



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76  
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

## **XXVII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2023**

### **Caracterização de propriedades físicas de exoplanetas**

**Carlos Leon de Jesus Borges<sup>1</sup>; Marildo Geraldete Pereira<sup>2</sup>**

1. Bolsista FAPESB, Graduando em Bacharelado em Física, UEFS, e-mail:

[contato.carlosborgesjb@gmail.com](mailto:contato.carlosborgesjb@gmail.com)

2. Orientador, Departamento de Física, UEFS, e-mail: [mgpereira@uefs](mailto:mgpereira@uefs)

**PALAVRAS-CHAVE:** Exoplaneta; Fotometria CCD; Extração fotométrica.

### **1 - INTRODUÇÃO**

Exoplanetas são planetas que foram descobertos fora do nosso Sistema Solar, orbitando ou não uma estrela. Após a descoberta do primeiro exoplaneta em 1992 orbitando o pulsar PSR B1257+12 e a descoberta do exoplaneta 51 Pegasus b, em 1995 orbitando uma estrela do tipo solar, mais de 5 mil outros exoplanetas foram descobertos.

Os métodos de detecção que mais tem descoberto exoplanetas são os de Velocidade Radial e Trânsito Planetário. A técnica de detecção por velocidade radial (também conhecido como método da espectroscopia Doppler) baseia-se em analisar o sistema “estrela-planeta” por meio do Efeito Doppler, onde é possível detectar o desvio das linhas espectrais para o azul, quando a estrela se aproxima do observador terrestre, ou para o vermelho, nos momentos em que a estrela se afasta (MONTEMOR; TEIXEIRA, 2021). O método então propõe analisar pequenas mudanças no movimento da estrela devido a interações gravitacionais com um possível planeta.

A detecção pelo método de Trânsito Planetário, o método que mais tem contribuído para a detecção de exoplanetas, consiste em observar a variação da luz de uma estrela oriunda da passagem de um corpo em frente ao seu disco luminoso, esse fenômeno é observável em relação ao plano da órbita do planeta e do observador (telescópio), ou seja, o plano da órbita do exoplaneta deve estar alinhado na mesma direção em relação ao observador. Se os planos possuísem um ângulo muito distante de 90° ou fossem paralelos, olhando da Terra, o planeta nunca passaria em frente ao astro (LENCHUK et al., 2021). Para a confirmação de que o corpo se trata de um planeta são necessárias várias observações do trânsito com mesmo intervalo de tempo, o que indicaria se tratar do período de órbita do planeta.

Com o advento dos satélites dedicados à observação de exoplanetas, tais como Corot, Kepler e TESS, muitos exoplanetas têm sido descobertos pelo método de trânsito e seus dados fotométricos disponibilizados para a comunidade científica. Estes dados fotométricos permitem a obtenção de várias propriedades físicas e orbitais do sistema estrela-exoplaneta. Desta forma, este trabalho visa estudar exoplanetas e utilizar dados do Telescópio espacial TESS, utilizando ferramentas de domínio público, tais como LcTools ([arXiv:2103.10285](https://arxiv.org/abs/2103.10285) [astro-ph.IM]) e EXOFAST (Jason Eastman et al 2013 PASP 125 83). O objeto a ser analisado neste trabalho é o TOI-764 b (“TOI-764”, [s.d.]). Espera-se com isto obter informações sobre as propriedades orbitais e físicas deste sistema.

## **MÉTODO**

O processo metodológico utilizado para realização deste trabalho consiste na escolha de um alvo de interesse científico, o qual deverá ter dados fotométricos públicos disponíveis. Como a técnica a ser utilizada é a de trânsito fotométrico, foram obtidas curvas de luz do satélite espacial TESS, as quais seriam obtidas com as ferramentas do programa LcTools e posteriormente as curvas de luz de trânsitos fotométricos obtidas, analisadas com o código EXOFAST.

