Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Ana Carolina Albernaz Sirico

Caracterização de exoplanetas a partir de trânsitos e velocidades radiais

São Paulo
2016

Ana Carolina Albernaz Sirico

Caracterização de exoplanetas a partir de trânsitos e velocidades radiais

Monografia apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Área de Concentração: Exoplanetas
Orientador(as): Prof.ª Dr.ª Jane Cristina Gregorio-Hetem e Prof.ª Dr.ª Tatiana Alexandrovna Mitchtchenko

São Paulo

2016

Para Tinê.

Agradecimentos

Às minhas orientadoras Prof.ª Dr.ª Jane Cristina Gregorio-Hetem e Prof.ª Dr.ª Tatiana Alexandrovna Mitchtchenko pela oportunidade de trabalho e apoio pleno.

Ao Dr. Tobias Cornelius Hinse pela alegria e interesse em meu aprendizado e pela amizade acima de tudo em um país diferente e distante.

Ao Dr. Marcos T. dos Santos pela contribuição na análise e disponibilidade em ajudar.

Ao Prof. Laerte Sodré Jr. que foi quem me introduziu em pesquisa científica, pela confiança e simplicidade sempre.

À Seoul National University (SNU) e Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI), instituições de ensino e pesquisa que me deram a oportunidade de abranger meus conhecimentos.

Ao INCT-A e CNPq, pelo financeamento da pesquisa.

Às colegas e amigas Neiva M. de Carvalho Fernandes e Jacy Ellen G. Silva pela amizade e suporte incondicionais.

E, aos meus pais, meus irmãos e minha tia-avó Tinê pela afeição, companherismo e apoio financeiro.

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"Não te deixes destruir...
Ajuntando novas pedras
e construindo novos poemas.
Recria tua vida, sempre, sempre.
Remove pedras e planta roseiras e faz doces. Recomeça.
Faz de tua vida mesquinha
um poema.
E viverás no coração dos jovens
e na memória das gerações que hão de vir.
Esta fonte é para uso de todos os sedentos.
Toma a tua parte.
Vem a estas páginas
e não entraves seu uso
aos que têm sede."

Cora Coralina

Resumo

O grupo da missão CoRoT recentemente liberou ao público observações fotométricas de mais de 160 000 estrelas observadas no canal dedicado à busca de exoplanetas. Visando o uso destes dados em pesquisas futuras, principalmente estatística, realizamos a análise de dois objetos da missão, os planetas CoRoT-6b e CoRoT-20b a partir de suas observações fotométricas e de velocidades radiais.

A partir das análises desses dados, concluímos que CoRoT-6b, considerado um 'Júpiter quente' possui raio de 1.08 $\pm$ 0.62 R_{Jup}, massa de 2.74 $\pm$ 0.22 M_{Jup} e semi-eixo maior de 0.084 $\pm$ 0.002 UA. Sua órbita é praticamente esférica com excentricidade 0.076, típico dessa classe de planetas. E seu período orbital é de 8.88661 ± 0.00004 dias.

CoRoT-20b é um planeta gigante com massa de 3.80 $\pm$ 0.43 M_{Jup}. Seu período orbital é de 9.2432 $\pm$ 0.0008 dias e sua excentricidade é 0.647.

O ajuste das velocidades radiais foi feito a partir da dedução da perturbação do movimento radial da estrela em consequência da presença de um planeta. E o ajuste dos trânsitos foi realizado com o código JKTEBOP.

A partir desses ajustes, utilizamos o código SOUTHWORTH_PROPAG para calcular uma série de parâmetros absolutos mostrados em Southworth (2009), Southworth (2011) e Seager e Mallén-Ornelas (2003).

Embora nosso objetivo futuro seja o estudo estatístico de exoplanetas, mostramos neste trabalho que cada objeto detém particularidades e deve ser analisado individualmente.

Abstract

The CoRoT mission group recently released to the public photometric observations of more than 160 000 stars in the exoplanet channel. Aiming to use this data in future research, mainly statistical, we performed the analysis of two objects, CoRoT-6b and CoRoT-20b using their photometric observations and radial velocities.

From the analyzes of these data, we conclude that CoRoT-6b, considered a hot 'Jupiter', has a radius of 1.08 $\pm$ 0.62 R_{Jup}, mass of 2.74 $\pm$ 0.22 M_{Jup} and semi-major axis of 0.084 $\pm$ 0.002 AU. Its orbit is practically spherical with eccentricity of 0.076, typical of this class of planets. And its orbital period is 8.88661 ± 0.00004 days.

CoRoT-20b is a giant planet with mass of 3.80 $\pm$ 0.43 M_{Jup}. Its orbital period is 9.2432 $\pm$ 0.0008 days and its eccentricity is 0.647.

The radial velocities fitting was made from the deduction of the perturbation of the radial movement of the star in consequence of the presence of a planet. And the fitting of the transits was done with the code JKTEBOP.

From these fittings, we use the SOUTHWORTH_PROPAG code to calculate a series of absolute parameters shown in Southworth (2009), Southworth (2011) and Seager e Mallén-Ornelas (2003).

Although our future goal is the statistical study of exoplanets, we show in this work, that each object has particularities and should be analyzed solely.

Lista de Figuras

1.1 Distribuições de parâmetros físicos e orbitais de exoplanetas conhecidos. . . 20

2.1 Movimento senoidal de uma estrela devido à presença de um planeta em órbita ao seu redor. A imagem foi adaptada de Beaugé et al. (2007). 22

2.2 Esquema de uma órbita elíptica de um planeta. 23

2.3 Esquema de órbita elíptica de um planeta rotacionada, mostrando o plano de referência tangente à esfera celeste. 24

2.4 Simulações de curvas de velocidade radial mostrando a dependência de e e ω. 25

2.5 Dados de velocidade radial de CoRoT-6b com o espectrógrafo SOPHIE em função do tempo, curva ajustada com a Equação 2.8 e resíduos. 26

2.6 Dados de velocidade radial de CoRoT-20b em função do tempo, curva ajustada com a Equação 2.8 e resíduos. 27

2.7 Dados de velocidade radial de CoRoT-33b com os espectrógrafos HARPS (círculos) e FIES (quadrados) em função: (A) do tempo e (B) da fase orbital. 28

3.1 (A) Observações fotométricas de CoRoT-33b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS. 31

3.2 (A), (B) e (C) Observações (pontos pretos) e curvas ajustadas (linhas cheias), para o planeta CoRoT-33b, adotando-se a Equação 3.1 para os harmônicos n = 2 (verde), 3 (azul claro) e 4 (roxo). (D) DCDFT normalizada e (E) BLS para os harmônicos n = 2, 3 e 4, com as respectivas cores do ajuste. . 32

3.3 (A), (B) e (C) Observações (pontos pretos) e curvas ajustadas (linhas cheias), para CoRoT-33b, adotando-se a Equação 3.1 com o período fixo e janelas de 1 $P_{\rm rot}$. (D) DCDFT normalizada e (E) BLS. 33

3.4 (A) e (B) Periodogramas DCDFT e BLS relativos aos resíduos dos ajustes para janelas de 0.5 e 2 $P_{\rm rot}$ para CoRoT-33b. 34
3.5 Curvas de trânsito de CoRoT-33b, obtidas colocando os resíduos dos ajustes em função da fase correspondente a 5.82 dias. 35
3.6 (A) Observações fotométricas de CoRoT-6b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS. 36
3.7 (A) Observações fotométricas de CoRoT-20b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS. 36
3.8 Observações fotométricas em função da fase do CoRoT-6b e curva ajustada (em vermelho) pelo pelo código JKTEBOP. 38
3.9 Observações fotométricas em função da fase do CoRoT-20b e curva ajustada (em vermelho) pelo pelo código JKTEBOP. 38

4.1 Definição de parâmetros geométricos do trânsito. Imagem adaptada de Seager e Mallén-Ornelas (2003). 46

Lista de Tabelas

2.1 Conjuto de parâmetros orbitais de CoRoT-6b obtido com o ajuste da Equação 2.8 aos dados de velocidade radial. 27

2.2 Conjuto de parâmetros orbitais de CoRoT-20b obtido com o ajuste da Equação 2.8 aos dados de velocidade radial. 28

3.1 Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-6b obtidos com o código JKTEBOP a partir das observaçõs fotométricas do trânsito, e comparações com Fridlund et al. (2010). 39

3.2 Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-20b obtidos com o código JKTEBOP a partir das observações fotométricas do trânsito, e comparações com Deleuil et al. (2012). 39

4.1 Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-6b obtidos com o código SOUTHWORTH_PROPAG a partir das observaçõs fotométricas do trânsito e velocidades radiais, e comparações com Fridlund et al. (2010). 47

4.2 Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-20b obtidos com o código SOUTHWORTH_PROPAG a partir das observaçõs fotométricas do trânsito e velocidades radiais, e comparações com Deleuil et al. (2012). 48

A.1 Velocidades radiais de CoRoT-6b medidas com o espectrógrafo SOPHIE. Os dados foram retirados de Fridlund et al. (2010). 57

A.2 Velocidades radiais de CoRoT-20b. Os dados foram retirados de Deleuil et al. (2012). 58

Sumário

1. Considerações iniciais 19

2. Velocidades Radiais 21

2.1 Descrevendo uma órbita 21

2.2 Efeito Doppler 24

2.3 Ajuste de velocidades radiais 25

3. Trânsitos 29

3.1 Dados do CoRoT 30

3.2 Tratamento dos dados e obtenção das curvas de trânsito 30

3.3 Ajuste das curvas de trânsito 37

4. Obtenção dos parâmetros absolutos 41

4.1 Quais parâmetros? 41

4.1.1 Parâmetros de entrada 42

4.1.2 Parâmetros de saída 42

4.2 Metodologia do código 43

4.3 Resultados 47

5. Considerações finais 49

Referências 51

Apêndice 55

A. Conjunto de dados de velocidade radial 57

A.1 CoRoT-6b 57

A.2 CoRoT-20b 58

Capítulo 1

Considerações iniciais

Nos últimos anos o número de descobertas de exoplanetas vêm crescendo de forma tremenda. Em novembro de 2016, chegamos em 2230 sistemas planetários, com 2951 exoplanetas confirmados[1]. Eles apresentam uma ampla variedade de características, como massas desde centésimos até milhares de massas terrestres, períodos orbitais de horas até dezenas de anos e todas as excentricidades.

Este grande número de planetas possibilita estudos estatísticos das distribuições de propriedades físicas e orbitais, bem como a dependência das propriedades das estrelas hospedeiras, podendo contribuir para diversos aspectos, desde o cálculo da porcentagem de planetas habitáveis até o processo de formação planetária. Por exemplo, está agora bem estabelecido que a taxa de ocorrência de planetas aumenta fortemente com a metalicidade da estrela hospedeira. Algumas dessas distribuições podem ser visualizadas na Figura 1.1.

A detecção de exoplanetas é uma tarefa árdua. O método mais antigo de descoberta é o astrométrico que busca medir o deslocamento geométrico da estrela. Mas, planetas ao redor de estrelas são objetos de luminosidade muito pequena. Um planeta como Júpiter, por exemplo, tem luminosidade um bilhão de vezes menor que a da estrela hospedeira. Além disso, em distâncias muito grandes, a separação angular entre o planeta e a estrela é de poucos segundos de arco, sem contar os efeitos de perturbação da atmosfera terrestre. Tudo isso, faz com que a observação direta de exoplanetas aconteça apenas em situações excepcionais.

