

ATIVIDADE ESTELAR E O RAIO DE EXOPLANETAS

Beatriz Duque Estrada Teixeira da Silva, Adriana Valio

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Desde a descoberta dos primeiros *Exoplanetas* (os planetas fora do Sistema Solar) na década de 90, e a primeira detecção de um trânsito planetário no ano 2000, o *método de trânsito* para detecção de um planeta tem sido utilizado por diversos telescópios espaciais, como por exemplo Kepler e TESS. Estas descobertas contribuíram de forma crucial para o estudo e caracterização de exoplanetas e na busca de planetas que possuam *condições habitáveis* (existência de água líquida em sua superfície), como a Terra. Pela observação dos trânsitos na curva de luz da estrela hospedeira de um exoplaneta, alguns parâmetros do planeta podem ser determinados, como por exemplo o raio, ângulo de inclinação e semieixo da órbita. Porém uma estrela hospedeira pode apresentar manchas em sua superfície que causam pequenas variações na curva de luz quando o planeta oculta uma destas manchas. As variações nas curvas de luz do trânsito fazem com que os parâmetros planetários não sejam tão precisamente determinados e até subestimados. Logo, faz-se necessário o uso de *técnicas de análise e modelagem das manchas estelares* para a melhor estimativa das características dos planetas extrassolares, considerando as alterações causadas pela atividade estelar. Neste projeto, desenvolvemos um pipeline de programas em Python para calibração, análise e modelagem das variações nas curvas de luz devido às manchas a fim de melhorar a precisão dos parâmetros planetários e orbitais e sua relação com a atividade estelar.

Palavras-chave: Método de Trânsito. Exoplanetas. Programação Python.

ABSTRACT

Since the discovery of the first Exoplanets (planets outside the Solar System) in the 90s, and the first detection of a planetary transit in the year 2000, the transit method of detecting a planet has been used by several space telescopes, such as Kepler and TESS. These discoveries contributed crucially to the study and characterization of exoplanets and to the search for planets with habitable conditions (existence of liquid water on their surface), such as Earth. Through modelling the observed transits in the

light curve of an exoplanet host star, some planetary parameters can be determined, such as radius, inclination angle, and semi-major axis of the orbit. However, a host star may have spots on its surface which can cause small variations in the transit light curve when the planet passes in front of one of these spots. Variations in the transit light curve make the parameters less accurately determined and even underestimated. Therefore due to these variations caused by stellar activity, it is necessary to model stellar spots to better estimate the characteristics of the extrasolar planets. In this project, we developed a pipeline of Python programs for calibrating, analyzing, and modeling variations in transit light curves due to spots to improve the accuracy of planetary and orbital parameters and their relationship to stellar activity.

Keywords: Transit Method. Exoplanets. Python programming.

1. INTRODUÇÃO

Desde 1992, exoplanetas (planetas fora do Sistema Solar) vêm sendo descobertos com diversos equipamentos e métodos observacionais. A partir da descoberta destes, muitos estudos sobre a formação de planetas e até mesmo a busca de vida fora da Terra são cada vez mais priorizados devido à sua grande importância. A descoberta de exoplanetas carrega consigo o estudo e análise de diversas áreas que são de extrema importância para a compreensão do Universo como a frequência de planetas como a Terra e se estamos sós no Universo, entre outras.

Exoplanetas têm sido descobertos desde a década de 90 através de diversos métodos observacionais que com o tempo são cada vez mais aprimorados e geram resultados cada vez mais precisos. Mesmo assim, faz-se necessária a melhoria de técnicas observacionais no processo de estudo de exoplanetas e na apuração e análise que essas resultam, para que assim, parâmetros acerca do planeta e do exossistema em que está inserido sejam cada vez mais precisos.

Outrossim, muitos telescópios espaciais têm como missão a descoberta de exoplanetas com parâmetros semelhantes ao planeta Terra (planeta rochoso e com água líquida em sua superfície) para que assim, sejam descobertos fatores favoráveis à hospedagem de vida. Pode-se citar como exemplo o satélite CoRoT (CNES/ESA) com participação brasileira, posteriormente o satélite Kepler (NASA), que ficou até 2018 no espaço e o satélite TESS (NASA), lançado em 2018 para dar continuidade à missão Kepler. Estas

missões espaciais têm como principal enfoque a descoberta de exoplanetas pelo método de detecção do trânsito.

1.1. O Método de detecção de trânsito

Um planeta em órbita de uma estrela, pode eclipsá-la caso a configuração da órbita e observador seja propícia. Ao passar em frente à estrela, o planeta causará um diminuto decréscimo no brilho da estrela (Figura 1). Estas pequenas variações, de no máximo alguns porcentos, causadas na curva de luz da estrela possibilitam a detecção de planetas e é conhecido como o método de trânsito.

O método de trânsito planetário permite a análise da curva de luz gerada por uma estrela com um planeta a eclipsá-la. Para isso, é necessário que o plano orbital do planeta esteja quase perpendicular ao plano do céu. Também é mais provável a detecção se o planeta orbitar a estrela em um período razoavelmente curto (geralmente períodos de 10 dias ou menos). Assim, o trânsito ocorrerá mais de uma vez facilitando a confirmação que o objeto em trânsito ao redor da estrela orbitada realmente se trata de um planeta. (Perryman, 2011)

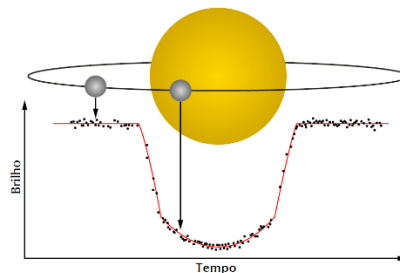


Figura 1: Trânsito de um planeta em torno de estrela hospedeira e o decréscimo no brilho da estrela evidente em sua curva de luz. Fonte: (Metodos para a detecção de exoplanetas, s.d.)