### **2.1 - O objeto TOI-764 b**

Uma discussão sobre o objeto TOI-764 b (TESS Object of Interest = TOI) aparece no artigo “Three new brown dwarfs and a massive hot Jupiter revealed by TESS around early-type stars” (A. et al., 2022). Neste artigo, TOI-764 b aparece como um objeto de massa dúbia, não permitindo de forma clara a determinação se este objeto é um planeta ou uma anã-marrom (um objeto de massa na interface entre o que definimos como estrela e planeta). Com uma busca no NASA Exoplanet Archive<sup>1</sup>, observou-se que o objeto em questão está classificado como “Candidato a exoplaneta”, além da ausência de mais referências na literatura.

### **2.2 - Obtenção dos dados fotométricos**

A fotometria pode ser definida como a medição da quantidade de luz emitida ou refletida por um objeto astronômico. Podemos destacar a Fotometria Diferencial que é uma técnica de medição da intensidade da luz que compara a luz de um objeto astronômico de interesse com outros objetos próximos. Como as estrelas podem ser do tipo variável, outras são utilizadas a fim de verificar uma possível variabilidade da estrela de interesse e de referência.

### **2.3 – Fotometria CCD do TESS**

O Satélite TESS é equipado com quatro câmeras CCD de alta resolução, cada uma com um campo de visão de 24° x 24°. Os CCDs de transferência de quadros de esgotamento profundo consistem em uma matriz de imagem de 2048 x 2048 pixels e uma área de armazenamento de quadros do mesmo tamanho (para uma leitura rápida de 4 milissegundos) com pixels de 15 x 15 microns. Há quatro CCDs em cada matriz, separados por 2mm, resultando em um detector efetivo de 4096 x 4096 pixels. Eles operam a uma temperatura de -75 graus Celsius para reduzir a corrente escura. Os detectores são lidos a uma taxa de 625 kHz com um ruído de leitura inferior a 10e. O satélite observa uma região do céu por um período longo, chamado "setor," geralmente por cerca de 27 dias. Ele varre todo o céu em busca de exoplanetas em trânsito.

### **2.4 - O código de análise EXOFAST**

O EXOFAST começa lendo os dados das curvas de luz, que geralmente são fornecidos em arquivos FITS (Flexible Image Transport System), ASCII ou em outros formatos de dados astronômicos. O EXOFAST usa modelos físicos detalhados para descrever o sistema exoplanetário em estudo. Inclui modelos para o trânsito planetário (que descrevem como o brilho da estrela varia quando o planeta passa na frente dela) e para a velocidade radial da estrela. O usuário fornece um conjunto inicial de parâmetros (prioris) do sistema em estudo. Esses parâmetros podem incluir o raio do planeta, a inclinação orbital, o período orbital, a excentricidade da órbita, a massa da estrela hospedeira, entre outros. O EXOFAST utiliza um algoritmo de Monte Carlo e Cadeias de Markov (MCMC). O MCMC é uma técnica estatística que gera amostras de parâmetros com base

---

<sup>1</sup> Acesse em: [TOI-764 | NASA Exoplanet Archive \(caltech.edu\)](https://exoplanetarchive.nasa.gov/TOI-764)

na probabilidade dos dados observacionais e nos prioris. O objetivo é encontrar a distribuição de probabilidade posterior dos parâmetros ajustados. As prioris são incorporados ao MCMC para levar em consideração conhecimentos prévios sobre os parâmetros do sistema. Isso torna possível que o ajuste seja orientado por dados prévios, como estimativas de parâmetros baseadas em estudos anteriores. O ajuste de trânsito planetário envolve gerar curvas de luz para diferentes conjuntos de parâmetros. Essas curvas de luz são comparadas às observações reais, e o MCMC ajusta os parâmetros do modelo até encontrar a melhor correspondência com os dados observacionais. O ajuste de velocidade radial envolve o cálculo das velocidades radiais esperadas da estrela devido à influência gravitacional do planeta. Essas velocidades são comparadas com as medições reais das velocidades radiais da estrela, e os parâmetros do modelo são ajustados para otimizar a concordância com os dados observacionais. O EXOFAST realiza uma análise estatística para calcular as incertezas associadas aos parâmetros ajustados. Isso é feito com base nas propriedades das distribuições de probabilidade resultantes das cadeias de MCMC. Após a análise, o EXOFAST fornece os parâmetros ajustados do sistema exoplanetários, incluindo a massa e o raio do planeta, o período orbital, a excentricidade da órbita e outras informações relevantes e gera gráficos detalhados, como as curvas de luz ajustadas e as curvas de velocidade radial ajustadas, para auxiliar na interpretação dos resultados. Além disso, são gerados relatórios técnicos que incluem os valores dos parâmetros ajustados e suas incertezas.

