  $a_1, b_1, a_2, b_2$  e  $c$  da função 2 são coeficientes descobertos por meio da função `model_parameters` do *Lomb-Scargle* e da melhor frequência citada.

Considerando então a fórmula para a velocidade radial :

$$VR = \gamma + K[\text{cos}(\omega) \text{cos}(v) - \text{sen}(\omega) \text{sen}(v) + e \text{cos}(\omega)] \quad (3)$$

Onde  $\gamma$  é o coeficiente  $c$ ,  $K$  é a amplitude (diferença entre a maior e menor velocidades radiais),  $\omega$  é o argumento do periastro (diferença angular entre o plano de referência e o plano orbital),  $e$  é excentricidade (valor que determina a proximidade da órbita de um círculo), e  $v$  é chamada anomalia verdadeira.

É possível utilizar a função de Bessel, a partir do método das Expansões Elípticas (Murray e Dermott, 1999) na equação 3 para obter uma quarta equação, de modo a expandir os termos  $\text{cos}(v)$  e  $\text{sen}(v)$  e chegar em:

$$VR = \gamma + K \text{cos}(-n\tau + \omega) \text{cos}(nt) - K \text{sen}(-n\tau + \omega) \text{sen}(nt) + K e \text{cos}(-2n\tau + \omega) \text{cos}(2nt) - K e \text{sen}(-2n\tau + \omega) \text{sen}(2nt) \quad (4)$$

Comparando a equação 4 com a série de Fourier e isolando os parâmetros:

$$\begin{aligned} \omega &= 2 \arctan(-b_1/a_1) - \arctan(-b_2/a_2) \\ \tau &= [\arctan(-b_1/a_1) - \arctan(-b_2/a_2)] / (n) \\ K &= \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)} \\ e &= \sqrt{(a_2^2 + b_2^2)/K^2} \end{aligned}$$

A partir dessas deduções, é possível realizar implementações em código utilizando o Python e o pacote do Lomb-Scargle na determinação das propriedades orbitais citadas para cada exoplaneta a ser selecionado. Diante da possibilidade de trabalhar com um conjunto mais extenso de dados, observou-se a necessidade de um fator de comparação mais razoável que fornecesse um grau de proximidade com o conjunto de dados. Para tanto, utilizou-se o *RMS* - valor eficaz ou média quadrática -, definida como a raiz quadrada da média dos quadrados de um conjunto de valores, que nesse caso são as diferenças dos valores da velocidade radial registrados em cada momento:

$$RMS = \sqrt{[(y_1^2 - y(t_1)^2) + (y_2^2 - y(t_2)^2) + \dots + (y_n^2 - y(t_n)^2)]/n}$$

Onde  $y_i$  é a velocidade radial observada e  $t_i$  é o momento da observação e  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Utilizando essa definição para verificar a proximidade do ajuste obtido com a base de dados e aplicando ao programa em Python, é possível comparar o valor de *RMS* com o de outros trabalhos consolidados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar uma comparação inicial da proximidade dos valores do programa com os dados obtidos, utilizou-se o exoplaneta HD 101930b para verificação e análise. Dessa forma, por meio da aplicação da função  $periodogramaLombScargle(x, y, erro)$  para obtenção da frequência de maior potência a partir do gráfico:

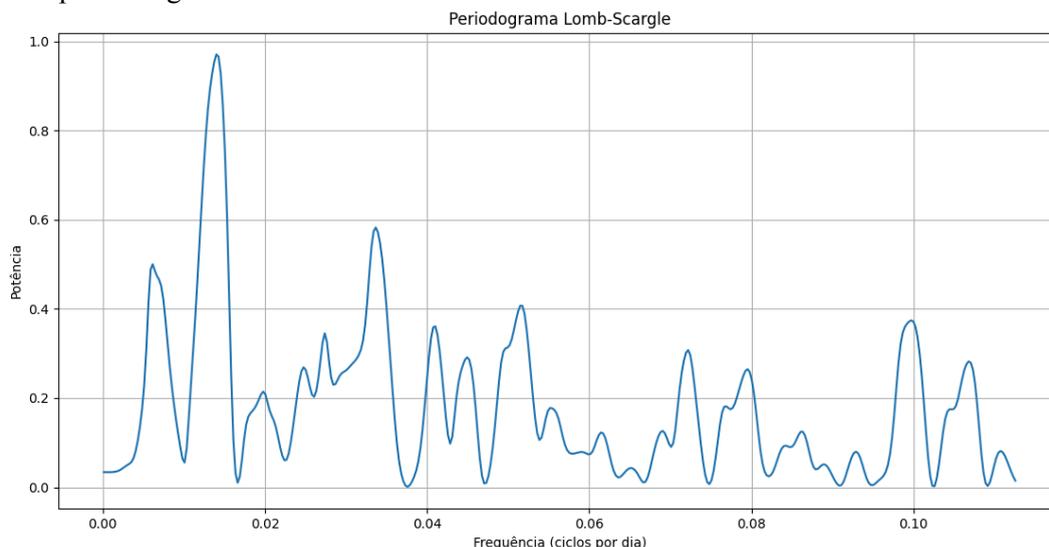


GRÁFICO 1. Periodograma (potência x frequência) do exoplaneta HD 101930 b; produção dos autores.

A melhor frequência encontrada, como pode ser observada no gráfico 1, fica em torno do valor de 0.014 Hz. Vale lembrar que a potência se apresenta como relativa e, por isso, sem dimensão. A partir do programa, também é possível plotar o gráfico 2 da velocidade radial por tempo, tendo em vista a proximidade do ajuste e a evidência visual:

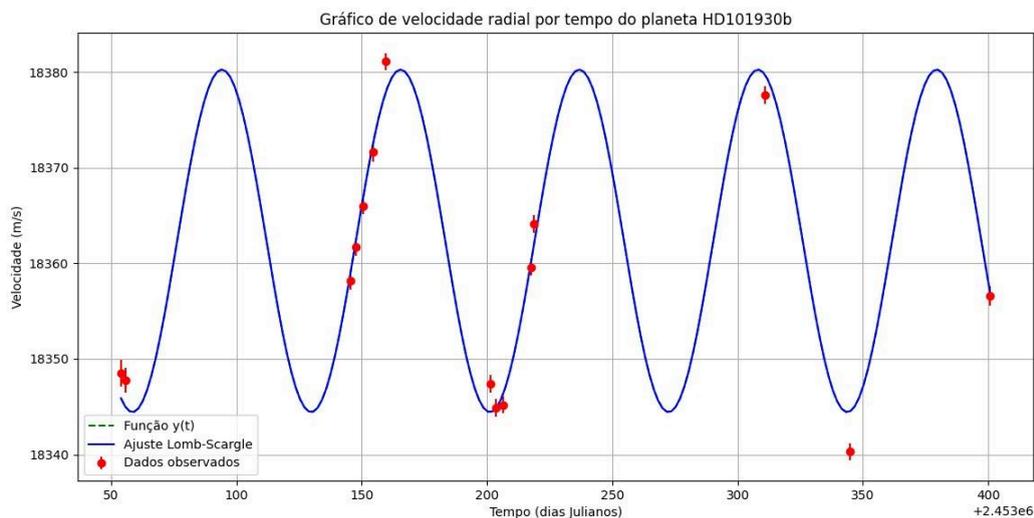


GRÁFICO 2. Gráfico de ajuste de curva (velocidade x tempo) do exoplaneta HD 101930 b; produção dos autores.

O  $RMS$  encontrado pelo programa para a velocidade radial é de aproximadamente  $2.12 m \cdot s^{-1}$ , sendo que o trabalho mais antigo publicado no catálogo possui  $RMS$  de  $1.8 m \cdot s^{-1}$  para órbitas keplerianas (Lovis *et al.* 2005). Os parâmetros obtidos por meio das fórmulas descritas nos

fundamentos teóricos, bem como as referências do trabalho publicado no NASA Exoplanet Archive, podem ser vistos na tabela 1 abaixo.

TABELA 1. Valores dos Parâmetros obtidos por Python (autor) e valores publicados (NASA Exoplanet archive).

Parâmetros	Unidades	Autor	Lovis <i>et al.</i> 2005
$\omega$	(graus)	-7,88	251±11
$\tau$	(dias)	2453052,59	2453145,0±2.0
K	(m/s)	6,05	18,1±0,4
e	---	0,28	0,11±0,02
P	(dias)	71,33	70,46±0,18

\*\* :comparação dos valores do autor com trabalho publicado no catálogo da NASA;  $\omega$  - argumento do periastro,  $\tau$  - época do periastro, K - amplitude, e - excentricidade, P - período.