A partir da análise de trânsitos planetários observados na curva de luz, é possível obter o período do trânsito, ângulo de inclinação da órbita planetária, distância entre o planeta e a estrela e o raio do planeta. Logo, com o ajuste preciso da curva de luz, diversos parâmetros do planeta e a sua órbita podem ser extraídos, o que contribui para estudos acerca da formação e composição planetária.

1.2. Telescópios espaciais

A missão espacial Kepler (Figura 2, painel à esquerda) possuiu como objetivo científico a exploração da estrutura e diversidade de sistemas planetários (Kepler-overfiew, s.d.). Pela análise de meio milhão de estrelas pelo satélite, foi possível estimar:

- A porcentagem de planetas terrestres que estão na zona habitável das estrelas;
- A distribuição de raios dos planetas descobertos;
- A relação entre a quantidade de planetas que orbitam uma estrela e a massa dessa estrela; e
- As propriedades das estrelas que abrigam o planeta e a relação das propriedades destes.

O satélite Kepler foi o responsável pela detecção de mais de 4000 (quatro mil) possíveis planetas, sendo eles mais de 2600 confirmados e 2000 possíveis candidatos. O satélite observou continuamente 160.000 estrelas por 4 anos, retornando a curva de luz posteriormente analisada para a detecção de possíveis planetas. Após este período, a missão continuou com o K-2 dando continuidade às descobertas de exoplanetas.



Figura 2: Esquerda: O satélite Kepler. Imagem ilustrativa. Fonte: (Nasa kepler, s.d.). Direita: O satélite TESS. Imagem ilustrativa. Fonte: (Nasa images Tess)

O satélite TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) também utiliza o método de trânsito para descoberta de planetas. Logo, esta missão tem como objetivo encontrar exoplanetas que periodicamente bloqueiam parte da luz de suas estrelas hospedeiras (about Tess). Foi lançado em abril de 2018 com o objetivo de substituir o satélite Kepler e analisar mais de 200 mil estrelas brilhantes próximas ao Sol, na procura de planetas que as orbitam. Até o momento possui 47 planetas confirmados e 1913 candidatos (Tess, s.d.)

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Manchas solares e estelares

O Sol possui em sua superfície (fotosfera) regiões escuras denominadas, manchas solares (Figura 3). Estas manchas são mais escuras pois são regiões de campos magnéticos intensos (centenas a milhares de vezes o campo ao redor) que atrapalham o transporte de calor do interior solar gerando regiões de menor temperatura e, portanto, mais escuras. São fenômenos temporários – com tempo de vida entre alguns dias a alguns meses - presentes na fotosfera do Sol, aparecendo de forma mais escura do que as áreas circundantes.

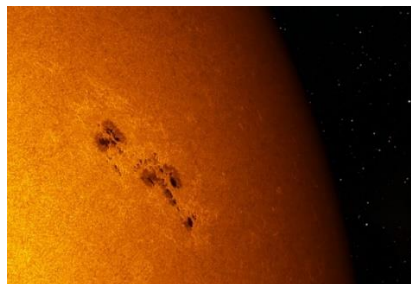


Figura 3: Exemplo de manchas Solares na superfície do Sol
(O que são manchas solares?, s.d.)

Assim como o Sol, estrelas também apresentam regiões escuras em sua superfície. Como suas equivalentes solares, as manchas de uma estrela possuem temperatura superficial reduzida, causadas por concentrações de fluxo de campo magnético que inibem a convecção. Porém localizadas em outras estrelas, é impossível a comparação direta delas.

A presença de manchas na superfície da estrela produz modulações na curva de luz causadas pela rotação da estrela (Figura 4). Quando o hemisfério da estrela voltado para a Terra possui mais manchas escuras, seu brilho total diminui, enquanto se o hemisfério visível tiver poucas manchas, o brilho total será maior.

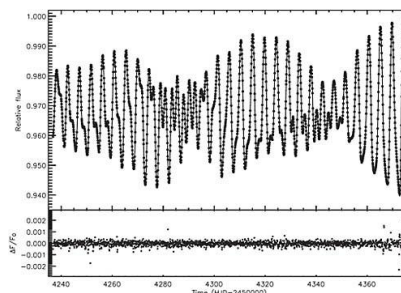


Figura 4: Curva de luz da estrela CoRoT-2 e a modulação de até 6% devido à presença de manchas conforme a estrela rotaciona. (Lanza et al., 2010)

As manchas também podem alterar a estimativa dos parâmetros do raio do planeta e seu semieixo orbital inferidos da curva de luz do trânsito. Geralmente estes parâmetros são determinados como se a estrela não possuísse atividade, conforme mostraremos mais adiante.

2.2 Modelo de manchas

O modelo desenvolvido por Silva (2003) foi o primeiro a possibilitar a identificação do sinal de manchas durante os trânsitos de exoplanetas nas curvas de luz da estrela. A partir do modelo, é possível a obtenção de propriedades físicas das manchas como: tamanho, intensidade, localização etc. Este modelo será utilizado para modelar manchas presentes nas superfícies de estrelas ativas e então, subtrair os efeitos que estas causam nos trânsitos, determinando mais precisamente o raio do planeta e seu semieixo orbital, conforme exemplificado nas Figuras 5, 6 e 7 (Valio, 2017).