Dentre os métodos alternativos, os mais eficientes são a medida de velocidade radial por efeito Doppler e o trânsito. Neste trabalho, mostramos como os dados observacionais desses dois métodos podem ser aplicados na obtenção de parâmetros físicos e orbitais de

[1] exoplanets.org

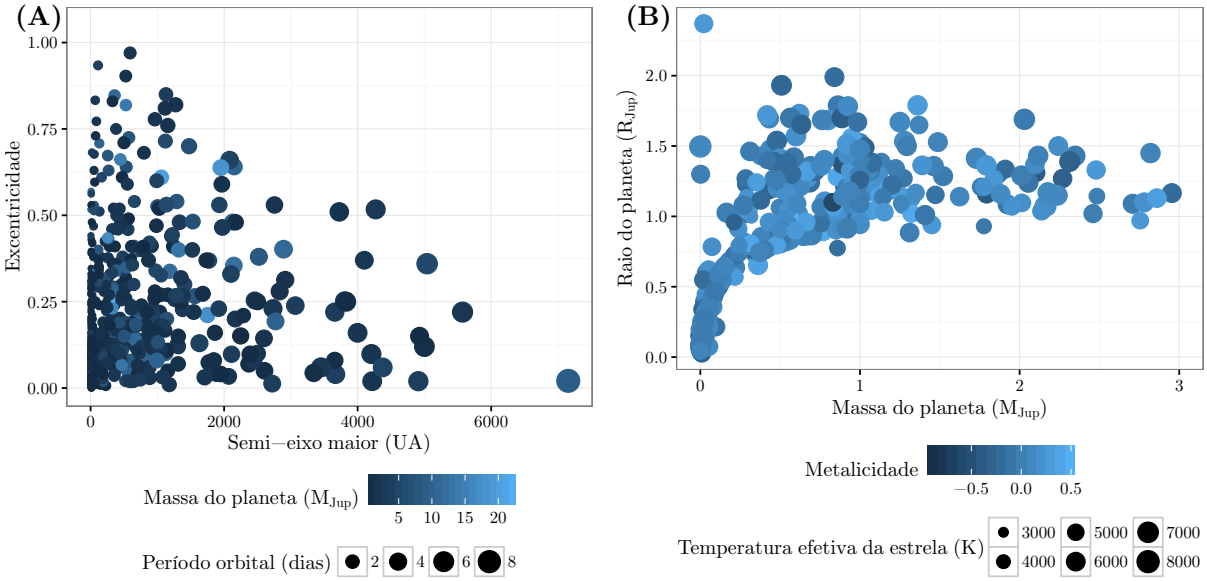

Figura 1.1: Distribuições de parâmetros físicos e orbitais de exoplanetas conhecidos. (A) Semi-eixo maior em função da excentricidade orbital, o tamanho dos círculos depende do período orbital e a cor depende da massa do planeta. (B) Massa em função do raio do planeta, o tamanho dos círculos depende da temperatura efetiva da estrela e a cor depende da metalicidade.

exoplanetas.

Apresentamos a análise das medidas de velocidades radias no Capítulo 2, o tratamento e análise das observações de trânsito no Capítulo 3 e a obtenção de parâmetros absolutos no Capítulo 4 para os exoplanetas CoRoT-6b e CoRoT-20b.

Capítulo 2

Velocidades Radiais

O método da medida da velocidade radial foi utilizado na descoberta do primeiro exoplaneta, 51 Pegasi b (Mayor e Queloz, 1995) e de muitos outros continuamente, sendo responsável pela maior parte das descobertas de exoplanetas feitas.

A presença de um planeta induz uma perturbação periódica no movimento da estrela, composto pelo movimento dessa em torno do centro de gravidade do sistema e o movimento de todo o sistema no espaço. Para investigar esse movimento utilizamos o efeito Doppler para medir a velocidade com que a estrela se desloca. A dedução detalhada da velocidade radial será realizada na Seção 2.1.

O efeito Doppler é observado diretamente nas variações das posições das linhas do espectro da estrela. O procedimento para obter a velocidade a partir dessas medidas é introduzido na Seção 2.2. Finalmente, os ajustes dos dados observados e a obtenção de parâmetros orbitais para os objetos estudados, CoRoT-6b e CoRoT-20b são mostrados na Seção 2.3.

2.1 Descrevendo uma órbita

A presença de um ou mais corpos na companhia de uma estrela induz nesta um movimento periódico em torno do baricentro do sistema, como mostrado na Figura 2.1.

Buscando entender melhor esse movimento, vamos estudar a cinemática de um único planeta em órbita elíptica em torno de sua estrela hospedeira. Essa órbita elíptica pode ser expressa matematicamente em coordenadas polares por:

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos(f)} \tag{2.1}$$

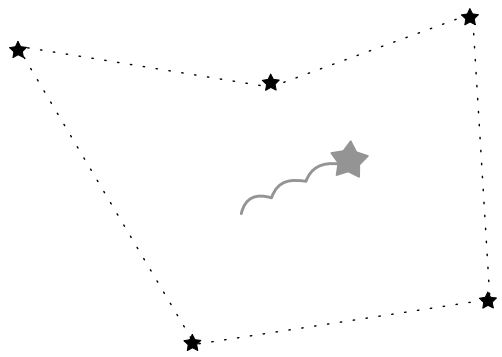

Figura 2.1: Movimento senoidal de uma estrela devido à presença de um planeta em órbita ao seu redor. As estrelas menores representam as estrelas de fundo cujos movimentos não podemos observar. A imagem foi adaptada de Beaugé et al. (2007).

em que r é o parâmetro referente à distância entre a estrela e o planeta, a é semi-eixo maior da órbita, e sua excentricidade e f é a anomalia verdadeira.

A variação temporal da anomalia verdadeira, para que a segunda lei de Kepler seja válida, deve ser:

$$\dot{f} = \frac{na^2\sqrt{1-e^2}}{r^2} \tag{2.2}$$

em que n é a velocidade angular média do movimento planetário em função do período orbital P, calculado por $n = \frac{2\pi}{P}$.

A partir dessas equações e visualizando a Figura 2.2 podemos escrever o vetor de posição $\mathbf{r}$ e o vetor de velocidade $\mathbf{v}$ do planeta em relação à estrela, deduzido em Murray e Dermott (1999), como:

$$\mathbf{r} = r\cos f\ \hat{\imath} + r\sin f\ \hat{\jmath} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{v} = -\frac{na}{\sqrt{1-e^2}}\Big[\sin f\ \hat{\imath} - (e+\cos f)\ \hat{\jmath}\Big], \tag{2.4}$$

o versor $\hat{\imath}$ está orientado na direção do periastro e $\hat{\jmath}$ na direção perpendicular.

As Equações 2.3 e 2.4 permitem determinar o movimento do planeta ao redor da estrela, mas esse movimento não pode ser observado, pois é muito sútil. Sendo assim, é preciso obter o movimento da estrela ao redor do centro de gravidade. Chamando $\mathbf{R}$ e $\mathbf{R}_*$ os vetores de posição do planeta e da estrela em relação ao baricentro do sistema, segue que $\mathbf{r} = \mathbf{R} - \mathbf{R}_*$. Ainda, como o baricentro é fixo, $m\mathbf{R} + m_*\mathbf{R}_* = 0$, logo:

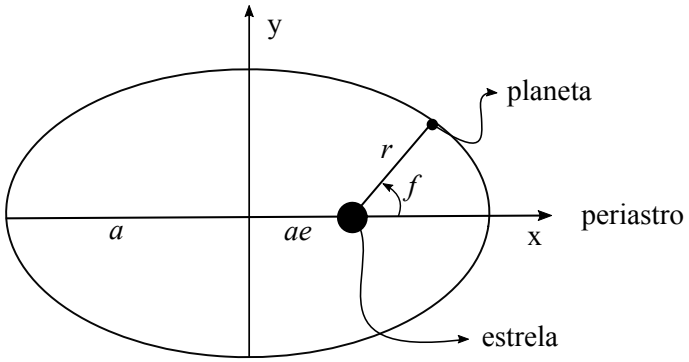

Figura 2.2: Esquema de uma órbita elíptica de um planeta com semi-eixo maior a e excentricidade e, f é a anomalia verdadeira.

$$\mathbf{R}_* = -\frac{m}{m+m_*}\,\mathbf{r} \tag{2.5}$$

em que m e m_* são as massas do planeta e da estrela, respectivamente. Assim, as Equações 2.3 e 2.4 podem ser reescritas como:

$$\mathbf{R} = -\frac{m}{m+m_*}\Big[r\cos f\ \hat{\imath} + r\sin f\ \hat{\jmath}\Big] \tag{2.6}$$

$$\mathbf{V} = \frac{m}{m+m_*}\frac{na}{\sqrt{1-e^2}}\Big[\sin f\ \hat{\imath} - (e+\cos f)\ \hat{\jmath}\Big]\,. \tag{2.7}$$

Agora, devemos lembrar que a velocidade medida pelo efeito Doppler não é a velocidade da estrela, mas sua projeção sobre a linha de visada. Vamos definir ω como o ângulo entre a direção do semi-eixo maior da órbita elíptica e a linha em que o plano do movimento intercepta um plano perpendicular à linha de visada e i como a inclinação do plano orbital em relação ao plano de referência, tangente à esfera celeste, como mostrado na Figura 2.3.

Assim, a equação da velocidade radial pode ser escrita como:

$$V_r(t) = V_{r_0} + K\Big[\cos(f(t)+\omega) + e\cos\omega\Big] \tag{2.8}$$

em que V_{r_0} é a velocidade radial constante do baricentro do sistema e a semi-amplitude de velocidade K é:

$$K = \frac{m\sin i}{m+m_*}\frac{na}{\sqrt{1-e^2}}\,. \tag{2.9}$$

A curva das velocidades radiais medidas só é uma senóide se a órbita for circular com $e = 0$. Se a órbita é elíptica, a curva será uma senóide deformada, ou seja, a dependência

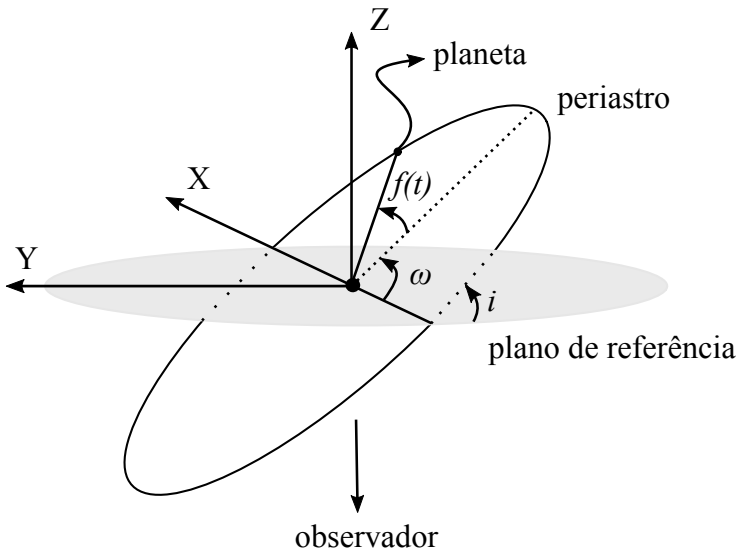

Figura 2.3: Esquema de órbita elíptica de um planeta rotacionada, mostrando o plano de referência tangente à esfera celeste.

da anomalia verdadeira com o tempo não é linear para $e \neq 0$. Essa dependência só será linear para a anomalia média dada por:

$$M(t) = n(t - \tau) \tag{2.10}$$

em que τ é o tempo de passagem pelo periastro. A relação entre a anomalia verdadeira $f(t)$ e a anomalia média $M(t)$ é feita em termos da anomalia excêntrica $E(t)$ definida pelas equações:

$$\cos f(t) = \frac{\cos E(t) - e}{1 - e \cos E(t)} \tag{2.11}$$

$$M(t) = E(t) - e \sin E(t)\,. \tag{2.12}$$

A Equação 2.12 é uma equação transcendente, chamada Equação de Kepler e deve ser resolvida numericamente. Como exemplo, a Figura 2.4 apresenta algumas curvas simuladas com a Equação 2.8 explorando valores de e e ω.