Para comparação com um número maior de trabalhos, utilizou-se o valor do *RMS* de mais 20 exoplanetas, obedecendo a regra de um único planeta para uma única estrela. A tabela 2 indica os valores obtidos pelo presente trabalho (autor) e o do observado na referência do catálogo.

TABELA 2. Valores de RMS da velocidade radial obtidos (autor) e valores publicados (NASA Exoplanet archive).

Exoplaneta	Autor	NASA Exoplanet archive
HD 5608 b	15,12	6,3
HD 2952 b	19,08	12,4
HD 6434 b	13,03	--
HD 10647 b	8,65	9,4
WASP-33 b	808,93	990
30 Ari B b	142,76	--
81 Cet b	9,99	9,2
HD 33283 b	7,39	3,6
HD 32518 b	19,58	18
HD 47536 b	29,81	51,7
omicron UMa b	8,23	7,6
HD 81688 b	23,51	24
HD 86081 b	6,78	3,2
Gamma 1 Leo b	47,61	40
HD 93083 b	2,52	2
HD 96127 b	51,68	50
HD 99109 b	6,14	6,3
HD 100777 b	6,19	1,7
HD 139357 b	17,65	14
HD 4313 b	4,07	3,7

\*\* :comparação dos valores de RMS ( $m. s^{-1}$ ) do autor com trabalho no catálogo.

## CONCLUSÕES

Em síntese, o trabalho teve como objetivo obter os parâmetros orbitais de exoplanetas descobertos pelo método da velocidade radial, a partir de ferramentas disponíveis ao Ensino Médio, obedecendo o problema de dois corpos delimitados pela regra de um planeta e uma estrela. Para isso, foi realizada a coleta de dados a partir do catálogo da NASA para verificar sua proximidade, e em especial a proximidade do *RMS*. Ainda que a precisão dos dados do catálogo não aparente ser significativa, uma vez que o foco do trabalho está voltado na construção de estimativas para comparação com outros trabalhos, os próximos estágios de aprimoramento como ajustes ou mudança do modelo utilizado e maior coleta de dados podem gerar melhores resultados. Nesse sentido, a semelhança é mais clara para o período, quando comparada a outros parâmetros. Diante disso, os valores de *RMS* também têm espaço para melhorias, e a manipulação mais cuidadosa dos dados, com a possível inclusão de cálculos da incerteza, podem auxiliar na construção de valores mais precisos.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.M.V.M e E.A.O. contribuíram com a fundamentação teórica e programação, bem como a obtenção e análise dos dados. D.M.V.M, E.A.O. e A.B.N. atuaram na revisão e discussão dos dados, bem como na redação do trabalho.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. T. DE .; ABIB, M. L. V. DOS S.. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 176–194, 2003.

ASTROPY. **Lomb-Scargle Periodograms**, [s.d.]. Acesso em 14 mar. 2024. Online.

Disponível em: <https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/lombscargle.html>.

GAMA, L. D.; HENRIQUE, A. B. Astronomia na sala de aula: por quê?. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, São Carlos (SP), n. 9, p. 7–15, 2010.

Acesso em 17 mar. 2024. Online. Disponível em:

<https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/146>.

LEITE, C.; HUAMAN, R., P., M.; SILVA, A., C.; SANTOS, R., G. Importância e justificativas para o Ensino de Astronomia na Educação Básica: Um olhar para as pesquisas.

**Actas electrónicas del xi congreso internacional en investigación en didáctica de las ciencias 2021**, [s.l.], 2021.

LOVIS, C.; FISCHER, D.. Radial Velocity Techniques for Exoplanets. **Exoplanets**. Tucson, AZ: University of Arizona Press, p.27-53, 2011.

LOVIS, C., The HARPS search for southern extra-solar planets. III. Three Saturn-mass planets around HD 93083, HD 101930 and HD 102117. **Astronomy and Astrophysics**, vol. 437, no. 3, pp. 1121–1126, 2005.

MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar System Dynamics**. Cambridge: *Cambridge University Press*, 1999.

NASA EXOPLANET ARCHIVE. **Planets beyond our solar system**. 2020. Acesso em 14 mar. 2024. Online. Disponível em: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.