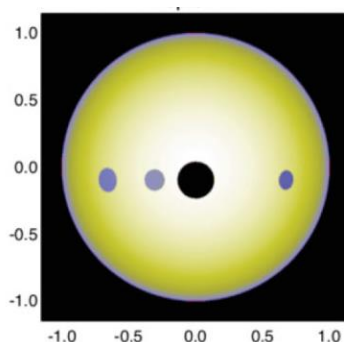


Figura 5: Modelo da estrela Kepler-17 com 3 manchas. O planeta é representado pelo disco preto no centro da imagem.

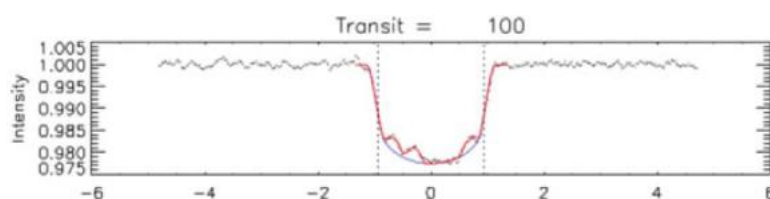


Figura 6: Curva de luz do 100º trânsito da estrela Kepler-17, com o modelo de uma estrela sem manchas (curva azul) e modelo da curva de luz de uma estrela com 3 manchas (curva vermelha).

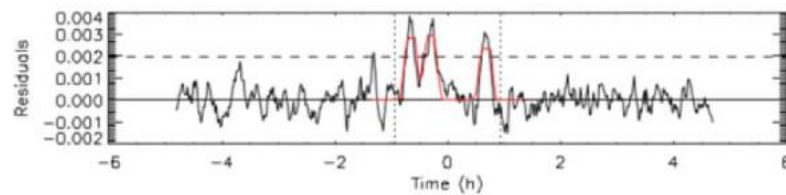


Figura 7: Resíduos dos dados da estrela Kepler-17 após a subtração do modelo de trânsito de uma estrela sem manchas da curva da luz (curva preta) e o modelo dos resíduos de uma estrela com 3 manchas (curva vermelha) enfatizando as assinaturas das manchas.

Nesta pesquisa, é estendida a análise e modelagem das curvas de luz para mais estrelas ativas encontradas na base de dados do satélite Kepler com evidência de trânsitos planetários. Os trânsitos são modelados para extração dos parâmetros iniciais de raio do planeta, semieixo e ângulo de inclinação orbitais.

3. METODOLOGIA

Para se obter os resultados esperados frente à programação, foi necessária a tradução de programas na linguagem IDL para Python, que se encontra como a melhor alternativa atual para programas que envolvem manipulação de matrizes, plotagem de imagens e bibliotecas matemáticas de maneira prática e responsiva, tanto para o programador quanto para o usuário.

Dessa forma, utiliza-se a orientação a objetos para criar Classes determinadas para cada função presente no programa. Além disso, faz-se necessária a documentação do código para que este se torne mais acessível para futuros usuários que desejarem utilizá-lo.

3.1. Planejamento e estrutura do programa

Conceitos de planejamento e estrutura de software foram utilizados para o estabelecimento das etapas dos programas, como por exemplo a definição de cada etapa, entrada do usuário, tratamento de erros e saída. As etapas dos projetos podem ser representadas através dos organogramas apresentados abaixo.

Modelo de criação da Estrela

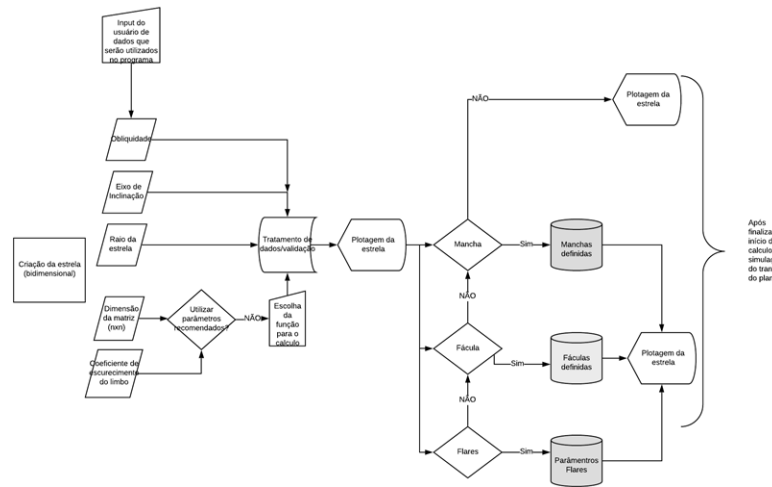


Figura 8: Organograma que representa as etapas de funcionamento do programa para a modelagem da estrela, desde a coleta de dados passados pelo usuário até a sua saída, retornando uma estrela representada graficamente.

Dados coletados para manchas, flares ou fáculas.

