

CARACTERIZAÇÃO DE ESTRELAS: PERÍODO DE ROTAÇÃO

Geovanne Petillo de Castro Boscatti (IC), Adriana Benetti Marques Valio (Orientador) e
Jhon Yana Galarza (Coorientador)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

A massa, a idade e a temperatura de uma estrela são importantes parâmetros para a compreensão de sua evolução. Uma forma de estimar a idade da estrela é a partir do seu período de rotação. Neste trabalho, com a utilização do código em Python, Kanchay, estimamos o período de rotação de 66 estrelas observadas pelos telescópios espaciais TESS e Gaia. O período de rotação foi estimado a partir da análise de curvas de luz observadas por TESS pelo método de Lomb-Scargle. Método que ao ser comparado com os de Minimização da Dispersão da Fase (PDM) e Função de Autocorrelação da Fase (ACF) se mostrou mais preciso. As estrelas analisadas exibiram períodos de rotação entre 1 e 12 dias, com média de $5,1 \pm 2,6$ dias. Estes curtos períodos de rotação indicam que as estrelas são jovens, provavelmente com idades menores que 1 Gyr. Os resultados obtidos do período de rotação mostraram existir uma correlação com a massa da estrela, representada pelo índice de cor BP-RP medido pelo satélite Gaia, isto é, estrelas com maior índice de cor BP-RP apresentam períodos de rotação maiores. Estes resultados são coerentes com os obtidos anteriormente por outros autores. No futuro, pretendemos usar o período de rotação de uma estrela para estimar a sua idade.

Palavras-chave: Período de rotação. Lomb-Scargle. Idade da estrela.

ABSTRACT

The mass, age, and temperature of a star are important parameters for understanding its evolution. One way of estimating the age of the star is from its rotation period. In this work, using the Python code, Kanchay, we estimated the rotation period of 66 stars observed by the TESS and Gaia space telescopes. The rotation period was estimated from the analysis of light curves observed by TESS using the Lomb-Scargle method. This method, when compared with the Phase Dispersion Minimization (PDM) and Phase Autocorrelation Function (ACF) methods, proved to be more accurate. The analyzed stars exhibited rotation period between 1 and 12 days, with an average value of $5,1 \pm 2,6$ days. These short rotation periods indicate that the stars are young, probably with ages of less than 1 Gyr. The results obtained

for the rotation period showed a correlation with the stellar mass, represented by the BP-RP color index measured by the Gaia mission, that is, stars with larger color index BP-RP have longer rotation periods. These results are consistent with those obtained previously by other authors. In the future, we intend to use the rotation period of a star to estimate its age.

Keywords: Rotation period. Lomb-Scargle. Stellar age.

1. INTRODUÇÃO

A determinação de idades estelares em Astrofísica é muito importante, entretanto, esta medida tem se mostrado elusiva. Por exemplo, conhecer a idade do Sol nos permite estudar a evolução magnética e rotacional do Sol quando comparado com estrelas do tipo solar (p. ex., Lorenzo-Oliveira et al. 2018,2019)

Uns dos métodos mais precisos de estimativa de idade estelar é o método das isócronas (método indireto de medição). Este método calcula a probabilidade de qual seria a idade mais precisa para uma estrela, tendo conhecimento de seus parâmetros atmosféricos (temperatura efetiva, gravidade e metalicidade; ver Figura 1). Apesar de ser uma boa forma de medição da idade de estrelas, esse método funciona bem para aquelas estrelas parecidas com o Sol cujos parâmetros atmosféricos foram calculados de forma precisa. A incerteza típica nas medidas de idade encontra-se entre 1-4 Gano.

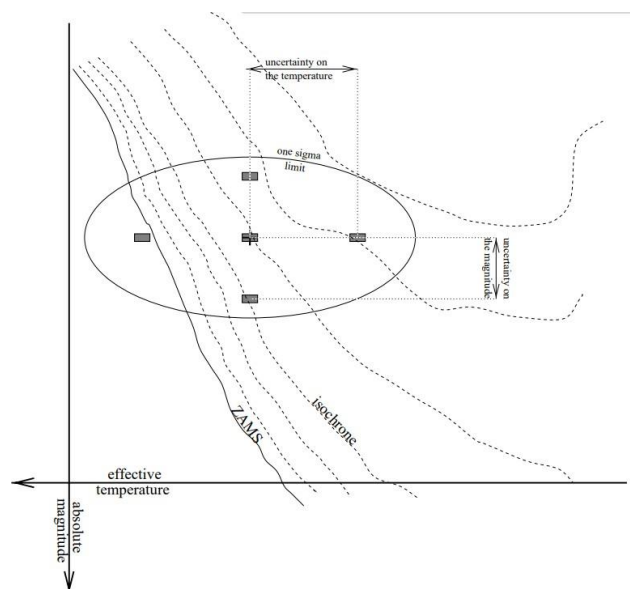


Figura 1: Diagrama HR (Hertzsprung-Russell) – magnitude absoluta vs temperatura efetiva. As linhas tracejadas são isócronas e representam os caminhos evolutivos das estrelas para determinados parâmetros atmosféricos e suas incertezas. A elipse representa 1σ dos erros observacionais dos parâmetros atmosféricos. Nota-se a assimetria da distribuição de isócronas ao redor da idade média (retângulo com uma cruz). Fonte: Lachaume, Dominik & Lan Habing et al. (1999).

Outro método utilizado é o da idade cromosférica. Neste, mede-se a atividade das estrelas pelo fluxo da linha de cálcio. Conforme a linha de cálcio é formada, ela pode chegar até a cromosfera e, portanto, quanto mais velha a estrela, maior a linha de cálcio (ver painel à esquerda da Figura 2). Por outro lado, quanto mais ativa a estrela, vemos mais claramente a emissão do fluxo dessa linha. Isto pode ser visto no painel à direita da Figura 2, onde o fluxo cromosférico (R_{HK}) diminui com a idade. Assim a idade de uma estrela pode ser estimada apenas calculando o fluxo da sua cromosfera. Não obstante, este método requer muitas observações e especial tratamento dos dados para subtrair a contribuição da fotosfera (Mamajek et al. 2008, Lorenzo-Oliveira et al. 2018).