2.2 Efeito Doppler

Uma medida direta da velocidade radial estelar em torno do baricentro do sistema é o deslocamento Doppler de linhas de absorção do espectro da estrela. Um fóton com

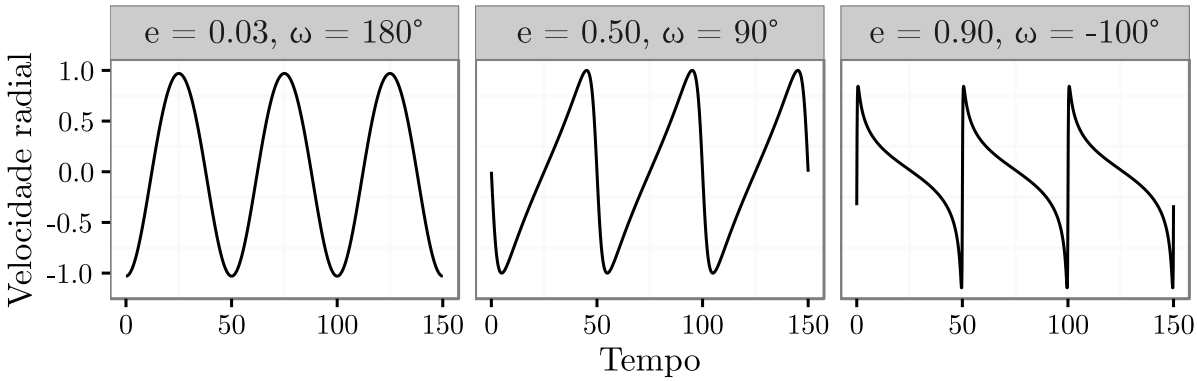

Figura 2.4: Simulações de curvas de velocidade radial mostrando a dependência de e e ω.

comprimento de onda λ, emitido por uma fonte se movimentando com velocidade v em relação ao observador será detectado com um comprimento de onda $\lambda^{'}$ diferente, dado por Lang (1980):

$$\lambda^{'} = \lambda \, \frac{1 + \beta \cos\theta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \tag{2.13}$$

em que θ é o ângulo entre o vetor velocidade e a linha de visada, $\beta = \frac{v}{c}$ e c a velocidade da luz no vácuo.

Se $v \ll c$ a expressão pode ser reduzida para:

$$v_r = v \cos\theta \approx c \, \frac{\lambda^{'} - \lambda}{\lambda} \tag{2.14}$$

em que valores positivos indicam que a estrela está se afastando.

A Equação 2.14 é apenas uma simplificação, pois a obtenção de dados de velocidade radial em pesquisa é mais complexa, envolvendo várias correções de efeitos como: movimento da Terra, redshifts gravitacionais, assimetria de linhas, atmosferas estelares, resolução dos instrumentos de medida, dentre outros. Para melhor entendimento desses efeitos de perturbação consultar Lindegren e Dravins (2003).

2.3 Ajuste de velocidades radiais

Os conjuntos de dados de velocidade radial dos objetos estudados, foram retirados dos artigos de descoberta Fridlund et al. (2010) e Deleuil et al. (2012). As tabelas com esses dados se encontram no Apêndice A. Utilizando a Equação 2.8, ajustamos as curvas de

velocidade radial identificando os parâmetros orbitais V_{r_0}, K, P, e, ω e τ para os objetos: CoRoT-6b e CoRoT-20b.

Como mostrado anteriormente a Equação 2.8 tem dependência com o tempo incorporado no cálculo da anomalia verdadeira, por isso, a função de ajuste criada inclui o cálculo da anomalia média, Equação 2.10, da anomalia excêntrica, resolvida numericamente, Equação 2.12, seguida da anomalia verdadeira, 2.11 e finalmente a Equação 2.8, de velocidade radial. Os valores iniciais utilizados foram: V_{r_0} como a média dos dados, K como a média dos modulos das velocidades radiais máxima e mínima, P obtido do periodograma dos dados, $e = 0.5$, $\omega = 180\ ^\circ$ e τ como o valor mínimo dos dados de tempo.

As observações para monitoramento espectroscópico do planeta CoRoT-6b foram feitas com o instrumento SOPHIE no telescópio de 1.93 m no Observatório de Haute-Provence na França. Para maior detalhes consultar Fridlund et al. (2010). A Figura 2.5 mostra o ajuste desses dados e a Tabela 2.1 traz os resultados.

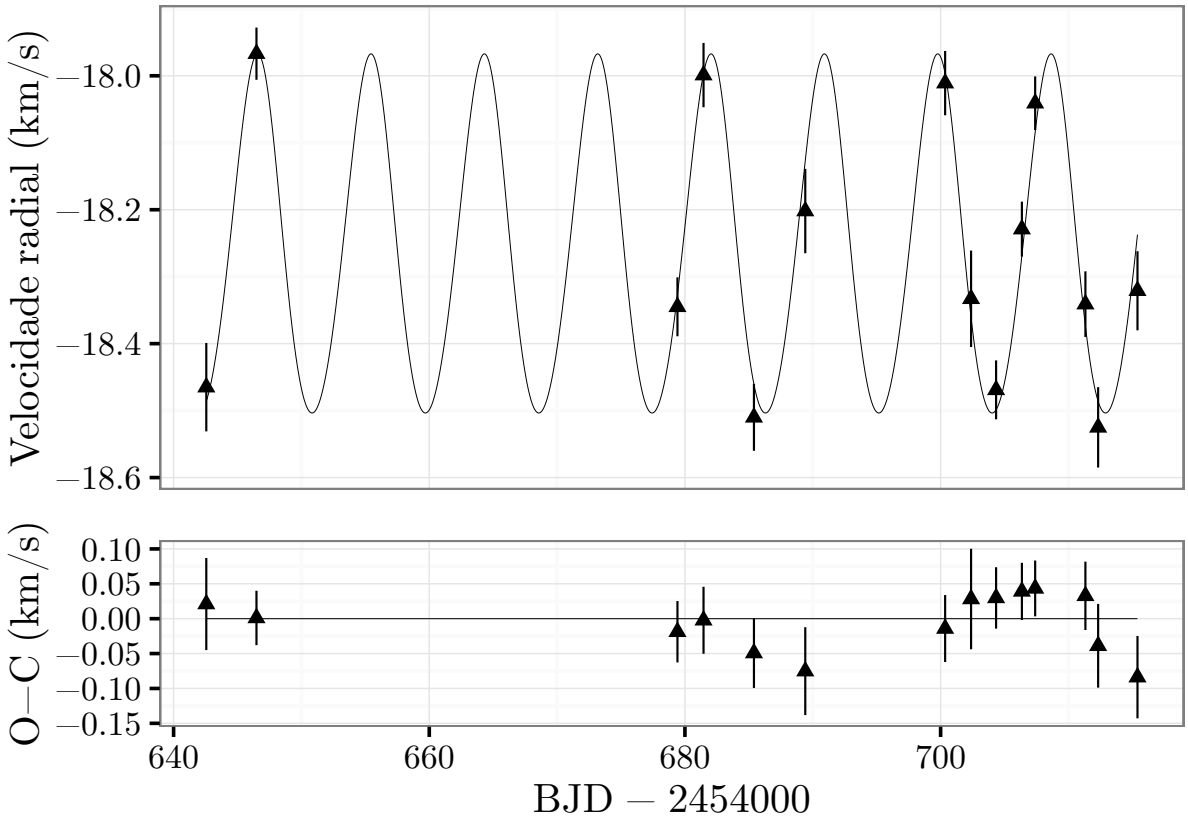

Figura 2.5: Dados de velocidade radial de CoRoT-6b com o espectrógrafo SOPHIE, curva ajustada com a Equação 2.8 e resíduos.

Tabela 2.1 - Conjuto de parâmetros orbitais de CoRoT-6b obtido com o ajuste da Equação 2.8 aos dados de velocidade radial.

	V_{r_0} (kms$^-$1)	K (ms^{-1})	P (dias)	e	ω (°)	τ (BJD − 2454000)
Neste trabalho	-18.254 ± 0.016	268 ± 19	8.867 ± 0.072	0.076 ± 0.073	24 ± 71	642.66 ± 1.75
Fridlund et al. (2010)	-18.243 ± 0.015	280 ± 30	8.886593 ± 0.000004	< 0.1		

O desvio padrão dos resíduos foi calculado em $\sigma(\mathrm{O-C}) = 42.3$ ms^{-1}, correspondendo a um χ^2 de 8.35 que é cabível para 12 graus de liberdade. A comparação dos resultados com Fridlund et al. (2010) também é satisfatória.

Nosso próximo objeto de pesquisa, CoRoT-20b, teve os dados de velocidade radial medidos por diferentes espectrógrafos, HARPS montado no telescópio de 3.6 m do ESO telescópio ESO no Chile, SOPHIE já citado anteriormente e FIES no Telescópio Óptico Nórdico de 2.56 m, localizado na Espanha. A Figura 2.6 traz os dados e a curva ajustada.