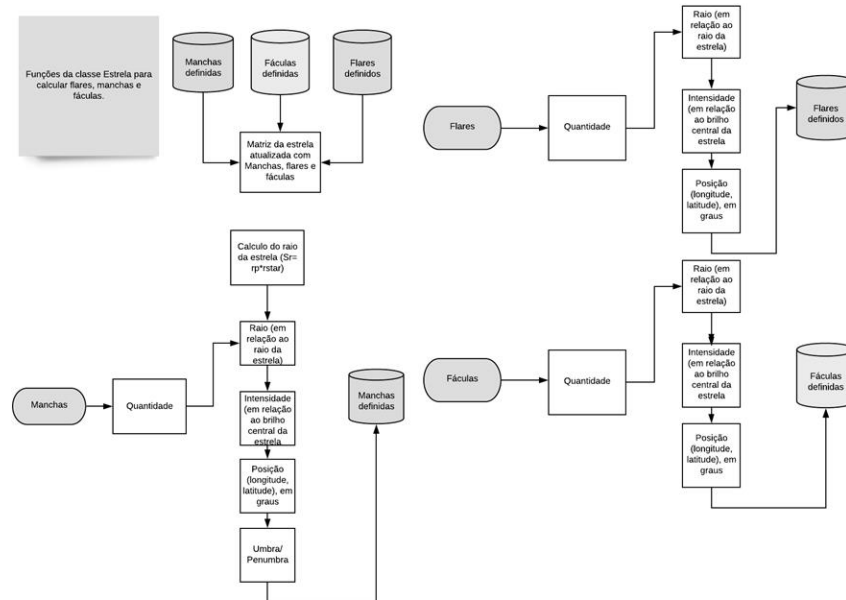


Figura 9: Organograma que representa os dados que serão passados para o programa para a adição de manchas, fáculas e flares nas estrelas (opção de flares e fáculas ainda não implementada).

Modelo de criação do Eclipse.

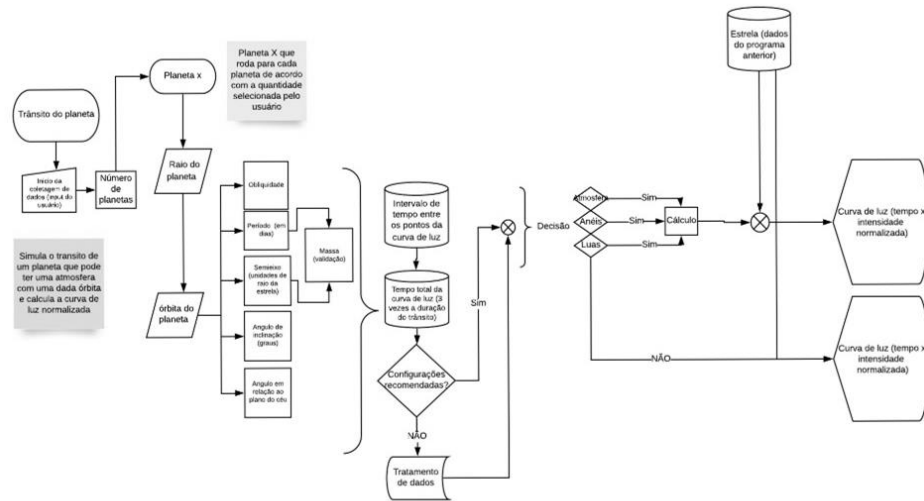


Figura 10: Organograma que representa o tratamento de dados até agora coletados pelo programa e o resultado (saída) que retornará para o usuário, a curva de luz da estrela.

3.2. Orientação de objetos em Python

Conceitos acerca da orientação a objetos em Python foram estudados para que o código fosse otimizado e organizado.

Uma classe possui objetos, onde cada qual possui um determinado tipo, e assim foi desenvolvido o programa com as seguintes classes:

Estrela: essa classe recebe os parâmetros (objetos) necessários para a plotagem da estrela.

Construção da Classe Estrela, em Python.

```
class estrela:
    """
    A classe estrela recebe como objeto o raio, intensidade maxima, coeficientes de escurecimento de limbo.
    A estrela é formata em uma matriz de tamanho default 856.
    São objetos pertencentes a classe os parâmetros passados à mancha, como: raio, intensidade, longitude e latitude
    em relação à estrela.
    ***** PARÂMETROS DA ESTRELA*****
    :parâmetro raio: O raio da estrela
    :parâmetro intensidadeMaxima: Intensidade do centro da estrela
    :parâmetro coeficienteHum: Coeficiente de escurecimento de limbo
    :parâmetro coeficienteDois: Coeficiente de escurecimento de limbo
    :parâmetro tamanhoMatriz: Tamanho da matriz em que será construída a estrela
    :parâmetro estrela: Estrela construída com os coeficientes de escurecimento de limbo
    """
```

Figura 11: Descrição da classe Estrela presente no código do programa.

Eclipse: essa classe recebe como objetos os dados dos planetas e retorna ao usuário a curva de luz da estrela dado este planeta em trânsito. Ele se inicia com os parâmetros da estrela e é calculado após serem passados os parâmetros do planeta.

Classe Eclipse.

```
class Eclipse:
    ...
    Criação da classe eclipse, que retornará a curva de luz do trânsito do planeta ao redor da estrela

    ***parâmetros atribuídos ao planeta***
    :parâmetro periodo: período de rotação do planeta
    :parâmetro SemiEixoRaioStar: semi eixo do planeta em relação ao raio da estrela
    :parâmetro anguloInclinacao: ângulo de inclinação do planeta
    :parâmetro raioPlanetaRstar: raio do planeta
    ...
```

Figura 12: descrição da classe Eclipse presente no código do programa

Iniciando a classe Eclipse.

```
def __init__(self, Nx, Ny, raioEstrelaPixel, estrelaManchada):
    self.Nx = Nx
    self.Ny = Ny
    self.raioEstrelaPixel = raioEstrelaPixel
    self.estrelaManchada = estrelaManchada

def criarEclipse(self, periodo, semiEixoRaioStar, anguloInclinacao, raioPlanetaRstar):
    self.periodo = periodo
    self.semiEixoRaioStar = semiEixoRaioStar
    self.anguloInclinacao = anguloInclinacao
    self.raioPlanetaRstar = raioPlanetaRstar
```

Figura 13: A função “def __init__” constrói a estrela manchada pronta para receber os parâmetros do planeta. Já a função “criarEclipse” calcula o eclipse dada esta estrela e os parâmetros planetários.