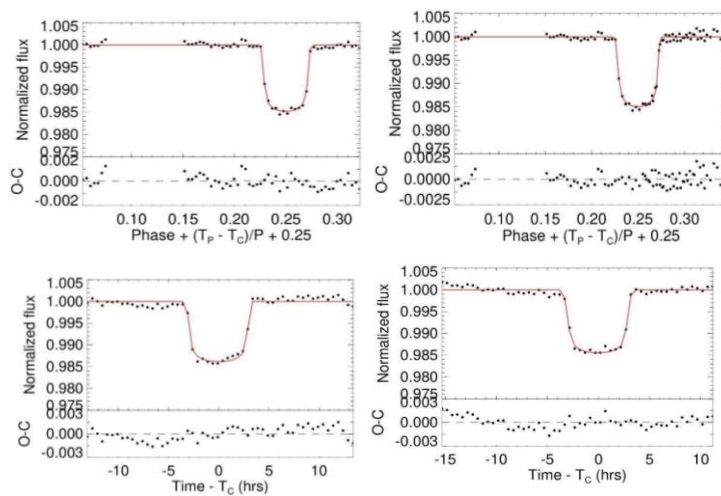
### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de apresentar uma análise sobre o exoplaneta TOI-764 b, os resultados obtidos neste trabalho apresentam os resultados do estudo de caracterização deste objeto utilizando o código EXOFAST, incluindo a modelagem de curvas de luz deste objeto e a obtenção dos parâmetros orbitais.

#### 3.1 - Modelagem das Curvas de Luz:

Para a realização da análise do TOI-764 b foram utilizadas quatro curvas de luz de trânsito deste objeto (Figura. 2, 3, 4 e 5), sendo cada uma delas. A seguir, estão os gráficos que representam as observações reais em preto e as modelagens em vermelho:

*Figura 2: Modelagem da curva de luz de TOI-764 b em  $BJD = 2458574.584606$*

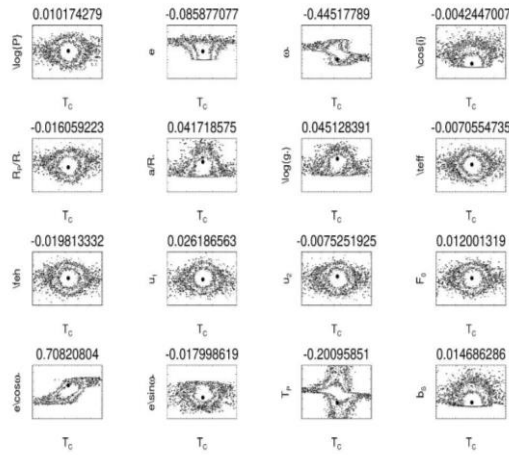


#### 3.2 - Resultados do Método MCMC:

Os resultados obtidos via o método MCMC utilizando os parâmetros *prioris* (parâmetros de entrada) como parâmetros de input. Após as interações necessárias para a minimização

e convergência das soluções. Os resultados referentes às simulações de Monte Carlo são exemplificados na Figura. 6.

Figura 6: Simulações utilizando MCMC



### 3.3 - Determinação dos parâmetros estelares e planetários

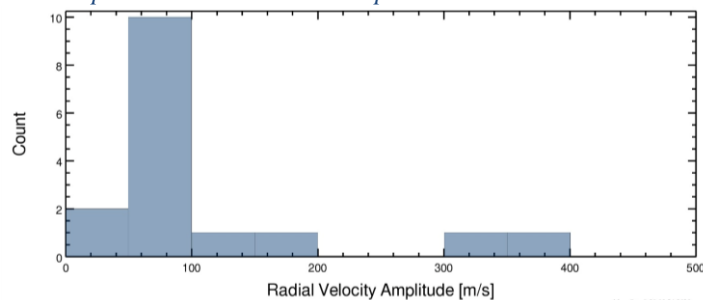
Nesta seção se encontra as médias dos parâmetros estelares, orbitais e planetários de saída do EXOFAST para as quatro curvas de luz do TOI-764 b (Tabela 1).