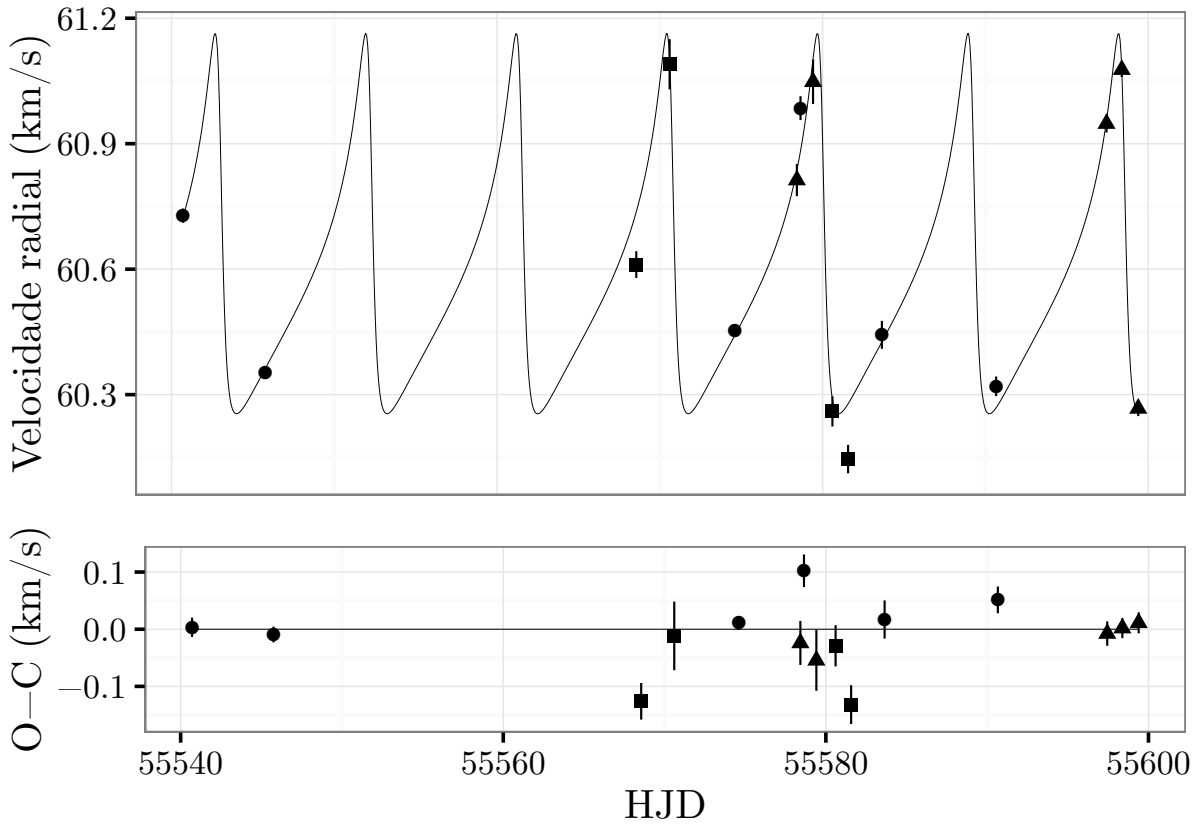

Figura 2.6: Dados de velocidade radial de CoRoT-20b com os espectrógrafos HARPS (círculos), SOPHIE (triângulos) e FIES (quadrados), curva ajustada com a Equação 2.8 e resíduos.

Neste caso, o desvio padrão foi de $\sigma(\mathrm{O-C}) = 60.7$ ms^{-1}, com um χ^2 de 52.5, bastante

alto para 13 graus de liberdade. Esse valor elevado foi causado por três pontos que estão muito fora da curva ajustada, isto provavelmente ocorreu por que consideramos o *offset* relativo entre os espectrógrafos utilizados como nulo. Apesar disso, os resultados obtidos são próximos aos de Deleuil et al. (2012) como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Conjuto de parâmetros orbitais de CoRoT-20b obtido com o ajuste da Equação 2.8 aos dados de velocidade radial.

	V_{r_0} (kms$^-$1)	K (ms^{-1})	P (dias)	e	ω (°)	τ (HJD)
Neste trabalho	60.572 ± 0.008	455 ± 22	9.251 ± 0.019	0.647 ± 0.028	-118 ± 4	55538.36 ± 0.15
Deleuil et al. (2012)	60.623 ± 0.006	454 ± 9	9.24285 ± 0.00030	0.562 ± 0.013	$56.3^{+2.4}_{-2.3}$	55265.79074

Apesar dos bons resultados nos dois casos mostrados, nem sempre a equação da velocidade radial será eficiente. Por exemplo, quando as observações são espaçadas em intervalos de tempo grandes, como mostrado no Painel (A) da Figura 2.7. Neste caso existem dois conjutos de dados de CoRoT-33b de espectrógrafos diferentes, o HARPS e o FIES. Algo muito comum de acontecer em astronomia, pois nem sempre as observações podem ser realizadas continuamente, seria interessante então adaptar o ajuste usando a fase orbital. Dessa forma, os dados de diferentes tempos de observação poderiam ser acumulados como mostrado no Painel (B) da mesma figura.

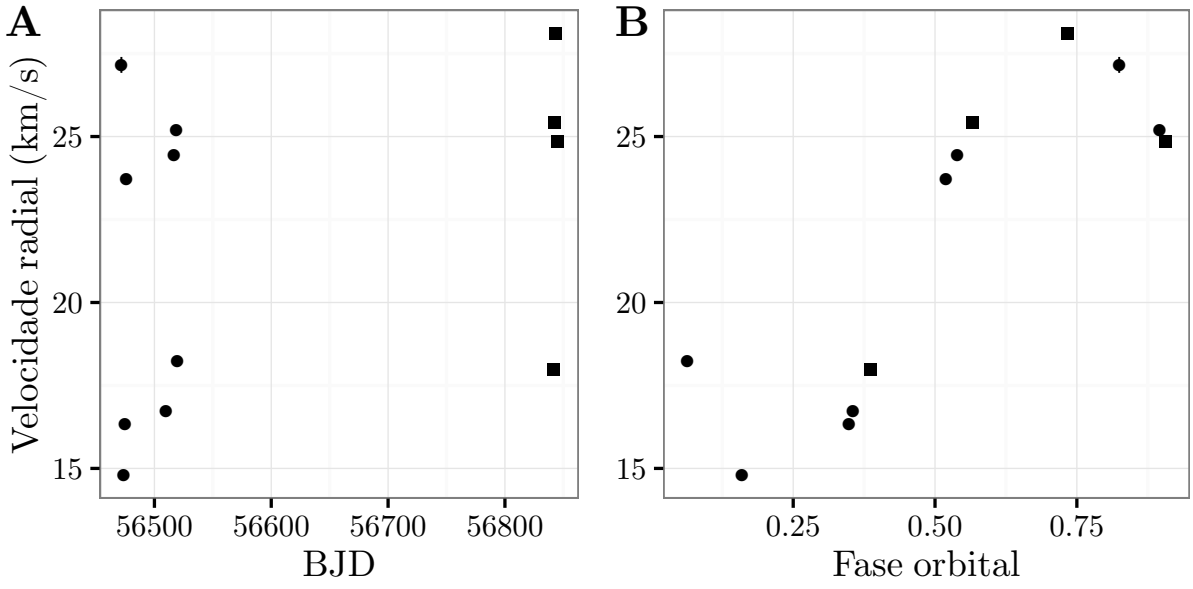

Figura 2.7: Dados de velocidade radial de CoRoT-33b com os espectrógrafos HARPS (círculos) e FIES (quadrados) em função: (A) do tempo e (B) da fase orbital.

Capítulo 3

Trânsitos

O conceito de trânsito é algo muito simples, dado uma geometria de alinhamento adequada, a luz da estrela será atenuada pelo trânsito de um planeta, efeito que se repete a cada período orbital.

O primeiro trânsito de exoplaneta (Henry et al., 2000) foi observado em 1999, após esta observação outros sistemas descobertos a partir de levantamentos de velocidade radial também foram monitorados para procurar possíveis trânsitos.

Pesquisas do solo e do espaço foram criadas para realizar observações de novos planetas a partir de suas assinaturas periódicas de trânsito. Uma delas foi a missão CoRoT (*COnvection ROtation and planetary Transits*), da ESA, da qual o Brasil fez parte. Recentemente a equipe do CoRoT liberou o conjunto de observações dessa missão, a descrição minuciosa dessas observações é feita em *"The CoRoT Legacy Book"* (CoRoT Team, 2016).

Esses dados têm grande importância em estudos futuros de exoplanetas, visando essa importância centramos nossa análise em objetos do CoRoT. Uma pequena introdução da missão e de como os dados de curva de luz podem ser obtidos são mostrados na Seção 3.1.

Em seguida, vamos apresentar o método de tratamento de dados do CoRoT, adotando como modelo o objeto CoRoT-33b na Seção 3.2 a fim de obter curvas de trânsito bem depuradas. Esse método foi baseado no trabalho de pós-doutoramento de Dr. Marcos T. dos Santos (Csizmadia et al., 2015).

As curvas de trânsito de exoplanetas são de extrema importância pois fornecem uma estimativa de seus raios. Por último, vamos realizar ajustes dessas curvas de trânsito usando o código JKTEBOP a fim de obter parâmetros do trânsito. Os resultados dos ajustes são mostrados na Seção 3.3.

3.1 Dados do CoRoT

O satélite CoRoT (Baglin et al., 2006) foi lançado em 2006, e realizou observações até novembro de 2012, registrando curvas de luz de aproximadamente 150 estrelas brilhantes (com magnitude aparente ente 5.8 e 8), pelo canal de sismologia estelar, e mais 160 000 estrelas fracas (com magnitude aparente entre 10.5 e 16), pelo canal de exoplanetas.

Dois CCDs são dedicados a observação de estrelas tênues, cerca de 6000 estrelas são observadas simultaneamente em cada CCD. A luz dessas estrelas é dispersada por meio de um prisma duplo, resultando em fluxos medidos em três bandas fotométricas (vermelho, verde e azul). A cadência de observações neste canal é de 32s.

Os conjuntos de dados do satélite estão disponíveis em vários níveis de correções, como extensões de um único arquivo FITS. O conjunto de dados com o mais alto nível de correções é chamado de N2, descrito em CoRoT Team (2016, Parte II.4) e pode ser encontrado no arquivo da missão[1] e no banco de dados do VizieR[2].

As curvas de luz de CoRoT-33b, CoRoT-6b e CoRoT-20b selecionadas para análise fazem parte do banco N2 e são compostas por tempo, com cadência rebinada para 512s e fluxo total, correspondendo à luz branca, que é uma adição das cores vermelho, verde e azul mencionadas previamente.

3.2 Tratamento dos dados e obtenção das curvas de trânsito

Os dados rebinados de CoRoT-33b resultam em 13 000 observações, que foram transformadas em fluxo relativo, como visualizado na Figura 3.1. O periodograma dos dados foi obtido com o método DCDFT (*Date Compensated Discrete Fourier Transform*), descrito em Ferraz-Mello (1981) e o método BLS (*Box-fitting Least Squares*), descrito em Kovács et al. (2002). Verificamos um período de ≈ 8.9 dias que pode estar associado à rotação da estrela, e também seu primeiro harmônico em ≈ 4.5 dias e segundo harmônico em ≈ 3 dias.