3.3. Tratamento de erros em Python

O tratamento de erros em cada variável é muito importante para que o usuário possa colocar dados coerentes no decorrer das etapas, por exemplo, o raio de um planeta não pode ser negativo e, por isso, o programa deve apresentar erro ao usuário caso haja alguma entrada de dados que não é aceita pelo programa. Porém, isso deve ser feito sem que o programa pare e desfaça todo o progresso do usuário.

O método utilizado para o tratamento funcional de erros foi o “Try/Except” que retorna ao usuário o tipo de erro que o programa apresenta e permite que o usuário digite novamente o que deseja, dessa vez corrigindo o erro.

```

error=-1 #trata o erro
#ESTRELA
while error==1: #enquanto o erro for -1, o while irá rodar, ou seja, o usuário terá que refazer o processo se estiver apresentando algum erro
    #se passar por todos os inputs sem erro, a função retornará 0, e assim, sairá do laço e passará para a próxima etapa
    try:
        estrela = estrela(raio,intensidadeMaxima,coeficienteHum,coeficienteDois,tamanhoMatriz)
        error=estrela._getError() #se não houver nenhum erro, ele receberá 0, o que o fará sair do laço.
    except Exception as erro:
        print(f'\033[0;31mO valor digitado é inválido. Por favor, digite novamente. O tipo de problema encontrado foi(erro.__class__)\n\n\033[m') #retorna o tipo de erro

```

Figura 14: Trecho de código exemplo utilizando o método Try/Except.

3.4. Documentação de códigos

A documentação de códigos é muito importante para que usuários possam conhecer o funcionamento do programa de maneira mais profunda, bem como as funções que possui e como elas trabalham, quais seus retornos, quais classes e objetos consistem no funcionamento do programa, etc.

A documentação é realizada através de comentários especiais no código fonte e é gerada em um documento web para a melhor visualização e facilidade de acesso. (Cavalcanti, s.d.). Para o link da documentação do código, Vide seção 3.7.

3.5. Estratégias de divulgação da pesquisa

Além da estratégia inicial da proposta que conta com a divulgação dos programas em um repositório público (GitHub), foi analisada a possibilidade de desenvolvimento de um site para a divulgação da pesquisa e dos programas. Dessa forma, o intuito deste é de proporcionar maior acessibilidade do público referente aos programas e temas que envolvem o estudo de Exoplanetas através do método de observação do trânsito

O site é desenvolvido em HTML com extensão JS e CSS, bibliotecas responsáveis de trazer facilidade e acesso e interação, além de contar com ferramentas visuais que melhoram a experiência do usuário.

As abas presentes no site são:

- Posts: Pequenos textos desenvolvidos para esclarecimento acerca do tema e da pesquisa envolvida para o usuário, além de introduzir de maneira simples a importância dos programas desenvolvidos em Python.
- Baixar Programa: Aba onde o programa em arquivo executável está disponível para download.
- Documentação: Aba onde a documentação dos programas está disponível para download.

- Equipe: Informações e contato de cada um dos membros da equipe responsável por contribuir com essa área de pesquisa.

3.6. Links e downloads

O download da documentação, GitHub com os códigos dos programas e link do site desenvolvido encontram-se abaixo:

- GitHub com os códigos e documentação: <https://github.com/biaduque/astronomy>
- Site Desenvolvido: https://biaduque.github.io/atividade_estelar/

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Para o teste dos programas foram utilizados dados de planetas reais descobertos pelo satélite Kepler através do método de trânsito. Os principais testes foram realizados com os planetas

- Kepler 17-b
- Kepler 63-b
- Kepler 71-b
- Kepler 96-b
- Kepler 45-b

4.1. Parâmetros estelares e planetários

Para a realização dos testes dos programas juntamente com o estudo e análise do comportamento da curva de luz de cada estrela (com ou sem manchas) foram utilizados dados das estrelas disponíveis no catálogo do site “Exoplanet.eu”. A tabela a seguir lista os parâmetros utilizados.

Estrela	Kepler 17	Kepler 63	Kepler 71	Kepler 96	Kepler 45	Estrela Teste
raio (Rsun)	1.05 ($\pm$ 0.03)	0.901	0.816 ($\pm$ 0.389)	1.02	0.55	1.0
C. escurecimento de limbo 1	0.405	0.31	0.623	0.224	0.353	0.5
C. escurecimento de limbo 2	0.262	0.354	0.324	0.593	0.255	0.3
planeta						
período (dia)	1.4857108	9.4341505	3.905081	16.2	2.455239	10
semi eixo (UA)	0.02591	0.08	0.047	0.161585	0.027	15 Rstar
ângulo de inclinação (deg)	87.2	87.806	89.95	90	87.0	88
Raio (Rjup)	1.312	0.545	1.0452	0.238	0.96	0.1 Rstar
Refência	Valio et al. (2017)	Netto & Valio (2020)	Zaleski et al. (2019)	Estrela & Valio (2018)	Zaleski et al. (2020)	

Tabela 1: Tabela com os parâmetros das estrelas e seus respectivos planetas que foram utilizados para uso de teste e análise nos programas desenvolvidos. (Catálogo)

Algumas observações importantes sobre o programa encontram-se a seguir.

A inserção de manchas na estrela se dá pelos parâmetros do raio, intensidade, longitude e latitude em graus. A criação da matriz 2D da estrela foi obtida para um dado raio da estrela em pixels, com distribuição de brilho com os coeficientes de escurecimento de limbo linear e quadrático, u_1 e u_2 .

$$I(\mu) = I_c [1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2]$$

onde $\mu = \cos(\theta)$, e θ o ângulo entre a linha de visada e a perpendicular à superfície da estrela.