Como não há resultados de velocidade radial medidos para este objeto, não é possível a determinação da massa do planeta (vide Equação. 1). Para fazermos uma estimativa da possível massa de TOI-764 b realizou-se uma varredura de velocidades radiais medidas para outros exoplanetas com períodos orbitais e massas estelares próximas às obtidas com o EXOFAST (ver Figura. 7).

Tabela 1: Parâmetros estelares e orbitais de TOI-764 b

Parâmetros	Unidades	Valores
<b>Parâmetros estelares:</b>		
$M_*$	Massa ( $M_\odot$ )	$1.733950 \pm 0.016354$
$R_*$	Raio ( $R_\odot$ )	$2.86845125 \pm 0.101732904$
$L_*$	Luminosidade ( $L_\odot$ )	$13.64554775 \pm 1.683668597$
$\rho_*$	Densidade (cgs)	$0.10448125 \pm 0.009153645$
$\log(g_*)$	Gravidade Superficial (cgs)	$3.76163625 \pm 0.015237504$
$T_{\text{eff}}$	Temperatura Efetiva (K)	$2056.256424 \pm 2.648962958$
$[\text{Fe}/\text{H}]$	Metalicidade	$0.20017125 \pm 0.000938629$
<b>Parâmetros orbitais:</b>		
$e$	Excentricidade	$0.4481725 \pm 0.015474562$
$\omega$	Argumento do Periastro (graus)	$87.8954085 \pm 4.302153404$
$P$	Período (dias)	$5.631666 \pm 0$
$a$	Semi-eixo maior (AU)	$0.07440225 \pm 0.000203275$
$b$	Profundidade de trânsito	$0.01291025 \pm 0.0000685379$
$T_{\text{FWHM}}$	Duração do FWHM (dias)	$0.246926 \pm 0.000768692$
$\tau$	Duração de entrada/saída (dias)	$0.0311615 \pm 0.001989896$
$T_{14}$	Duração total (dias)	$0.2790495 \pm 0.001858$
$P_{\text{prior}}$	A priori non-grazing transit prob.	$0.21784475 \pm 0.024079906$
$P_{\text{prior}}^G$	A priori transit prob.	$0.2737735 \pm 0.030617017$
$F_0$	Fluxo de linha de base	$1.000116 \pm 0.000031499$
$T_0$	Tempo do eclipse (BJD <sub>TDB</sub> )	$615076.0187 \pm 0.145685375$
$b_p$	Parâmetro de impacto	$0.3411885 \pm 0.097429255$
$T_{5,FWHM}$	Duração do FWHM (dias)	$0.258953 \pm 0.052190316$
$\tau_{5,FWHM}$	Duração ingresso/egresso (dias)	$0.0371235 \pm 0.006893471$
$T_{14}$	Duração Total (dias)	$0.30693475 \pm 0.059061232$
$P_{\text{prior}}^G$	A priori non-grazing eclipse prob.	$0.156313 \pm 0.012544011$
<b>Parâmetros Planetários:</b>		
$R_p$	Raio ( $R_J$ )	$3.171181 \pm 0.114935265$
$T_{\text{eq}}$	Temperatura de Equilíbrio (K)	$961.334021 \pm 21.50665228$
$\langle F \rangle$	Fluxo de incidentes ( $10^9 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	$2.89559725 \pm 0.15820063$
$e \cos \omega$		$0.00697175 \pm 0.041069466$
$e \sin \omega$		$0.11164075 \pm 0.011530368$
$T_{\text{per}}$	Hora do periastro (BJD <sub>TDB</sub> )	$615074.5767 \pm 0.054484068$
$T_{\text{tr}}$	Hora do trânsito (BJD <sub>TDB</sub> )	$615074.5838 \pm 0.001103725$
$R_p/R_*$	Raio do planeta vs raio estelar	$0.113612 \pm 0.000318603$
$a/R_*$	Semi-eixo maior vs raio estelar	$5.58480125 \pm 0.090867786$
$u_1$	Coefficiente linear de escurecimento de limbo	$0.1879465 \pm 0.001777662$
$u_2$	Coefficiente quadrático de escurecimento de limbo	$0.33101 \pm 0.001183975$
$i$	Inclinação (graus)	$86.253072 \pm 1.510662047$
$b$	Parâmetro de Impacto	$0.28855575 \pm 0.034968489$