A fim de encontrar a rotação aparente da estrela, utilizamos uma série de Fourier, Equação 3.1, em que as amplitudes A_k e B_k e o período $P_{\rm rot}$ foram ajustados. O valor de

[1] idoc-corot.ias.u-psud.fr/

[2] vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/corot

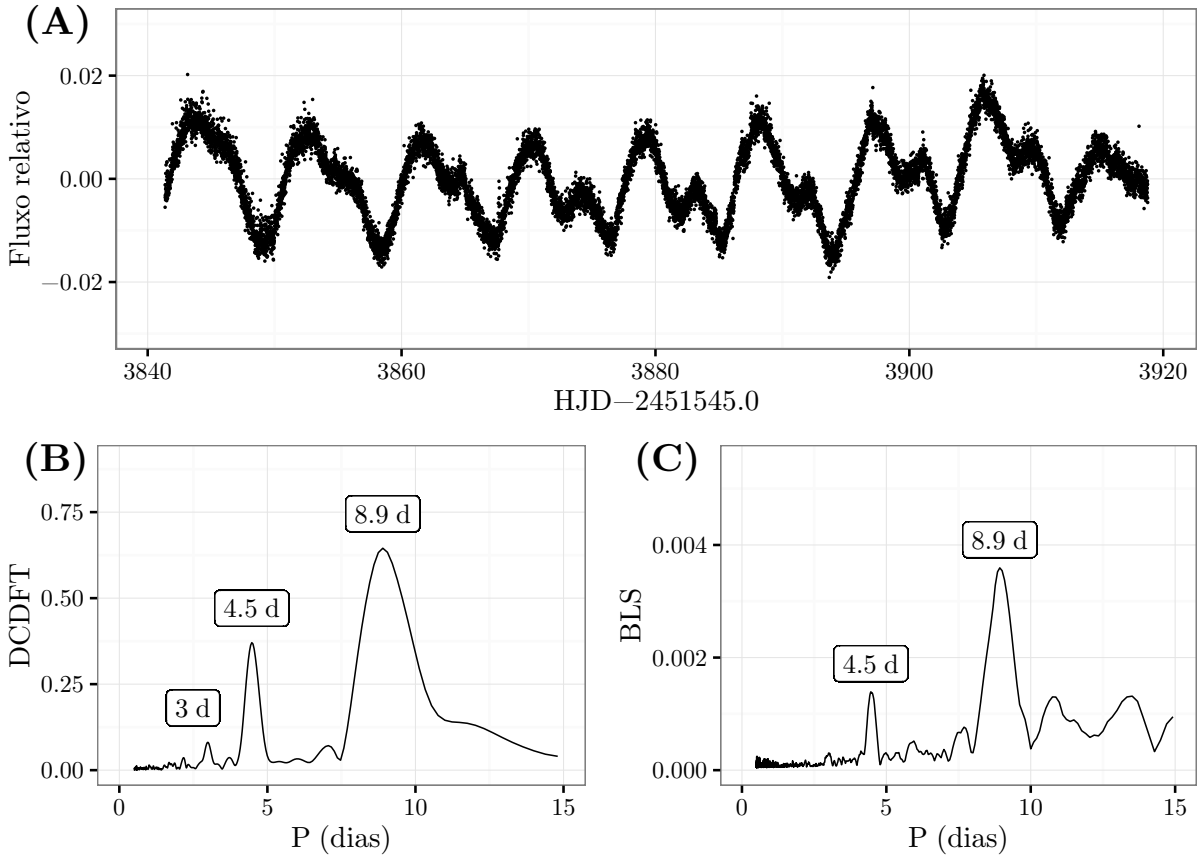

Figura 3.1: (A) Observações fotométricas de CoRoT-33b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS.

t_o foi fixado na data da primeira observação.

$$f(x) = \sum_{k=0}^{n} \left\{ A_k \cos\left(\frac{2\pi k(t-t_o)}{P_{\text{rot}}}\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi k(t-t_o)}{P_{\text{rot}}}\right) \right\} \tag{3.1}$$

Fizemos o ajuste da Equação 3.1 para as observações explorando os harmônicos (n = 2, 3 e 4). As curvas ajustadas e os resíduos são apresentados na Figura 3.2, paineis A, B e C. Adotamos o valor de rotação estelar como a média dos períodos ajustados que é 8.944 ± 0.004 dias, este valor é próximo do valor encontrado por Csizmadia et al. (2015) de 8.936 ± 0.015 dias. Os paineis D e E da Figura 3.2 mostram os periodogramas para cada resíduo. Podemos perceber que ainda existem períodos remanescentes atribuídos a um ajuste inadequado dos dados.

Como estamos interessados no trânsito, precisamos de dados bem depurados. Sendo assim, dividimos os dados em pequenas janelas temporais, correspondentes a frações do período de rotação, e ajustamos a Equação 3.1 fixando o valor de período em 8.944 ± 0.004 dias. Os ajustes são mostrados na Figura 3.3, com janela de 1 período de rotação, P_{rot}.

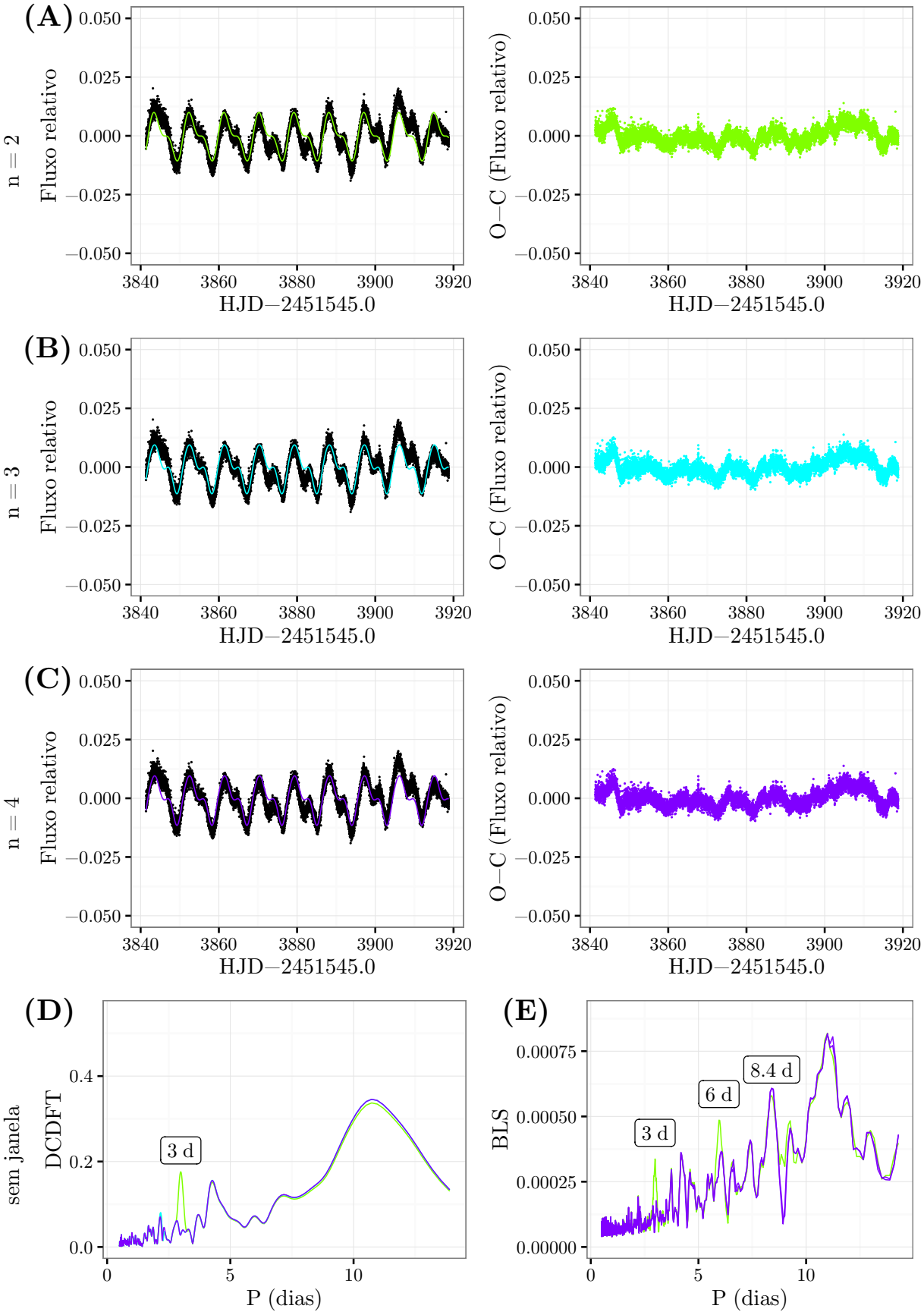

Figura 3.2: (A), (B) e (C) Observações (pontos pretos) e curvas ajustadas (linhas cheias), para o planeta CoRoT-33b, adotando-se a Equação 3.1para os harmônicos n = 2 (verde), 3 (azul claro) e 4 (roxo). (D) DCDFT normalizada e (E) BLS para os harmônicos n = 2, 3 e 4, com as respectivas cores do ajuste.

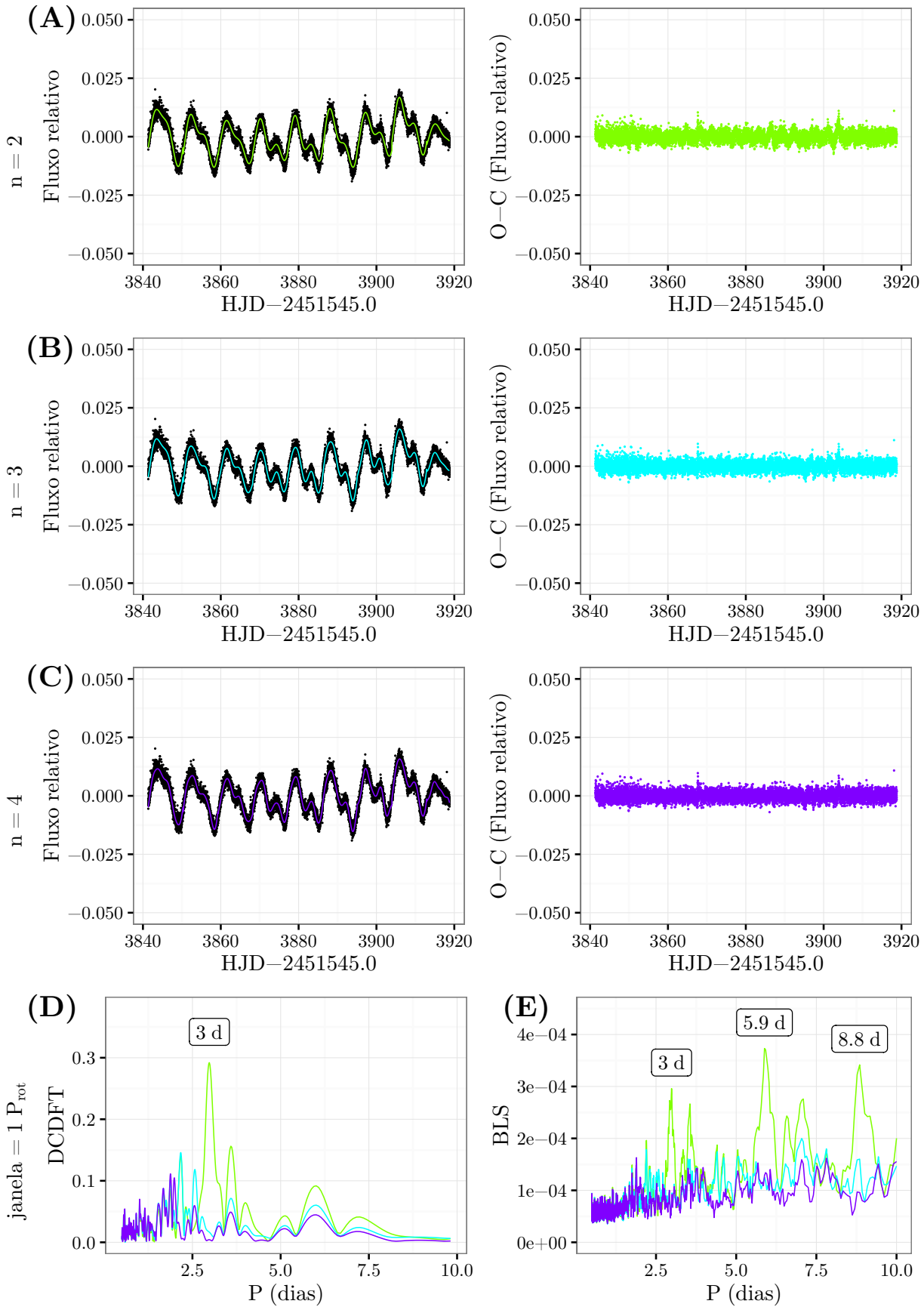

Figura 3.3: (A), (B) e (C) Observações (pontos pretos) e curvas ajustadas (linhas cheias) para CoRoT-33b adotando-se a Equação 3.1 com o período fixo e janelas de 1 $P_{\rm rot}$. (D) DCDFT normalizada e (E) BLS.