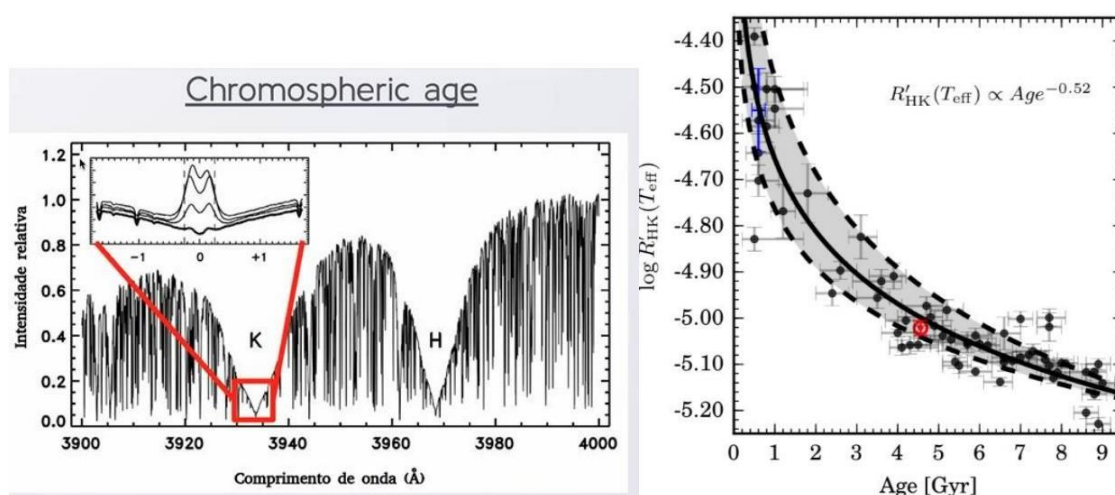


Figura 2: Painel à esquerda: Fluxo da linha de Cálcio (K). Imagem tirada e modificada de National Solar Observatory. Painel à direita: Relação idade-atividade derivada usando estrelas do tipo solar. Fonte: Lorenzo-Oliveira et al. (2018).

Os aglomerados estelares têm sido utilizados amplamente para calibrar os diferentes métodos de determinação de idades. Por se tratar de um conjunto de estrelas formadas na mesma época, possuem idades iguais. Portanto, é possível estabelecer correlações entre idades, massas, e períodos de rotação de diferentes aglomerados estelares. Outro método de medição da idade da estrela, é a girocronologia, criado por Skumanich (Skumanich et al. 1972), usando apenas 3 aglomerados e o Sol (ver Figura 3), para estabelecer a correlação idade-rotação, amplamente conhecida como girocronologia. Anos mais tarde, outros trabalhos incluíram a massa como um parâmetro importante para calibrar a girocronologia. Não obstante, devido ao fato da girocronologia ter sido calibrada usando como base aglomerados jovens, além do Sol, o mesmo só se aplica às estrelas de idades próximas à do Sol, isto é, 4,6 bilhões de anos (ver Figura 3). A girocronologia é um método que não depende de modelos de evolução estelar para calcular idades. Precisa-se simplesmente medir a rotação e a massa (ou cor) de uma estrela e através de um ajuste (previamente

estabelecido no plano idade-rotação-massa), pode-se obter sua idade.

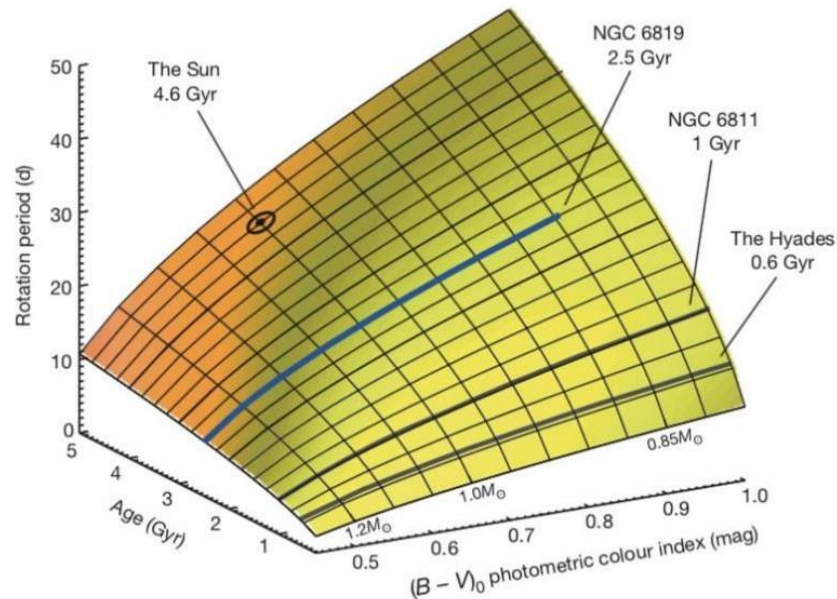


Figura 3: Correlação idade-período-massa para os aglomerados jovens abertos NGC 6819, NGC 6811 E Hyades. A massa da estrela é representada pelo índice de cor (B-V). O Sol está representado pelo seu símbolo padrão em preto. Imagem retirada de Meibom et al. (2015).

1.1 Justificativa

Como discutido anteriormente, existem diversos métodos para calcular as idades das estrelas, cada um deles tem suas próprias vantagens e desvantagens que comprometem a precisão da técnica. A estimativa de idades estelares é importante para estudos como a arqueologia Galáctica (do Inglês Galactic Archaeology), já que para reconstruir a história da nossa via Láctea precisamos conhecer com precisão suas estrelas. Além da idade, a cor e o período de rotação, queremos compreender ao desvio de cor “BP-RP” relacionada à essas estrelas. Portanto, este artigo se volta ao estudo do período de rotação e sua relação com fotometria do telescópio espacial Gaia (Gaia Collaboration et al. 2018).

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal determinar e relacionar o período de rotação e o índice de cor “BP-RP” de estrelas jovens. Para tanto, é necessário compreender o método de cálculo de rotação: Lomb-Scargle.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Toda estrela perde massa por um vento estelar contínuo, no caso do Sol é quase um milhão de toneladas por segundo. Ao perder partículas, há perda de momento angular e a rotação da estrela diminui conforme o tempo passa. Portanto, estrelas mais jovens rotacionam mais rápido com períodos de alguns dias enquanto uma estrela de meia idade como o Sol tem um período de rotação médio de 27 dias (25,4 dias em latitude 20° e mais de 30 dias nos polos, Howard et al. 1984). As estrelas utilizadas neste estudo apresentam período de rotação em média de ~5 dias. Nota-se que é quase impossível detetar rotação de estrelas velhas já que ainda estamos limitados pela precisão dos instrumentos atuais dos telescópios terrestres e espaciais.

A taxa de decaimento do período de rotação para estrelas da sequência principal de massa intermediária, foi quantificado pela primeira vez por Andrew Skumanich em 1972. Ele observou que o período de rotação, a abundância de lítio e o a atividade cromosférica decaíam com a raiz quadrada da idade. No entanto, mais tarde, em 1984, Noyes, observou que para estrelas mais massivas, o período de rotação diminui mais devagar. E, portanto, adicionou a massa como mais uma variável à relação período-atividade-idade.