A equação para cálculo da latitude da estrela onde ocorre a projeção do trânsito e, portanto, onde as manchas devem estar para serem ocultadas pelo planeta é dada por:

$$\text{lat} = -\text{asin}(a \cdot \cos(\text{inc}));$$

onde a é o semieixo orbital e inc o ângulo de inclinação orbital.

Em IDL, o ângulo do cosseno deve estar em radianos, assim como o resultado do arco-seno (asin) sai em radianos também. $!d\text{tor}$ é uma variável que faz a conversão de grau para radiano, ou $\pi/180 = 0.0174533$, portanto para $\text{inc} = 87.2^\circ$, por exemplo, a latitude dada em graus também é:

$$\text{lat} = -\text{asin}(a \cdot \cos(\text{inc} * !d\text{tor})) / !d\text{tor};$$

4.2. Curvas de luz simuladas com manchas

As curvas de luz para as estrelas, cujas propriedades são listadas na Tabela 1, foram geradas utilizando o programa desenvolvido em Python. Também foram adicionadas manchas em sua superfície. Para todas as estrelas, nota-se alteração na curva de luz após a adição de uma mancha localizada na projeção da trajetória da órbita do planeta.

A tabela a seguir lista os parâmetros de cada mancha em suas respectivas estrelas.

Parâmetros da mancha	Kepler 17	Kepler 63	Kepler 71	Kepler 96	Kepler 45	Estrela Teste**
raio*	0.04	0.05	0.07	0.04	0.06	0.05
Latitude	-12	-49	-0.6	-1.16	-24	-30
Longitude	40	50	30	-40	-30	20,30,40,50
Intensidade*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Referência	1- Valio et al. (2017)	2- Netto & Valio (2020)	3- Zaleski et al. (2019)	4- Estrela & Valio (2018)	5- Zaleski et al. (2020)	

*Raio e intensidade são em relação ao raio da estrela

**Estrela Teste com 4 manchas

Tabela 2: Parâmetros de cada mancha em suas respectivas estrelas.

4.2.1. Kepler 17-b

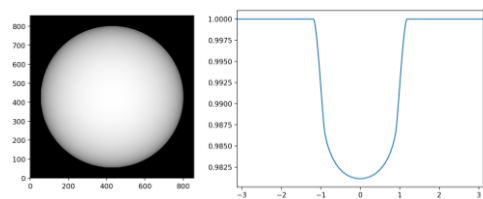


Figura 15: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela sem manchas. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 17 sem manchas, tendo o planeta Kepler 17-b a orbitá-la.

Teste com mancha (Referência 1, Tabela 2):

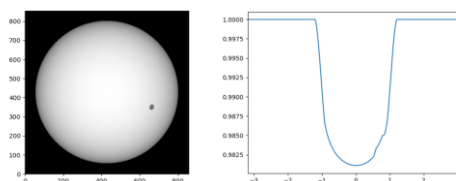


Figura 16: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela com uma mancha. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 17 com uma mancha, tendo o planeta Kepler 17-b a orbitá-la.

4.2.2. Kepler 63-b

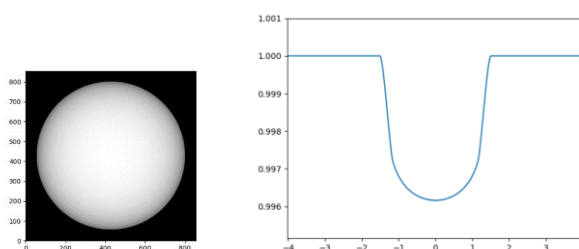


Figura 17: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela sem manchas. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 63 sem manchas, tendo o planeta Kepler 63-b a orbitá-la.

Teste com mancha (Referência 2, tabela 2):

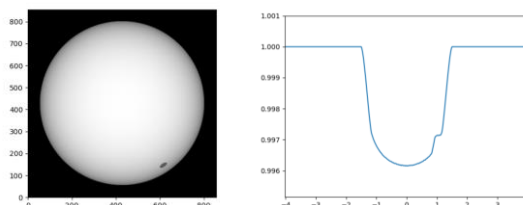


Figura 18: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela com uma mancha. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 63 com uma mancha, tendo o planeta Kepler 63- b a orbitá-la.

4.2.3. Kepler 71-b

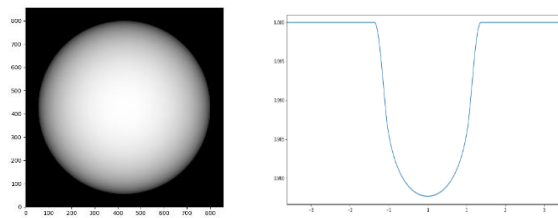


Figura 19: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela sem manchas. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 71 sem manchas, tendo o planeta Kepler 71-b a orbitá-la.

Teste com mancha (Referência 3, Tabela 2):

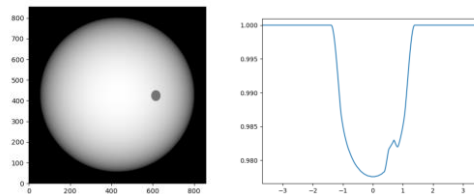


Figura 20: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela com uma mancha. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 63 com uma mancha, tendo o planeta Kepler 63- b a orbitá-la.