Notamos um pico significativo no periodograma mostrado na Figura 3.3 (D), o que é esperado, pois o segundo harmônico não foi cosiderado, já para n = 3 e 4 não há picos proeminentes.

O mesmo processo foi aplicado adotando-se janelas de 0.5 e 2 $P_{\rm rot}$, resultando nos periodogramas dos resíduos apresentados na Figura 3.4. No primeiro caso, os dados ficam mais depurados que os outros, podemos ver picos da ordem de 2 dias, mas as amplitudes são pequenas. No segundo caso, o intervalo é grande o suficiente para observarmos as mesmas irregularidades vistas no primeiro ajuste.

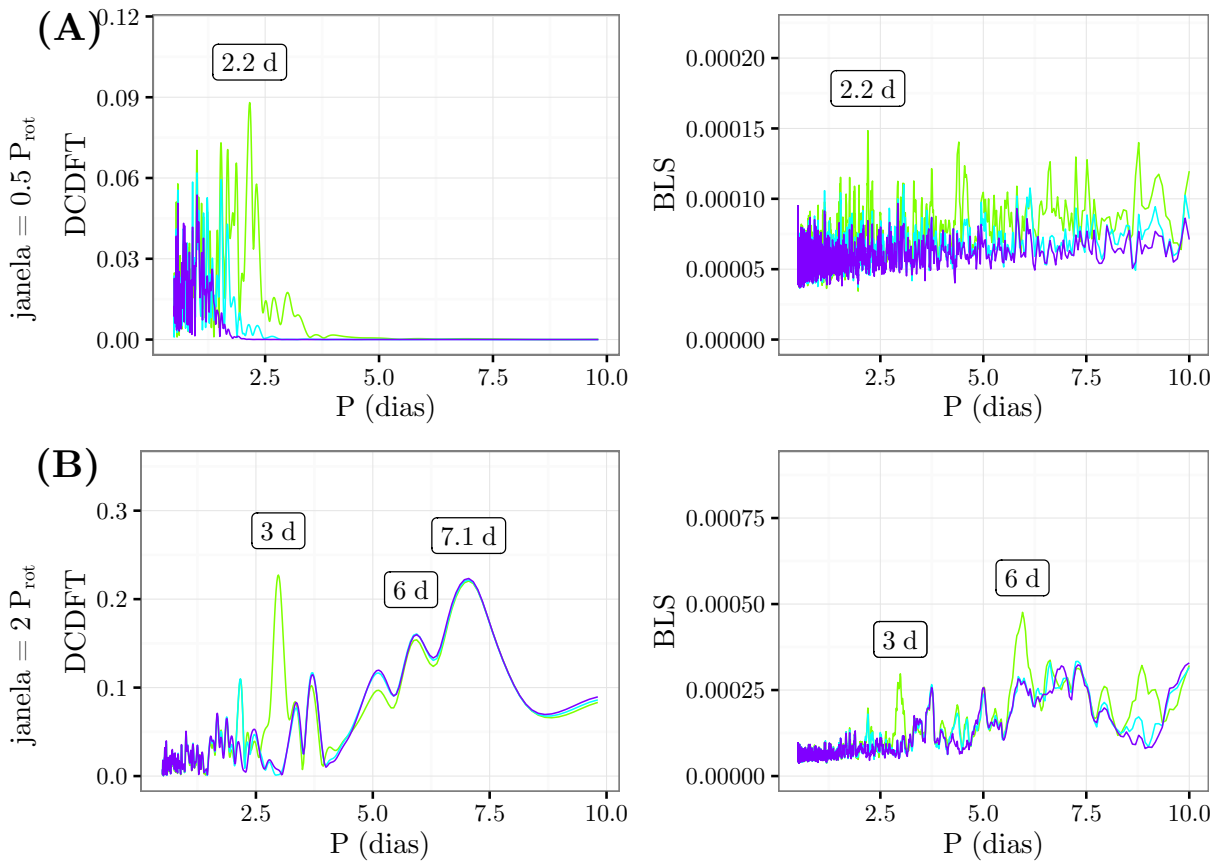

Figura 3.4: (A) e (B) Periodogramas DCDFT e BLS relativos aos resíduos dos ajustes para janelas de 0.5 e 2 $P_{\rm rot}$ para CoRoT-33b.

O espectro BLS foi sensível a um possível trânsito com período ≈ 5.9 dias. Investigando esse período, chegamos a um candidato a período de 5.8 dias como mostrado na Figura 3.5. Como a queda no fluxo é pequena, indicamos os decaimentos com setas. Este candidato possui tempo do primeiro trânsito de ≈ 3851.2 dias e duração de aproximadamente 1.44 horas, já que o decaimento ocorre entre as fases ≈ −0.32 e ≈ −0.31.

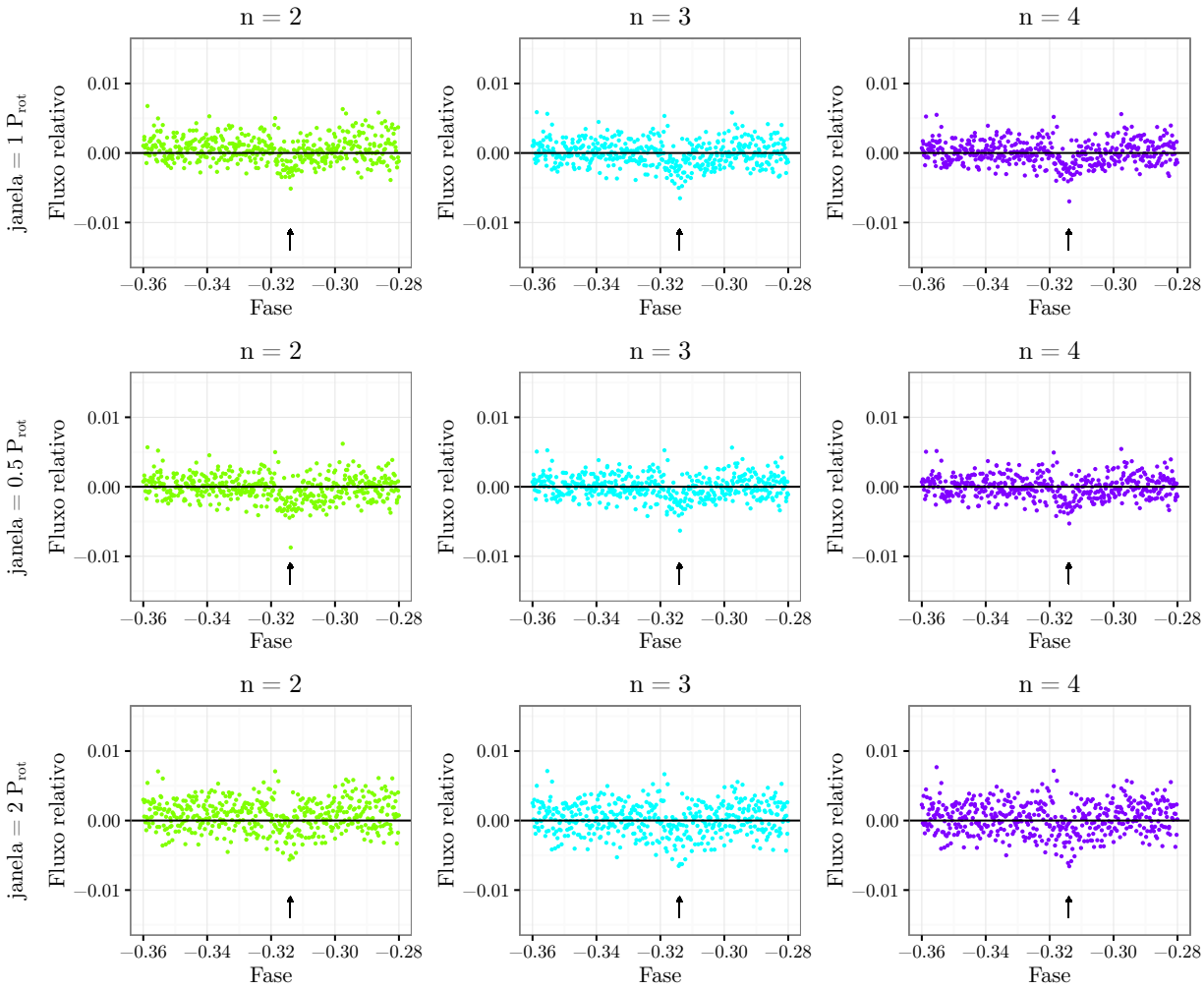

Figura 3.5: Curvas de trânsito de CoRoT-33b, obtidas colocando os resíduos dos ajustes em função da fase correspondente a 5.82 dias.

Para a análise das curvas de trânsito procuramos objetos com trânsitos mais evidentes, como mostrado para CoRoT-6b na Figura 3.6, com vários trânsitos aparentes e para CoRoT-20b na Figura 3.7, com três trânsitos destacados.

Após os ajustes encontramos para o sistema CoRoT-6, o período rotacional de 6.346 ± 0.002 dias em comparação aos 6.4 ± 0.5 dias de Fridlund et al. (2010).

Para o sistema CoRoT-20, foi difícil definir um período de rotação, pois o tempo de observação foi menor e a assinatura de rotação da estrela não esta bem marcada nos dados, sendo assim, os valores iniciais do ajuste afetam bastante o resultado final. Decidimos definir $P_{\rm rot}$ como 4.54 ± 0.06 dias, pois é o período que minimiza o desvio padrão dos resíduos. Esse período é bastante curto em comparação com o obtido por Deleuil et al. (2012) de 11.5 ± 3.1 dias.