Em 2007, o termo 'girocronologia', foi cunhado por Barnes, que propôs uma função para a relação entre período, cor e idade:

$$P = A^n \cdot a(B - V - c)^b \quad (1)$$

onde: P é o período de rotação em dias; A é a idade em Gano; B e V são magnitudes (que contêm informação da massa estelar); a , b , c e n são parâmetros adimensionais de ajuste. Como a proposta do projeto está relacionada ao índice de cor "BP-RP", a função foi reescrita para se adequar ao estudo feito durante o decorrer do projeto.

Em 2015, Angus e colaboradores usaram as medidas de período de rotação de 310 estrelas observadas pelo satélite espacial Kepler com idades asterossísmicas, 50 estrelas dos aglomerados de Hyades e Coma Berenices e 6 estrelas de campo (incluindo o Sol) com medidas precisas de idade para calibrar a relação de girocronologia para estrelas com idades de até 10 Gano.

Assim, sua calibração para os parâmetros livres da Eq. 1, $P = A^n \cdot a(B - V - c)^b$, resultou em:

$$a = 0,40^{+0,03}_{-0,05}; \quad n = 0,55^{+0,02}_{-0,09}; \quad b = 0,31^{+0,3}_{-0,02}; \quad c = 0,45.$$

Parâmetro	Barnes (2007)	Mamajek & Hillenbrand (2008)	Angus et al. (2015)
a	$0,7725 \pm 0,011$	$0,407 \pm 0,021$	$0,40^{+0,3}_{-0,05}$
b	$0,601 \pm 0,024$	$0,325 \pm 0,024$	$0,31^{+0,3}_{-0,02}$
c	0,4	$0,495 \pm 0,010$	0,45
n	$0,5189 \pm 0,0070$	$0,566 \pm 0,008$	$0,55^{+0,02}_{-0,09}$

Tabela 1: Valores encontrados para os parâmetros a, b, c e n. Fonte: Angus et al. (2015).

A Tabela 1 mostra o resultado das calibrações realizadas por Barnes (2007), Mamajek & Hidebrand (2008), e Angus et al. (2015). Note que cada autor encontra parâmetros diferentes de ajuste. Na Figura 4 são mostradas as 3 calibrações, mas agora comparando-as com estrelas do campo da missão espacial Kepler.

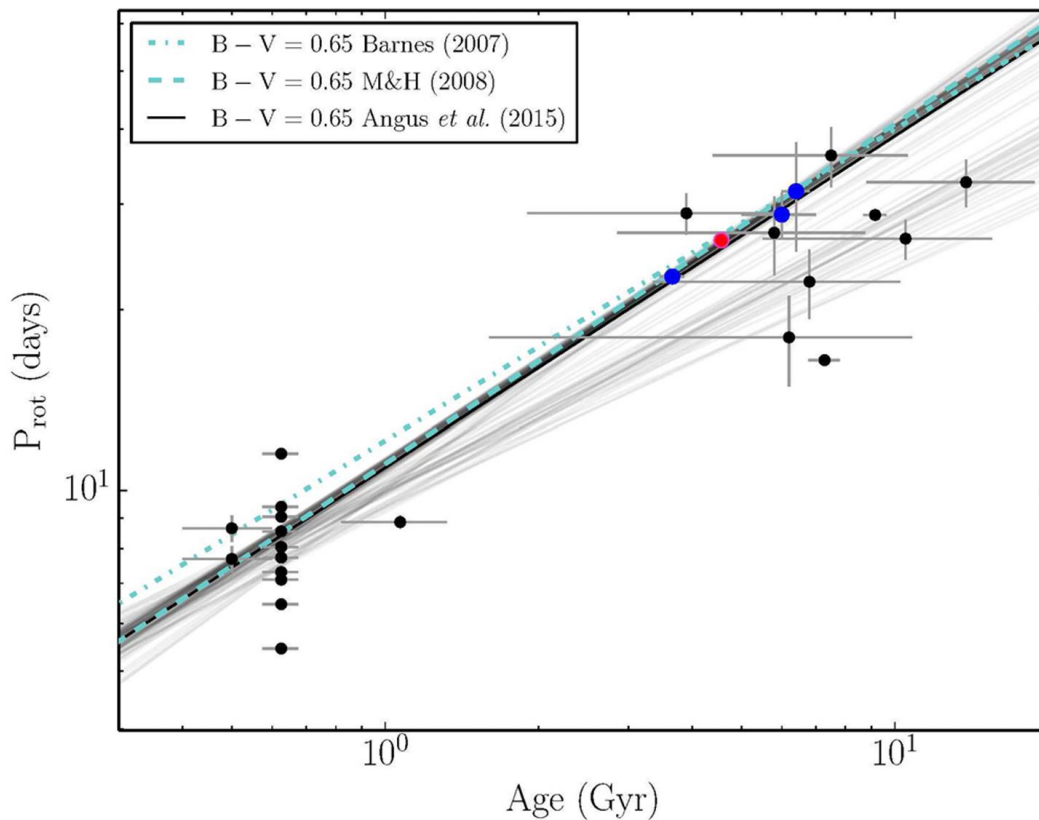


Figura 4: Período de rotação fotométrico (em dias) versus a idade (em Gyr). O círculo vermelho é o Sol, os círculos azuis são as estrelas α Centauri A, 18 Sco e 16 Cyg B; enquanto os círculos pretos da esquerda e da direita representam os aglomerados estelares e as estrelas de Kepler, respectivamente. As linhas cinzas representam os ajustes dos parâmetros livres da Equação (1). Os melhores ajustes são dados pelas linhas verde-claras, porém estes ajustes não conseguem descrever as estrelas de Kepler. Imagem retirada de Angus et al. (2015).

3. METODOLOGIA

A nossa amostra de estrelas de tipo solar foi criada usando os precisos sistemas fotométricos de Gaia, 2MASS e TESS. A metodologia consistiu em três passos fundamentais: i) estabelecer limites em cores que representem estrelas de tiposolar, ii) aplicar estes limites ao catálogo Gaia EDR3 e iii) selecionar estrelas que estejam dentro do campo de observação contínua do TESS (CVZ), ou seja estrelas com mais de 90 dias de observação contínua. Os limites em cores foram adotados de Yana Galarza et al. (2021), os quais foram estabelecidos a partir das cores nos sistemas Gaia EDR3, 2MASS, e Tycho de estrelas conhecidas do tipo solar (ver Tabela 2). Estes cortes em cores foram aplicados ao catálogo de Gaia EDR3. Por outro lado, o telescópio espacial TESS possui 4 câmeras, com uma delas apontando o polo galáctico, de modo a realizar observações contínuas desta região. Este campo localiza-se em latitudes galácticas $>+78$ graus e <-78 graus nos hemisférios norte e sul, respectivamente (CVZ). Encontramos 1.700 estrelas da nossa amostra inicial dentro deste campo CVZ.