4.2.4. Kepler 96-b

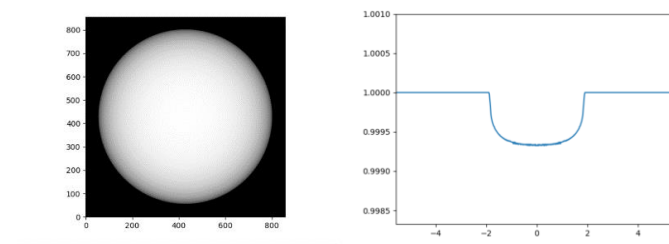


Figura 21: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela sem manchas. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 96 sem manchas, tendo o planeta Kepler 96-b a orbitá-la.

Teste com mancha (Referência 4, Tabela 2):

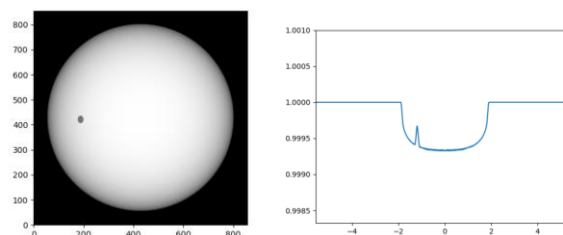


Figura 22: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela com uma mancha. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 96 com uma mancha, tendo o planeta Kepler 96- b a orbitá-la.

4.2.5. Kepler 45-b

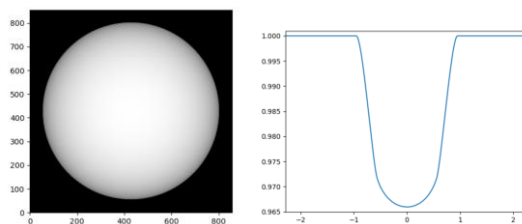


Figura 23: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela sem manchas. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 45 sem manchas, tendo o planeta Kepler 45-b a orbitá-la.

Teste com mancha (Referência 5, Tabela 2):

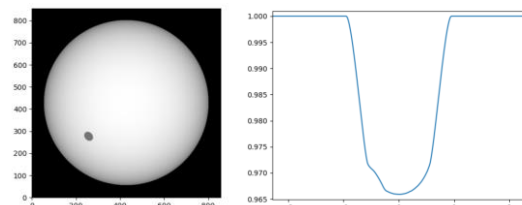


Figura 24: Imagem da esquerda: representação gráfica da estrela com uma mancha. Imagem da direita: curva de luz gerada pela Kepler 45 com uma mancha, tendo o planeta Kepler 45- b a orbitá-la.

4.2.6. Estrela teste

Estrela genérica utilizada para testar o programa.

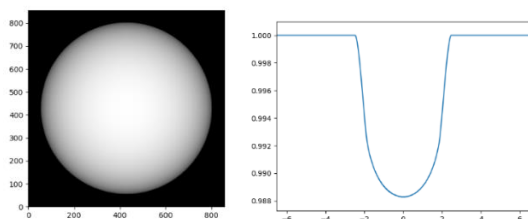


Figura 25: Imagem esquerda: Representação de uma estrela sem manchas. Imagem direita: Curva de luz de uma estrela com um Exoplaneta a eclipsando.

A seguir, testes com a inserção de 4 manchas genéricas (Referência 6, Tabela 2):

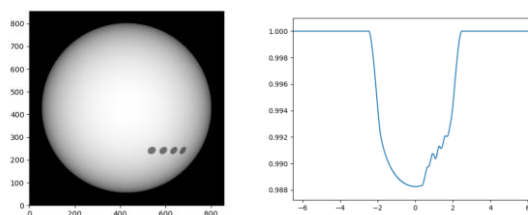


Figura 26: Imagem esquerda: Representação de uma estrela com quatro mancha. Imagem direita: Curva de luz de uma estrela com quatro manchas sendo eclipsada por um Exoplaneta.

4.2.7. Modulações da curva de Luz

De acordo com levantamento da análise realizada por diversos autores na literatura, concluímos que a presença de manchas altera a determinação do raio planetário, R , e semieixo orbital do planeta, a . A Tabela 3 traz alguns exemplos de modulação da curva de luz de algumas estrelas que possuem manchas em sua superfície, levando em consideração os efeitos que estas causam na determinação do raio e semieixo orbital do planeta. Delta R representa a variação do raio do planeta enquanto Delta a , a variação do semieixo orbital do planeta. Assim, pode-se supor que as manchas causam efeito de subestimação desses dois parâmetros analisados.

Estrela	Modulação	Delta R	Delta a	Referência
Kepler-17	4%	7%	8%	Valio et al. (2017)
Kepler-63	4%	4%	1.2%	Netto & Valio (2020)
Kepler-96		2%	--	Estrela & Valio (2018)
Kepler-71	2%	5%	4.5%	Zaleski et al. (2019)
Kepler-45	3%	18%	2%	Zaleski et al. (2020)
Sol	0.1%			

Tabela 3 - Exemplos do efeito da presença de manchas na superfície das estrelas que causam uma modulação da curva de luz e variação na determinação do raio e semieixo orbital do planeta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizamos a otimização e documentação de códigos em Python, anteriormente disponibilizados em IDL. Pode-se concluir que o projeto cumpriu com os objetivos enunciados uma vez que a orientação à objetos possibilita a melhor estruturação de dados em um código. Também proporciona fluidez ao interagir com o usuário, já que permite o tratamento de erros e validação de entradas além da criação de loops mais eficientes.