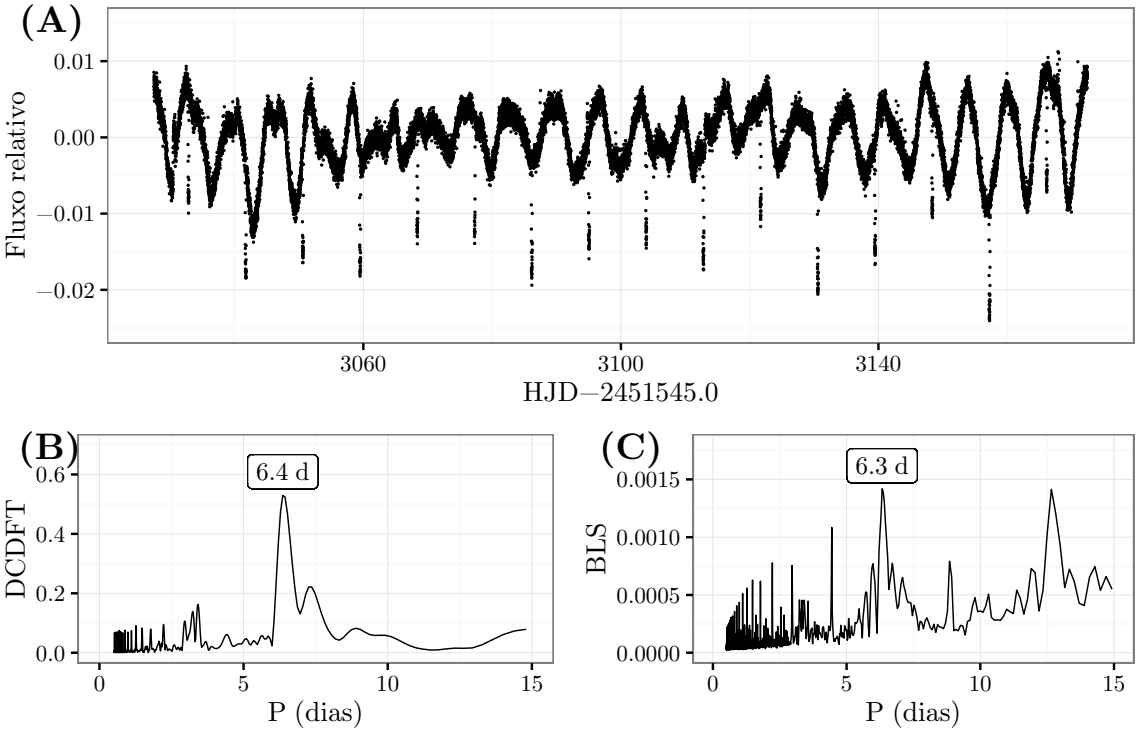

Figura 3.6: (A) Observações fotométricas de CoRoT-6b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS.

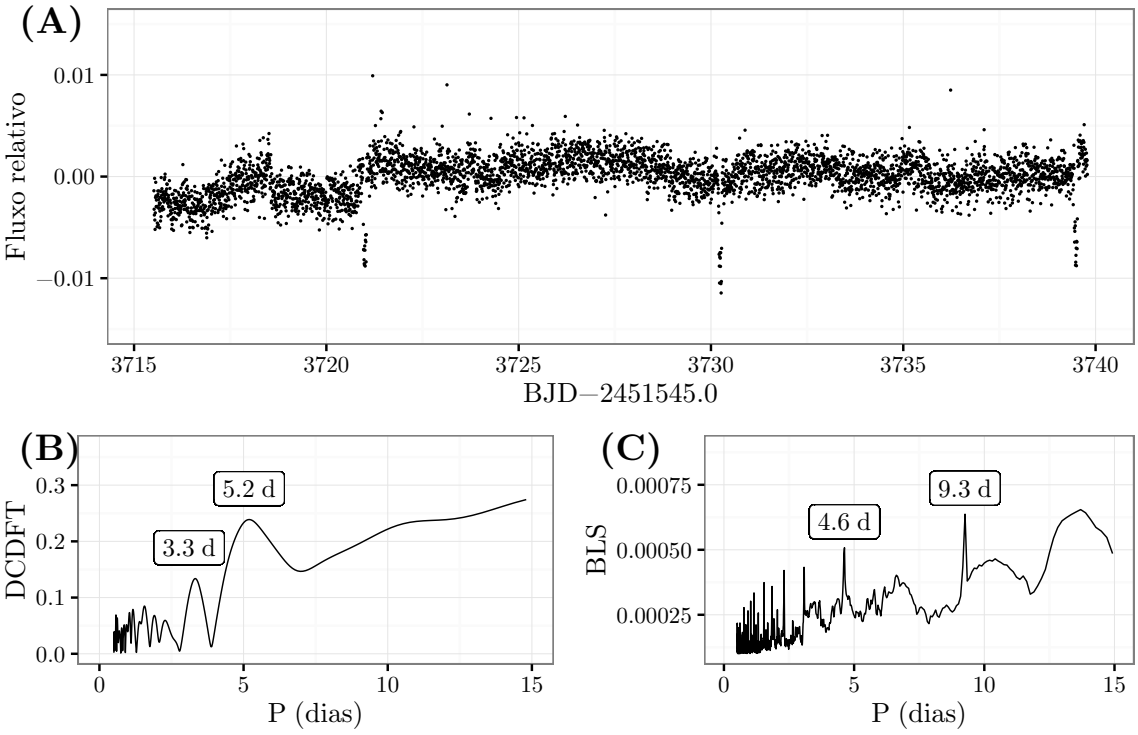

Figura 3.7: (A) Observações fotométricas de CoRoT-20b. (B) DCDFT normalizada e (C) BLS.

3.3 Ajuste das curvas de trânsito

O Código JKTEBOP (Southworth, 2008) escrito em linguagem FORTRAN 77 por John Southworth, foi baseado no código EBOP (Etzel (1981); Popper e Etzel (1981)). O programa foi desenvolvido para modelar curvas de luz produzidas por estrelas binárias eclipsantes separadas e também pode ser aplicado ao estudo de exoplanetas com trânsito.

JKTEBOP modela a projeção da estrela, A, e do planeta, b, como esferas para o cálculo do formato do eclipse e como esferóides biaxiais para o cálculo de efeitos de proximidade.

Uma série de parâmetros devem ser introduzidos juntamente com os dados observacionais. Os principais parâmetros ajustados são o período orbital P, a inclinação orbital i, o ponto médio do trânsito T_0, a soma e razão dos raios fracionados da estrela e do planeta $r_\mathrm{A} + r_\mathrm{b}$ e $k = r_\mathrm{b}/r_\mathrm{A}$. Os raios fracionados são definidos como $r_\mathrm{A} = \frac{R_\mathrm{A}}{a}$ e $r_\mathrm{b} = \frac{R_\mathrm{b}}{a}$, em que a é o semi-eixo maior orbital e R_A e R_b são os raios absolutos da estrela e do planeta, respectivamente.

Escolhemos uma lei quadrática para o escurecimento de borda da estrela, de acordo com os artigos de descoberta para ambos os objetos estudados, CoRoT-6b e CoRoT-20b. A lei quadrática implementada no código é (Kopal, 1950):

$$I_\mu = I_0[1 - u_\mathrm{A}(1-\mu) - v_\mathrm{A}(1-\mu)^2] \tag{3.2}$$

em que $\mu = \cos\gamma$ e γ é o ângulo entre a superfície normal e a linha de visada. I_0 é a intensidade no centro do disco da estrela e I_μ é a intensidade no ângulo μ. u_A é o termo linear da lei e v_A o termo não-linear.

Utilizando os resíduos da curva de 1 P_rot e n = 2 dos objetos estudados ajustamos a curva de trânsito. Foi necessário transformar os dados de fluxo para magnitude. Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 3.8 e 3.9.

Os ajustes, também, foram feitos sem a parte contínua do trânsito, ou seja, selecionando apenas as quedas de fluxo, o que permitiu maior liberdade na escolha de parâmetros iniciais. O único problema deste procedimento é que ele não poderá ser realizado para objetos com decaimentos sutis, como o objeto CoRoT-33b. Os parâmetros calculados pelo código são mostrados nas Tabelas 3.1 e 3.2 em comparação com os artigos de descoberta.

Para CoRoT-6b, os resultados estão em concordância dentro de $\pm$ 3 σ, com exceção dos coeficientes da lei de escurecimento de limbo. Isto pode ter acontecido, pois Fridlund et al.

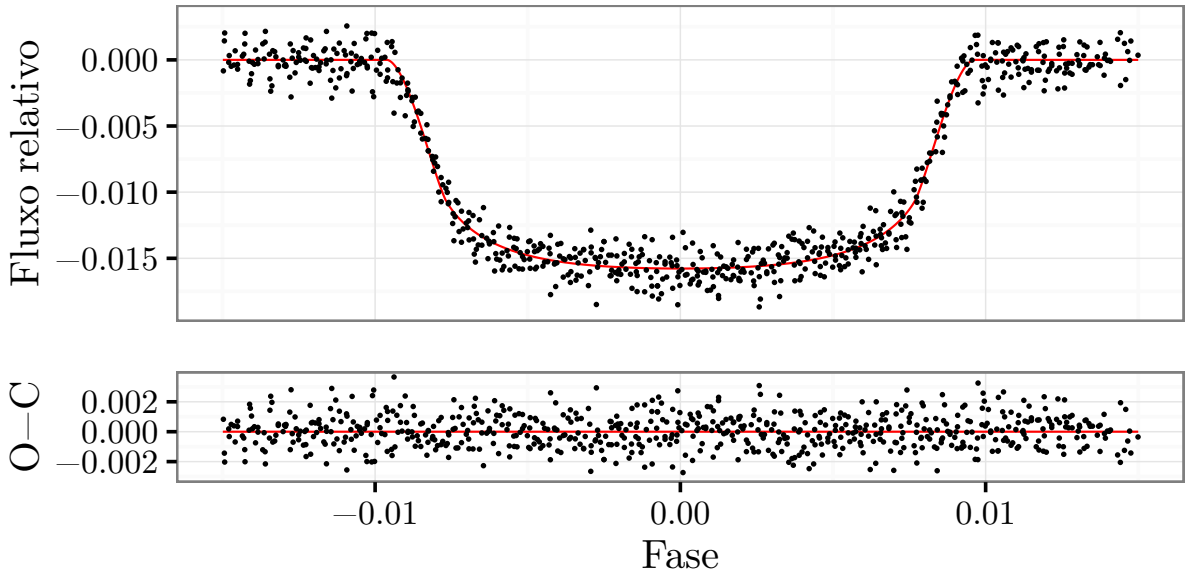

Figura 3.8: Observações fotométricas em função da fase de CoRoT-6b e curva ajustada (em vermelho) pelo pelo código JKTEBOP.