Gaia absolute magnitude and colour constraints

$$\begin{aligned}
 3.755 &\leq M_G \leq 5.331 \\
 0.254 &\leq G_{BP} - G \leq 0.377 \\
 0.455 &\leq G - G_{RP} \leq 0.589 \\
 0.761 &\leq G_{BP} - G_{RP} \leq 0.907 \\
 0.960 &\leq G - J \leq 1.315 \\
 1.207 &\leq G - H \leq 1.708 \\
 1.284 &\leq G - K_S \leq 1.791 \\
 0.166 &\leq J - H \leq 0.506 \\
 0.281 &\leq J - K_S \leq 0.550 \\
 -0.002 &\leq H - K_S \leq 0.180 \\
 0.473 &\leq B_T - V_{TG} \leq 0.947
 \end{aligned}$$

Tabela 2: Limites superiores e inferiores de cores estabelecidos usando dados fotométricos de Gaia EDR3, Tycho e 2MASS, que foram usados para a nossa seleção da amostra. Fonte: Yana Galarza et al. (2021).

No painel à esquerda da Figura 5 é mostrada a distribuição da nossa amostra final no campo CVZ do TESS (círculos roxos) no sistema galáctico de coordenadas. Já no painel à direita, tem-se o diagrama Hertzsprung Russell Gaia com a nossa amostra (círculos

vermelhos) perfeitamente localizada na sequência principal, o que confirma que as estrelas são de tipo solar e que a nossa técnica de seleção é precisa. O mapa de cores representa as estrelas do Gaia DR3 que foram plotadas unicamente para ressaltar o diagrama HR.

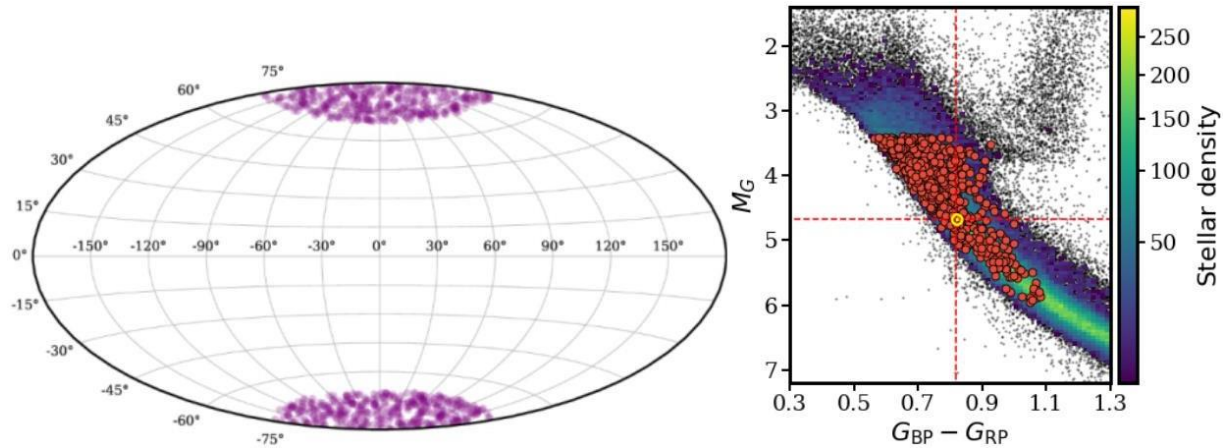


Figura 5: Painel à esquerda: Distribuição da nossa amostra (círculos roxos) no CVZ do TESS com observações mais longas que 200 dias. Painel à direita: Diagrama HR usando fotometria Gaia EDR3. A nossa amostra está representada em vermelho, enquanto o Sol é plotado em cor amarelo usando o símbolo solar padrão.

Desde o lançamento do telescópio espacial TESS, em 2018, e graças ao seu grande campo de observação (24×96 graus²), mais de 200.000 curvas de luz de estrelas, similares ao Sol, foram obtidas. Os dados do TESS incluem aqueles que estão dentro do campo de observação contínua (CVZ), com cadência de 60 e 2 minutos. Todas estas características do TESS facilitam enormemente o estudo detalhado e a caracterização de manchas estelares, criando assim uma oportunidade única e sem precedentes para comunidade científica.

Como mencionado anteriormente, estamos interessados em medir rotação usando as curvas de luz de TESS. Para isto, utilizaremos o código Kanchay (<https://github.com/ramstojh/kanchay>, Yana Galarza et al. 2022) para baixar as curvas de luz reduzidas pela pipeline da própria NASA. O código procura a curva de luz de uma estrela, baseada no seu nome ou coordenadas, na base de dados do TESS e faz o download dos dados dependendo da quantidade de sectores onde foi observada.

Como exemplo, a variação no brilho da estrela Gaia DR2 1620024491110370688 é mostrada na Figura 6. Esta variação ocorre pela presença de manchas na superfície da estrela, as manchas são regiões de menor temperatura e, portanto, menor brilho que a fotosfera ao redor. Conforme o telescópio registra a curva de luz, a rotação da estrela revela mais ou menos manchas no disco visível da estrela, gerando o aumento e a diminuição

periódicos do brilho. Quanto mais manchas a estrela apresentar, maior será a amplitude de variação do brilho da estrela.

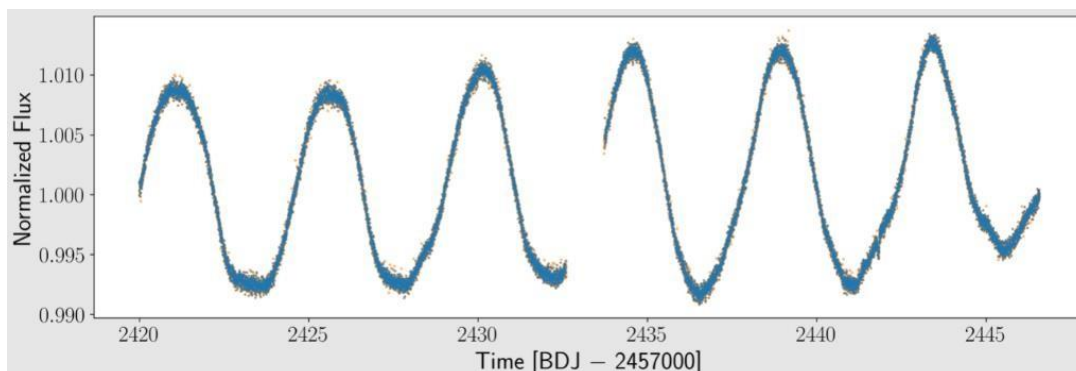


Figura 6: Curva de luz de TESS normalizada de um sector de 27 dias da estrela Gaia DR2 1620024491110370688.