A implementação de etapas que tratam erros de possíveis entradas digitadas pelo usuário é de extrema importância para que estes não parem de rodar sem aviso prévio ou

rodem com alguma informação ou valor incorreto, o que geraria resultados não confiáveis. Com isso, o usuário recebe mensagens de erros e não precisa reiniciar todo o processo ou reescrever etapas que estavam corretas, podendo começar de onde parou, ou seja, corrigir de imediato o que digitou de maneira incorreta.

Além disso, também foi desenvolvido um código “main para programadores” onde profissionais ou estudantes já familiarizados com programação podem rodar o programa e obter seus resultados sem ter que passar por tantas etapas. Estas etapas são necessárias para o usuário, porém para repetidos testes em grandes quantidades é necessário algo mais rápido e objetivo. Assim, os programadores podem digitar as entradas no corpo do código e rodá-lo apenas para a visualização de resultados.

Com os programas desenvolvidos neste trabalho, foi possível a realização das análises e estudos de estrelas e suas curvas de luz geradas no trânsito, possuindo ou não manchas em suas superfícies, tornando possível algumas observações e conclusões. Como exemplificado para as estrelas Kepler 17 (Figura 15) e Kepler-71 (Figura 19), quanto maior o raio do planeta, maior a profundidade na curva de trânsito. Ao comparar os trânsitos simulados dos planetas Kepler-17b e Kepler-71b com os de Kepler-96b, se nota diferença nesta profundidade, levando à conclusão de que este último planeta possui menor raio em relação ao raio de sua estrela hospedeira. Dessa forma, o maior raio se encontra no planeta Kepler-71b, visto que ele gera uma curva de luz de trânsito mais profunda, como também observado no planeta Kepler-45b.

Em contrapartida, a forma da curva do trânsito gerado por Kepler-96b e Kepler-63b indica um maior ângulo de inclinação das órbitas dos planetas. Também a duração mais curta do trânsito que é causada pelo maior valor do semieixo orbital quando comparados às dos outros planetas.

Manchas na superfície da estrela podem alterar a curva de luz de uma estrela, diminuindo a profundidade ou duração do trânsito. Esses efeitos podem interferir na determinação correta de parâmetros físicos e orbitais do planeta. Por exemplo, a presença de mais de uma mancha dentro da faixa de latitude ocultada pelo planeta resulta em um trânsito mais raso, como exemplificado na Figura 26 (o que subestima a determinação do raio planetário). Outro efeito causado por manchas é o da diminuição da duração do trânsito quando as manchas estão presentes próximas ao limbo da estrela, o que fornece um valor maior para o raio orbital planetário.

Outrossim, é importante ressaltar os conhecimentos adquiridos acerca da programação e desenvolvimento de páginas web, proposta que é cumprida graças à programação do site que possui como principal objetivo a divulgação de conteúdos acerca

de exoplanetas de maneira mais acessível para usuários da área ou aqueles que estão interessados em estudar. O site roda de maneira também otimizada, possuindo ambiente claro e autoexplicativo para melhorar a experiência do usuário. É importante ressaltar que ainda não foi programado para versão mobile.

6. REFERÊNCIAS

- about Tess.* (s.d.). Fonte: nasa: <https://www.nasa.gov/content/about-tess>
- Catálogo.* (s.d.). Fonte: Exoplanet.eu: <http://exoplanet.eu/catalog/>
- Cavalcanti, T. (s.d.). *Python- PyDoc e Documentação.* Fonte: Codigo Fluente: <https://www.codigofluente.com.br/aula-12-python-pydoc-documentacao/>
- Kepler-overview.* (s.d.). Fonte: Nasa.gov: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html
- Metodos para a detecção de exoplanetas.* (s.d.). Fonte: LucaEduca: <https://lucaeducar.com.br/2017/04/26/box-2-metodos-para-deteccao-de-exoplanetas/>
- Nasa images Tess.* (s.d.). Fonte: Nasa: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/tess-mit_image.jpg
- Nasa kepler.* (s.d.). Fonte: Nasa.gov: <https://www.nasa.gov/kepler/presskit>
- O que são manchas solares?* (s.d.). Fonte: EBC: <https://www.ebc.com.br/infantil/voce-sabia/2014/10/o-que-sao-manchas-solares>
- Perryman, M. (2011). *The Exoplanet Handbook 1.Edition.* Cambridge University Press.
- Raissa R., Valio A. Superflare Ultraviolet Impact on Kepler-96 System: A Glimpse of Habitability When the Ozone Layer First Formed on Earth. *Astrobiology*, 18, N11, 2018.
- Silva-Valio, A. Lanza, A.F., Alonso, R., Barge, P. Properties of starspots on CoRoT-2. *Astronomy and Astrophysics*, **520**, A25, 2010
- Silva-Valio, Estrela R., Netto Y., Bravo J. P., Medeiros J. R. Activity and Rotation of Kepler-17. *The Astrophysical Journal*, **825**, 294, 2017.
- Tess.* (s.d.). Fonte: Exoplanets- NASA: <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>
- Valio, A. Starspots properties and stellar activity from planetary transits. *Proceedings IAU Symposium*, **328**, 69, 2017.
- Neto Y., Valio A. Stellar Magnetic Activity and "Butterfly Diagram" of Kepler-63. *Astronomy & Astrophysics manuscript*, 2020.
- Zaleski, S. M., Valio, A., Marsden, S. C., Carter, B. D. Differential Rotation of Kepler-71 via transit photometry mapping of faculae and starspots. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **484**, 618, 2019.
- Zaleski, S. M., Valio, A., Carter, B. D., Marsden, S. C. Activity and Differential Rotation of the early M Dwarf Kepler-45 from Transit Mapping. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **492**, 4151, 2020.

Contatos: biadueque7@hotmail.com/ avalio@craam.mackenzie.br.