Figura 7: Relação de exoplanetas com dados de amplitude de velocidade radial obtido pelo EXOFAST



A estimativa da faixa de massa do TOI-764 b será feita a partir da expressão da amplitude da velocidade radial que se relaciona com a massa planetária (ver Equação. 1).

*Equação 1: Equação para determinação de massa planetária em Massas de Jupiter*

$$M_p = \frac{K}{29.8m/s} \left( \frac{M_*}{M_{sun}} \right)^{2/3} \left( \frac{P}{1yr} \right)^{1/3} M_J$$

Os exoplanetas utilizados para a estimativa do valor da massa do TOI-764 b foram aqueles que, além de estarem na faixa do período orbital e massa estelar, possuíam dados de amplitude de velocidade radial (ver Tabela. 2)

*Tabela 2: Exoplanetas com dados orbitais e massas estelares próximas ao do TOI-764b*

Exoplaneta	Período [Dias]	Orbital	Massa Estelar [Massa Solar]	Amplitude da Velocidade Radial [m/s]
HATS-41 b	4.193649		1.5	1080
HAT-P-40 b	4.457243		1.51	55.5
HAT-P-40 b	4.457243		1.51	58.1
TOI-1601 b	5.331751		1.52	87.3
TOI-640 b	5.0037775		1.54	78
WASP-187 b	5.147878		1.54	70
HATS-64 b	4.908897		1.56	85
HATS-56 b	4.324799		1.57	55.1
KELT-12 b	5.031623		1.59	82
KELT-19 A b	4.6117093		1.62	352
HAT-P-67 b	4.8101025		1.64	36
NGTS-2 b	4.511164		1.64	65.8
HAT-P-69 b	4.7869491		1.65	309
WASP-7 b	4.95466		1.91	97

Utilizamos o menor e o maior valor de velocidade radial para assim obtermos uma estimativa da faixa de massa de TOI-764 b. Com isso temos:

$$K = 36m/s \Rightarrow M_p = 0,435M_J$$

$$K = 1080m/s \Rightarrow M_p = 13,083 M_J$$

O valor obtido utilizando esta metodologia coloca o valor da massa de TOI-764 b na faixa de 0,445– 13,083 $M_J$ .

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho permitiu uma compreensão mais profunda da fotometria CCD, das curvas de luz do TESS e das técnicas de análise de exoplanetas. As análises realizadas contribuem para o conhecimento a respeito da determinação dos parâmetros planetários e estelares de TOI-764 b. O resultado obtido para a massa de TOI-764 b o coloca dentro da categoria exoplaneta tendo em vista que o limite para objetos de massas planetárias é inferior a 13 $M_J$ .

## REFERÊNCIAS

- MONTEMOR, R. N.; TEIXEIRA, R. R. P. Exoplanetas no ensino de física e astronomia. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 14, ed. 3, p. 60-82, 2021.
- LENCHUK, A. P.; FERREIRA, A. M.; VETTORACI, D. B.; BAYERL, L. C.; GOMES, R. da T. Como Identificar Exoplanetas . Cadernos de Astronomia, v. 2, n. 1, p. 191, 2021.
- EASTMAN, J.; GAUDI, B. S.; AGOL, E. EXOFAST: A fast exoplanetary fitting suite in IDL. PASP, v. 125, n. 923, p. 83–112, 2013.
- TOI-764. Disponível em: <<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/TOI-764.01>>. Acesso em: 21 out. 2023.
- PSARIDI, A., et al. "Three new brown dwarfs and a massive hot Jupiter revealed by TESS around early-type stars." *Astronomy & Astrophysics* 664, A94, 2022.