O código Kanchay não apenas baixa curvas de luz, senão também mede períodos de rotação através do método denominado de periodograma de Lomb-Scargle (VanderPlas, 2018). Esse método consiste em ajustar uma única senóide à curva de luz e retorna a amplitude quadrada da senóide em uma faixa de frequência (1/período). A Figura 7 mostra o período de rotação da estrela Gaia DR2 1620024491110370688, calculado pelos métodos de Lomb-Scargle (LS), Função de Auto Correlação (ACF, 'auto correlation function') e Minimização da dispersão da Fase (PDM, 'phase dispersion minimization'). Com exceção do método ACF que apresenta período de rotação como sendo de 4,42 dias, os métodos PDM e LS apresentam o período de rotação como sendo de 4,43 dias.

Como se observa, na Figura 7, existem 3 painéis, no painel superior, pode-se notar a curva de luz normalizada em 10 setores, perfazendo mais de 200 dias de observação. Já no painel do meio, encontra-se o fluxo normalizado em fase de acordo com o período de rotação calculado, para cada método diferente de cálculo do período de rotação. O primeiro fluxo, de cor preta, representa o resultado para o LS, e como a curva é mais próxima de uma única senóide, mais preciso e confiável é o método. O segundo fluxo, de cor azul, é o obtido por ACF, que de acordo com a imagem, representa um menor nível de precisão, o que justifica a diferença nos valores encontrados para o período de rotação por cada método. Enquanto o terceiro fluxo, de cor laranja, representa a fase do método PDM, que também apresenta bom nível de nitidez. Por fim, no terceiro painel está o espectro de potência para cada um dos métodos. O primeiro destes é chamado periodograma de Lomb-Scargle, onde o pico máximo no periodograma indica o período mais provável de rotação da estrela. Nota-se que é preferível que o periodograma esteja com a menor quantidade possível de picos, uma vez que

muitos picos implicam vários valores possíveis para o período de rotação, o que pode sugerir alta rotação diferencial da estrela.

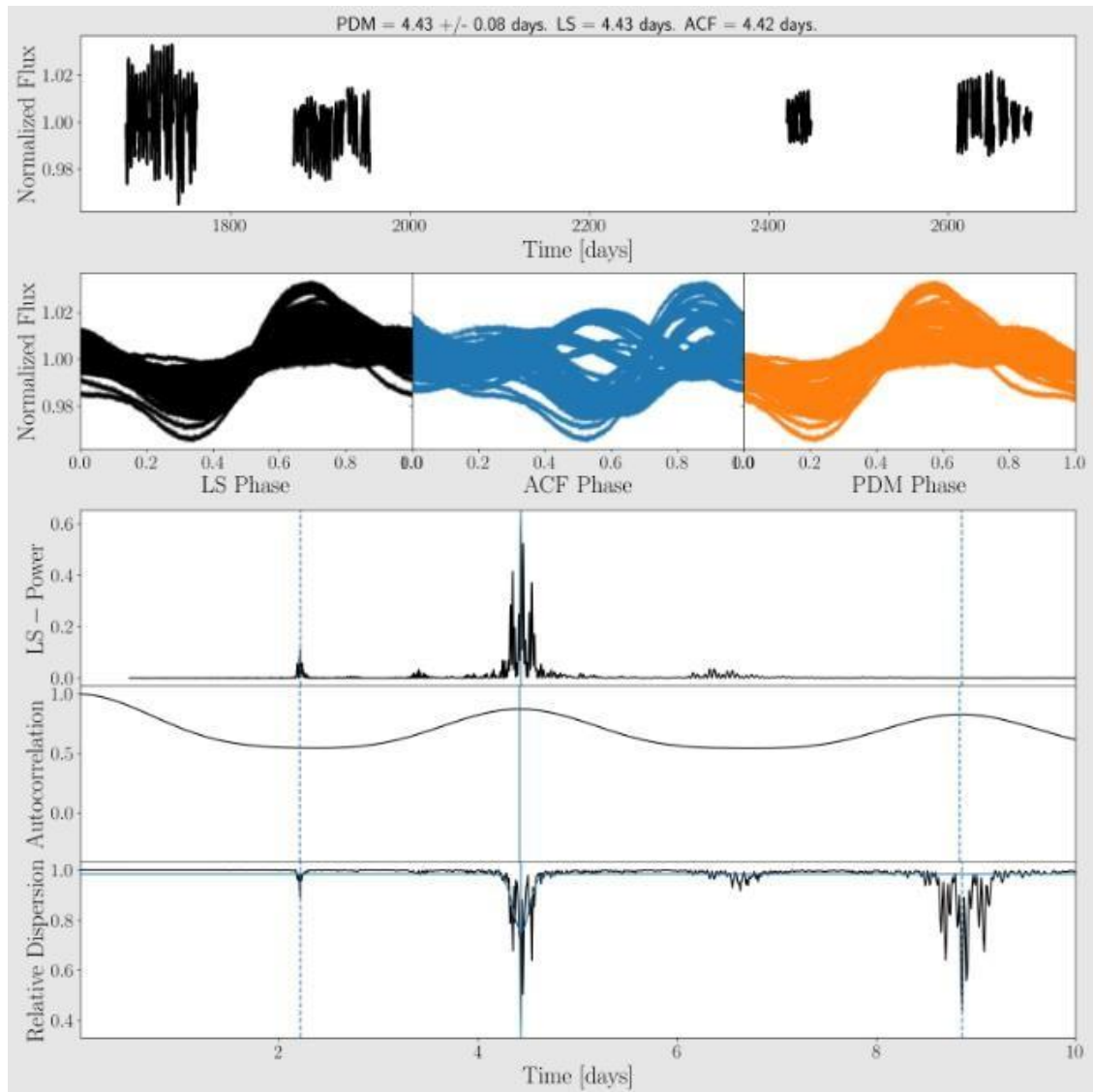


Figura 7: Resultado do programa Kanchay para a estrela Gaia DR2 1620024491110370688. Painel superior: curva de luz observada pelo TESS. Painel do meio: fluxo normalizado “dobrado” em fase para os três métodos de cálculo do período de rotação (LS, ACF e PDM). Painel inferior: espectro de potência dos três métodos. O periodograma do LS mostra um pico máximo em torno de 4 dias, que seria o valor do período de rotação desta estrela.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Da amostra inicial, selecionamos 66 estrelas, listadas na Tabela 3, onde foram calculados os períodos de rotação utilizando-se o método de LS pelo código Kanchay.

NOME	PROT	INCERTEZA	BP-RP
Gaia DR2 5494935911023714944	3.58	0.01	0,82
Gaia DR2 5481848424118748672	3.05	0.03	0,78
Gaia DR2 5290220108795476352	0.8	0.002	0,50
Gaia DR2 4675079258977257856	3.68	0.03	0,83
Gaia DR2 5495477901536694528	2.74	0.15	0,77
Gaia DR2 5492410573334813184	1.6	0.03	0,65
Gaia DR2 5296630639541459072	2.27	0.05	0,74
Gaia DR2 5495913475643283328	4.68	0.04	0,77
Gaia DR2 5496317756622132224	2.15	0.005	0,52
Gaia DR2 4651830875919909888	3.51	0.01	0,71
Gaia DR2 5549154581736192128	3.00	0.03	0,78
Gaia DR2 5483974531712287616	2.64	0.07	0,65
Gaia DR2 4655118995469538816	3.92	0.08	0,65
Gaia DR2 5497227155817447936	6.08	0.05	0,76
Gaia DR2 5497625969300443776	1.83	0.03	0,67
Gaia DR2 4652787725885892736	3.57	0.04	0,67
Gaia DR2 4678834911522818688	7.87	0.81	0,93
Gaia DR2 5261756398448173696	5.32	0.29	0,70
Gaia DR2 5550560199976839808	5.23	1.41	0,59
Gaia DR2 4655548015491953536	2.34	0.21	0,60
Gaia DR2 5493272070756241408	5.92	0.12	0,95
Gaia DR2 5292834403845151488	3.64	0.14	0,79
Gaia DR2 5490275837148786688	7.16	0.97	0,88
Gaia DR2 5550827385599076480	1.53	0.05	0,65
Gaia DR2 5550670945709822720	2.38	1.67	0,66
Gaia DR2 4664594895913099136	2.73	0.54	0,58
Gaia DR2 5497866143871835264	3.50	1.05	0,70
Gaia DR2 5498068076053997824	6.28	0.05	0,68
Gaia DR2 5293077052317089536	8.23	0.27	0,75
Gaia DR2 5293021904937198720	2.95	0.01	0,70
Gaia DR2 5485176813318017408	7.93	0.12	0,72
Gaia DR2 4680498476912115712	7.21	0.14	0,83
Gaia DR2 5262385765776077056	4.54	0.26	0,69

Tabela 3: Estrelas da amostra GAIA, seu período de rotação (PROT) e sua incerteza (em dias), e o índice de cor (BP-RP) (continua).

NOME	PROT	INCERTEZA	BP-RP
Gaia DR2 5262401743054129280	10.58	0.1	0.86
Gaia DR2 4661958168286561024	6.04	0.3	0.83
Gaia DR2 4657094753499163264	10.11	1.04	1.10
Gaia DR2 4657977764458434688	7.85	0.09	0.92
Gaia DR2 5293718235098265088	11.29	1.22	0.93
Gaia DR2 5551396928324901120	8.34	0.43	0.60
Gaia DR2 4665060577744420096	10.99	0.15	1.01
Gaia DR2 4664985604795813632	2.08	0.98	0.56
Gaia DR2 4660329688499321856	4.57	0.24	0.73
Gaia DR2 5502987634674874368	6.02	0.22	0.75
Gaia DR2 5294069567720883968	6.14	0.25	0.97
Gaia DR2 5498885906546999424	1.82	0.01	0.74
Gaia DR2 5513602590510617728	4.58	0.09	0.80
Gaia DR2 5552024478883929856	9.11	0.5	1.08
Gaia DR2 4682151077248467456	2.62	0.01	0.86
Gaia DR2 4682422205647644672	8.35	0.27	1.06
Gaia DR2 5503646860615230080	2.89	0.02	0.59
Gaia DR2 4683453410115062784	5.69	0.14	0.79
Gaia DR2 2250421855034723584	5.34	0.13	0.74
Gaia DR2 1364432327355469184	7.7	0.43	0.75
Gaia DR2 1656746461491386496	8.41	0.19	0.83
Gaia DR2 2297863853331918848	7.48	0.69	0.85
Gaia DR2 2136414937462373888	2.94	0.05	0.79
Gaia DR2 1620024491110370688	4.43	0.08	0.85
Gaia DR2 2274943403875614976	6.54	0.22	0.94
Gaia DR2 2297925533359051008	10.81	1.12	0.92
Gaia DR2 2298056478320933632	2.12	0.11	0.66
Gaia DR2 2298135638861983104	4.84	0.13	0.84
Gaia DR2 2250949895494271232	8.91	0.33	0.96
Gaia DR2 2196810630136770432	3.72	0.09	0.83
Gaia DR2 1598212894833898496	2.41	0.02	0.63
Gaia DR2 1598641188973481856	5.89	0.25	0.73
Gaia DR2 1721027553384165248	8.15	0.46	0.99

Tabela 3: Continuação dos resultados das estrelas GAIA.

A distribuição dos períodos de rotação das estrelas é mostrada na Figura 8, onde pode-se notar que os períodos variam de 0,8 a 11,3 dias. O valor médio dos períodos de rotação encontrados é $5,2 \pm 2,7$ dias.

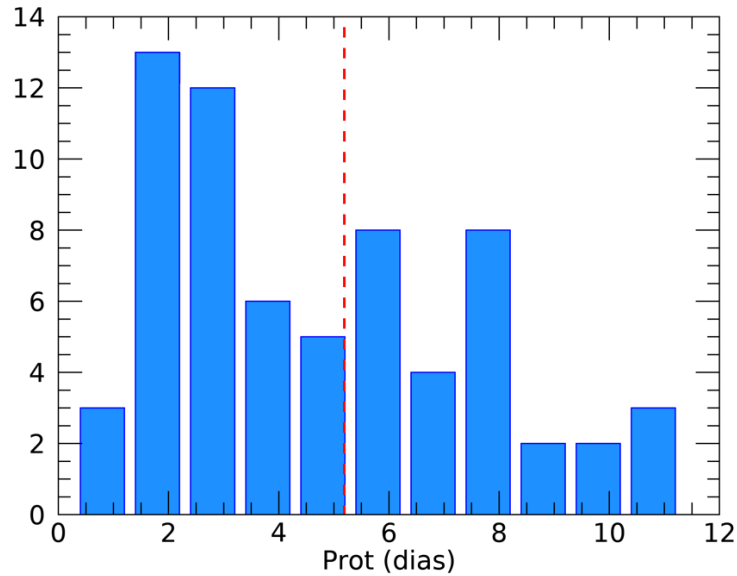


Figura 8: Distribuição dos períodos de rotação das estrelas analisadas. A linha vertical em vermelho tracejada indica o período médio encontrado de 5,2 dias.

A seguir buscamos a correlação dos períodos de rotação calculados com o índice de cor BP-RP medidos pelo satélite Gaia. Os resultados das 66 estrelas são mostrados no gráfico da Figura 9 e com BP-RP em escala logarítmica na Figura 10. Entretanto, como se trata de uma nova amostra, as estrelas não possuem dados espectroscópicos para cálculo de suas idades. Por se tratar de estrelas jovens com períodos de rotação menor que 13 dias, muito provavelmente a idade é menor que 1 Gano (Barnes 2007). Portanto, na Equação 1, foi considerado $A = 1$ (Gano) e $c = 0$, e a equação ajustada foi:

$$P = a(BP - RP)^b \quad (2)$$

onde os valores das constantes foram: $a = 8,3 \pm 1,1$ e $b = 2,3 \pm 0,3$. A linha tracejada vermelha nas Figuras 9 e 10 representa o melhor ajuste dos dados pela Equação 2.

Como pode-se notar das Figuras 9 e 10, o período de rotação das estrelas aumenta com o índice de cor, apresentando uma correlação positiva. Esta mesma tendência foi observada anteriormente por Barnes (2007), Mamajek & Hildbrand (2008), e Angus et al. (2015).

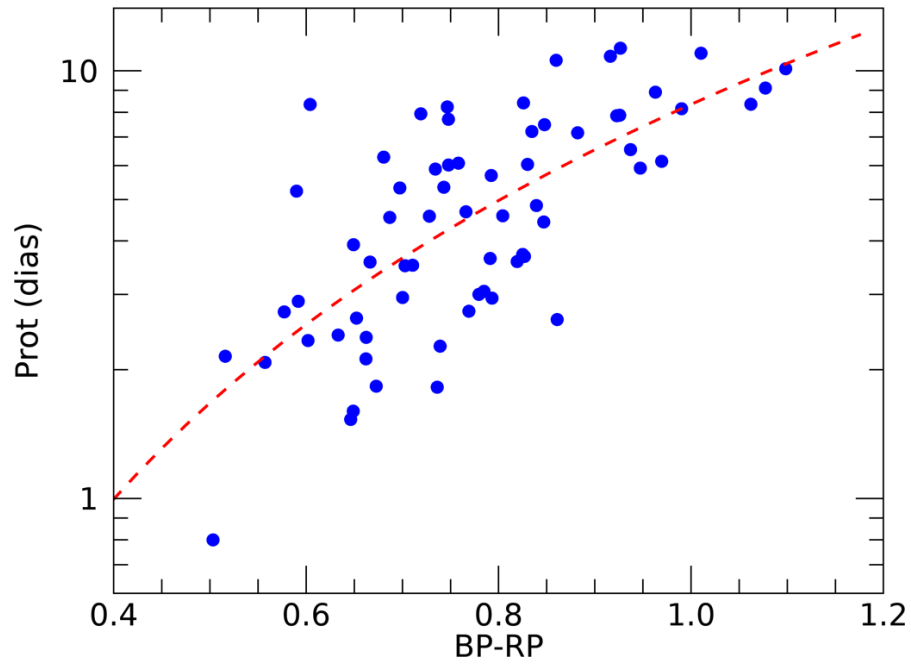


Figura 9: Gráfico de período de rotação versus índice de cor BP-RP. Os círculos azuis representam as estrelas coletadas e analisadas. O eixo Prot (dias) encontra-se em escala logarítmica.

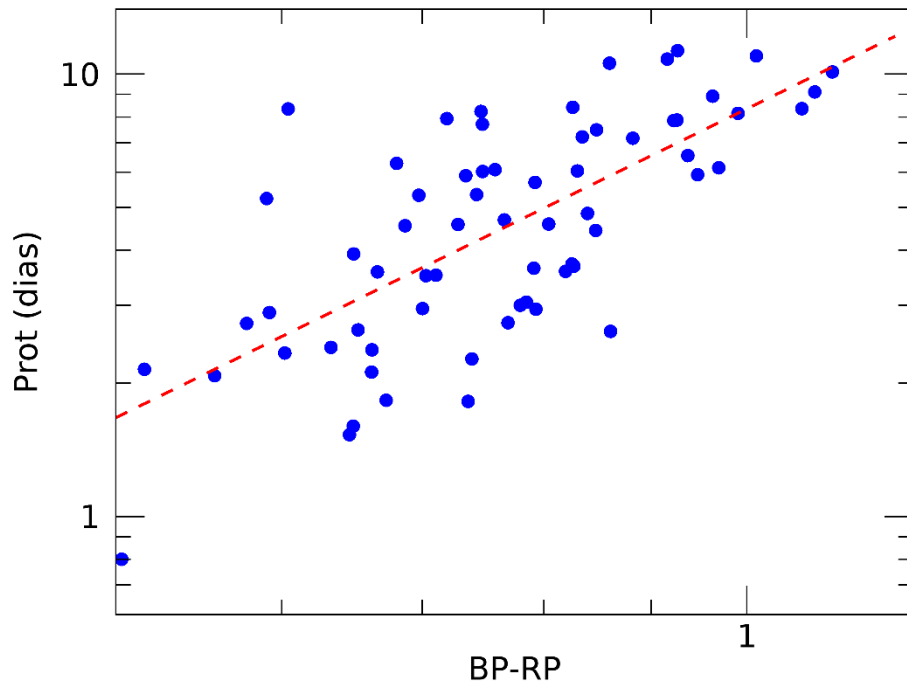


Figura 10: Gráfico de período de rotação versus índice de cor BP-RP em escala logarítmica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, determinamos o período de rotação de 66 estrelas parecidas com o Sol que foram observadas pelos satélites GAIA e TESS. A importância de se medir o período de rotação é que este pode ser usado como um indicador da idade destas estrelas. O período de rotação foi calculado a partir da variação periódica do brilho da estrela observada em sua curva de luz obtida pelo TESS. Dentre os diversos métodos existentes para o cálculo do período de rotação, foram escolhidos 3, PDM, ACF e LS. Os métodos de PDM e ACF, serviram apenas como forma de comparação com o de Lomb-Scargle (LS), pois este apresentou o maior nível de precisão. Uma vez estimado o período de rotação, comparamos com o índice de cor “BP-RP” medido pelo satélite GAIA. A diferença de cor BP-RP mede a temperatura efetiva de uma estrela e, portanto, é um indicador da massa da estrela. Na amostra de estrelas estudadas, todas são jovens (idades menores que 1 Gano), já que o telescópio espacial TESS só captura períodos de rotação menores a 13 dias, o que impossibilita o estudo de estrelas velhas.

O cálculo do período de rotação foi feito usando-se o código Kanchay, desenvolvido em linguagem Python. Utilizando-se este código, foi possível gerar curvas de luz para as estrelas selecionadas para os setores do TESS, e então a partir destas calcular o período de rotação. O resultado final do período de rotação em função do índice de cor BP-RP é mostrado nas Figuras 9 e 10.

Como pode-se ver no gráfico de P_{rot} x BP-RP, as estrelas seguem um padrão em que o período de rotação aumenta para maiores valores do índice de cor. Estes dados foram ajustados pela Eq. 2. O ajuste é mostrado pela curva tracejada em vermelho nas Figuras 9 e 10. A tendência encontrada foi a mesma reportada anteriormente por outros autores.

Mesmo após todos os dados que foram obtidos e analisados é possível afirmar que este foi um trabalho inicial, pois ficamos limitados pelas observações do TESS que fornecem apenas estrelas com períodos de rotação menores de 13 dias. Futuramente, será interessante utilizar dados do satélite PLATO, que nos fornecerá novos dados para complementar o estudo feito sobre a relação período de rotação e o índice de cor “BP-RP”, ou massa da estrela.

6. REFERÊNCIAS

- Angus, R., Aigrain, S., Foreman-Mackey, D., e McQuillan, A. "Calibrating gyrochronology using Kepler asteroseismic targets". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450, 1787, 2015.
- Barnes, S. A. "Ages for Illustrative Field Stars Using Gyrochronology: Viability, Limitations, and Errors". *Astrophysical Journal*, 669, 1167, 2007.
- Gaia Collaboration, Brown, A.G.A et al. "Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties". *Astronomy & Astrophysics*, 616, A1, 2018.
- Helmi A. "Streams, Substructures, and the Early History of the Milky Way". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58, 205, 2020.
- Howard, R., Gilman, P. I. and Gilman, P. A. "Rotation of the sun measured from Mount Wilson white-light images". *Astrophysical Journal*, 283, 373, 1984.
- Lachaume, R., Dominik, C., Lanz, T. Habing, H. J. et al. "Age determinations of mainsequence stars: combining different methods". *A&A*, 348, 897, 1999.
- Lorenzo-Oliveira, D., Freitas, F. C., Meléndez, J. et al. "The Solar Twin Planet Search. The age-chromospheric activity relation". *Astronomy & Astrophysics*, 619,A73, 2018.
- Lorenzo-Oliveira, D., Meléndez, J., Yana Galarza, J. et al. "Constraining the evolution of stellar rotation using solar twins". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485, L68, 2019.
- Mamajek, E. E. and Hillenbrand, L. A. "Improved Age Estimation for Solar-Type Dwarfs Using Activity-Rotation Diagnostics". *ApJ*, 687, 1264, 2008.
- Meibom, S., Barnes, S. A., Platais, I. et al. "A spin-down clock for cool stars from observations of a 2.5-billion-year-old cluster". *Nature*, 517, 589, 2015.
- VanderPlas, J.T. "Understanding the Lomb-Scargle Periodogram". *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236, 16, 2018.

7. Apêndice

A seguir apresentamos o código Python utilizado neste trabalho para plotar as Figuras 9 e 10.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.gridspec as
gridspecfrom scipy import odr

#reading data
data = pd.read_csv('grafico1.csv')
data = data.dropna(subset=['prot']) #drop nan values in the prot
columndata

#set parameters
x =
data['bp_rp'].values
data['prot'].values
xerr = [0.1]*len(data) #Assuming an uncertainty of 0.1 for BP-
RPyerr = data['err_prot'].values

#model to fit
datadef model(p,
x):
a, b = p
y = a*x**(b)
return y

# Model object
power_model = odr.Model(model)

# Create a RealData object
data_m = odr.RealData(x, y, sx=xerr, sy=yerr)

# Set up ODR with the model and data.
odr = odr.ODR(data_m, power_model, beta0=[0., 0.])

# Run the
regression.out =
odr.run()

#print fit parameters and 1-sigma
estimatespopt = out.beta
perr = out.sd_beta
print('fit parameter 1-sigma error')
print('-----')
```

```

for i in range(len(popt)):
    print(str(popt[i])+' +- '+str(perr[i]))

#preparing model
x_fit = np.linspace(0.45, 1.2, 1000)
fit     = model(popt, x_fit)

#log plot

fig = plt.figure(figsize=(6,4))
gs = gridspec.GridSpec(1, 1)#, height_ratios=[5, 1.5])

ax0 = plt.subplot(gs[0])

ax0.scatter(x, y, c='#3498DB', marker='o', s=53, alpha=0.7,
            linewidths=0.6,
            edgecolors='black', zorder=4, label='Sun-like stars')

#model
ax0.plot(x_fit, fit, linestyle='--', linewidth=2, color='red')

#set log scale for y
ax0.set_yscale('log')
yticks = [1, 4, 7, 10,
13]ax0.set_yticks(yticks)
ax0.set_yticklabels(["{0:g}".format(i) for i in yticks])

plt.ylabel('Prot', color='black', size=16)
plt.xlabel('BP-RP', color='black',
size=16)plt.tight_layout()
ax0.set_xlim(0.45, 1.15)
ax0.set_ylim(0, 20)

plt.savefig('log_plot.png', dpi=200)

#log-log plot
fig = plt.figure(figsize=(6,4))
gs = gridspec.GridSpec(1, 1)#, height_ratios=[5, 1.5])

ax0 = plt.subplot(gs[0])
#nst
ax0.scatter(x, y, c='#3498DB', marker='o', s=53, alpha=0.7,
            linewidths=0.6,
            edgecolors='black', zorder=4, label='Sun-like stars')

#model
ax0.plot(x_fit, fit, linestyle='--
', linewidth=2, color='red', zorder=3)
ax0.set_yscale('log'

```

```
)  
ax0.set_xscale('log'  
)  
  
#setticks  
yticks = [1, 4, 7, 10,  
13]ax0.set_yticks(yticks)  
ax0.set_yticklabels(["{0:g}".format(i) for i in  
yticks])xticks = [0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1]  
ax0.set_xticks(xticks)  
ax0.set_xticklabels(["{0:g}".format(i) for i in  
xticks])  
  
plt.ylabel('Prot', color='black', size=16)  
plt.xlabel('BP-RP', color='black',  
size=16)plt.tight_layout()  
ax0.set_xlim(0.45, 1.15)  
ax0.set_ylim(0, 20)  
  
plt.savefig('log_log_plot.png', dpi=200)
```

Contatos:

Geovanne Petillo de Castro Boscatti (geovanne.boscatti@mackenzista.com.br), Adriana Benetti Marques Valio (avalio@craam.mackenzie.br) e Jhon Yana Galarza (ramstojh@gmail.com)