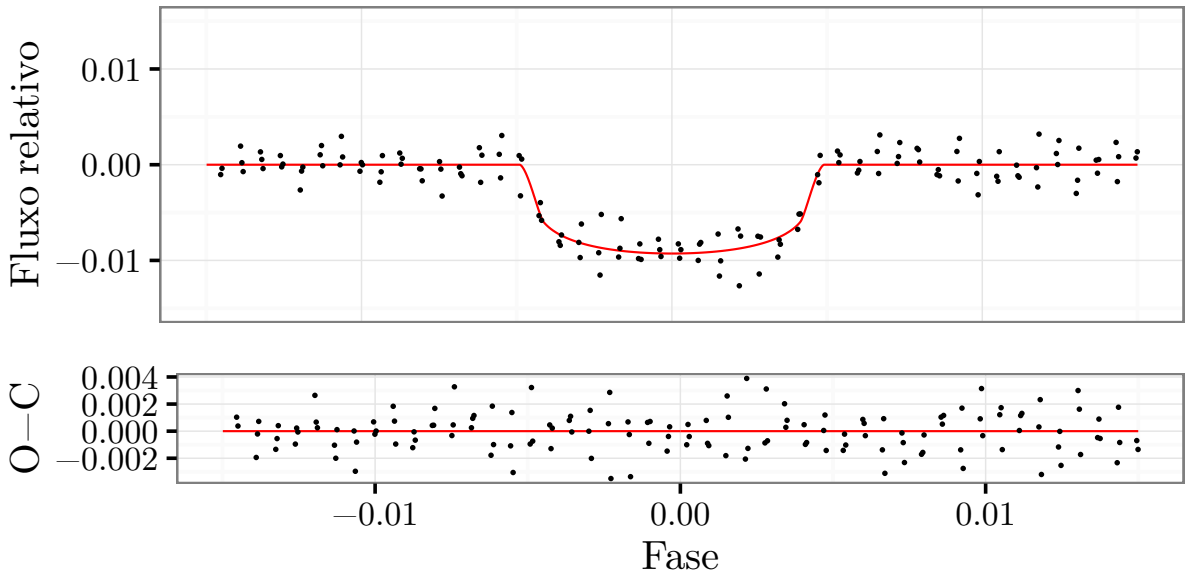

Figura 3.9: Observações fotométricas em função da fase de CoRoT-20b e curva ajustada (em vermelho) pelo pelo código JKTEBOP.

(2010) seguem a metodologia de Giménez (2006), que usa os coeficientes u_A e u_b como as combinações: $u_+ = u_A + v_A$ e $u_- = u_A - v_A$. Neste caso, segundo Southworth (2008) as combinações não são tão fortemente correlacionadas, como u_A e u_b. Isto melhora a convergência ao ajustar os dados observacionais e a precisão das medidas das combinações

Tabela 3.1 - Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-6b obtidos com o código JKTEBOP a partir das observaçõs fotométricas do trânsito, e comparações com Fridlund et al. (2010).

	Neste trabalho	Fridlund et al. (2010)
P (dias)	8.88661 ± 0.00004	8.886593 ± 0.000004
i (°)	89.6 ± 1.1	89.07 ± 0.30
$r_\mathrm{A} + r_\mathrm{b}$	0.0623 ± 0.0025	0.062 ± 0.020
$k = r_\mathrm{b}/r_\mathrm{A}$	0.1094 ± 0.0020	0.1169 ± 0.0009
$u_\mathrm{A} + v_\mathrm{A}$	0.83 ± 0.23	0.586 ± 0.068
$u_\mathrm{A} - v_\mathrm{A}$	0.41 ± 0.23	-0.12 ± 0.13

u_+ e u_-. Mas, segundo o autor os valores de u_A e u_b não são medidos precisamente, sendo assim, ele optou pelo uso dos coeficientes linear e não-linear diretamente, por não evidenciar problemas de convergência no código JKTEBOP.

Tabela 3.2 - Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-20b obtidos com o código JKTEBOP a partir das observações fotométricas do trânsito, e comparações com Deleuil et al. (2012).

	Neste trabalho	Deleuil et al. (2012)
P	9.2432 ± 0.0008	9.24285 ± 0.00030
i	88.7 ± 1.2	88.21 ± 0.53
$r_\mathrm{A} + r_\mathrm{b}$	0.0408 ± 0.0090	0.057 ± 0.014
$k = r_\mathrm{b}/r_\mathrm{A}$	0.0857 ± 0.0033	0.0842 ± 0.0017

Para o objeto CoRoT-20b, os coeficientes da lei de escurecimento de limbo foram fixados em $u_\mathrm{A} = 0.4262 \pm 0.0168$ e $u_\mathrm{b} = 0.2434 \pm 0.0108$ como descrito em Deleuil et al. (2012), utilizando os coeficientes tabelados por Sing (2010) que são deduzidos dos parâmetros atmosféricos da estrela. Os resultados são próximos e estão dentro do limite de erro de $\pm$ 3 σ. Apesar disso, uma leve mudança dos parâmetros iniciais altera os resultados significativamente. Isto não aconteceu com o objeto CoRoT-6b, pois diferentemente de CoRoT-20b, ele apresenta grande quantidade de observações e pouca dispersão dos dados.

Fizemos, também, uma outra análise para CoRoT-20b utilizando o pacote PyTransit[1] (Parviainen, 2015) que implementa modelos de trânsito baseados em séries de expansão de Giménez (2006, 2007) e modelos de escurecimento de limbo quadráticos de Mandel e Agol (2002) com otimizações. Seguimos um tutorial[2] sugerido pelo autor na interface IPython, o qual utiliza inferência baysiana em conjunto com amostragem MCMC (*Markov chain Monte Carlo*), mas este foi pouco explicativo e, por isso, não continuamos seu uso para o ajuste de trânsito. O pacote parece promissor, sendo bem interessante para fazer

[1] https://github.com/hpparvi/PyTransit

[2] https://github.com/hpparvi/exo_tutorials/blob/master/01_broadband_parameter_estimation.ipynb

simulações.

Capítulo 4

Obtenção dos parâmetros absolutos

O código para a obtenção dos parâmetros absolutos de um sistema binário foi desenvolvido durante um estágio sob supervisão do Dr. Tobias Cornelius Hinse, no *Korea Astronomy and Space Science Institute* (KASI) localizado em Daejeon na República da Coreia.

A oportunidade do estágio veio durante um intercâmbio pelo programa Ciências sem Fronteiras financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

O código calcula propriedades de um sistema binário, composto por uma estrela e um planeta utilizando as equações empíricas, de massa e raio, obtidas por Southworth (2011) e compara com as equações deduzidas da terceira lei de Kepler para encontrar o melhor valor de semi-amplitude da velocidade radial do planeta usando para isso o método de mínimos quadrados.

O programa foi nomeado SOUTHWORTH_PROPAG, pois os erros dos parâmetros são calculados por propagação. Existem mais duas ramificações desse código, utilizando leis empíricas de Enoch et al. (2010) e erros calculados por perturbação.

A listagem dos parâmetros iniciais e calculados e a metodologia do código são apresentadas nas Seções 4.1 e 4.2, respectivamente.

Os resultados obtidos para os sistemas estudados são discutidos na Seção 4.3.

4.1 Quais parâmetros?

Para simplificação, vamos identificar a estrela como corpo A e o planeta como corpo b. A seguir mostramos os parâmetros que devem ser fornecidos ao código pelo usuário.

4.1.1 Parâmetros de entrada

Do trânsito:

- ▷ Raio fracionado da estrela $r_A = \frac{R_\mathrm{A}}{a}$;
- ▷ Raio fracionado do planeta $r_b = \frac{R_\mathrm{b}}{a}$;
- ▷ Inclinação i;
- ▷ Período orbital P.

Da velocidade radial:

- ▷ Excentricidade e;
- ▷ Semi-amplitude de velocidade da estrela K_A;

Dos espectros:

- ▷ Temperatura efetiva T_eff;
- ▷ Metalicidade $\left[\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{H}}\right]$.

Do planeta:

- ▷ Semi-amplitude de velocidade do planeta K_b (máximo, mínimo e intervalo de iteração).

Como previamente informado, o código funciona iterativamente achando o melhor valor de K_b dentro dos valores, mínimo e máximo fornecidos pelo usuário. Tipicamente o valor de K_b é próximo de 150 kms^{-1}.

4.1.2 Parâmetros de saída

A listagem de todas as propriedades calculadas é a seguinte:

- ◁ Densidade da estrela ρ_A;
- ◁ Massa de Southworth da estrela $M_{\mathrm{A,Southworth}}$;
- ◁ Raio de Southworth da estrela $R_{\mathrm{A,Southworth}}$;
- ◁ Semi-amplitude de velocidade do planeta K_b;

◁ Semi-eixo maior a_{K_b};

◁ Massa da estrela M_{A,K_b};

◁ Raio da estrela R_{A,K_b};

◁ Massa do planeta M_{b,K_b};

◁ Raio do planeta R_{b,K_b};

◁ Gravidade superficial da estrela g_{A,K_b};

◁ Gravidade superficial do planeta g_{b,K_b};

◁ Densidade da estrela com K_b ρ_{A,K_b};

◁ Densidade do planeta com K_b ρ_{b,K_b};

◁ Temperatura de Equilíbrio do planeta T'_{eq};

◁ Número de Safronov do planeta Θ;

◁ Profundidade do Trânsito ΔF;

◁ Parâmetro de impacto b;

◁ Duração total do trânsito t_T;

◁ Duração da 'parte plana' do trânsito t_F.

4.2 Metodologia do código

Vamos agora mostrar os cálculos realizados dentro do programa. A partir da terceira lei de Kepler e supondo uma órbita circular, temos que

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_A + M_b)} \tag{4.1}$$

em que G é a constante gravitacional.

Assumindo que a massa da estrela M_A é muito maior que a massa do planeta M_b e sabendo que a densidade ρ_A da estrela é

$$\rho_{\rm A} = \frac{3M_{\rm A}}{4\pi R_{\rm A}^3} \tag{4.2}$$

chegamos em

$$\rho_{\rm A} = \frac{3\pi}{GP^2 r_{\rm A}^3}\,. \tag{4.3}$$

A partir da Equação 4.3 podemos calcular a massa e o raio da estrela por leis empíricas como mostrado por Torres et al. (2010), Enoch et al. (2010) e Southworth (2011). Adotamos no código as leis de Southworth (2011) obtidas por ajustes polinomiais usando $T_{\rm eff}$, $\log\rho$ e $[\frac{\rm M}{\rm H}]$ como:

$$\log M_{\rm A,Southworth} = c_1 + c_2\log X + c_3(\log X)^2 + c_4\log\rho + c_5(\log\rho)^2 + c_6\left[\frac{\rm M}{\rm H}\right] \tag{4.4}$$

$$\log R_{\rm b,Southworth} = c_1 + c_2\log X + c_3(\log X)^2 + c_4\log\rho + c_5(\log\rho)^2 + c_6\left[\frac{\rm M}{\rm H}\right] \tag{4.5}$$

em que $X = \log T_{\rm eff}/T_{\rm eff,\odot}$, $T_{\rm eff,\odot} = 5781$ K. Os coeficientes c_i utilizados foram retirados de Southworth (2011, Tabela 1) para o intervalo de 0.2 a 3 $M_\odot$.

Buscando calcular outras propriedades físicas do sistema binário, devemos determinar $K_{\rm b}$. Segundo Southworth (2009), utilizando a terceira lei de Kepler, as definições de raio fracionado, gravidade de superfície e densidade e manipulações matemáticas podemos chegar nas equações:

$$a = a_{\rm A} + a_{\rm b} = \left(\frac{P}{2\pi}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin i}(K_{\rm A}+K_{\rm b}) \tag{4.6}$$

$$M_{\rm A} = \frac{1}{G}\left(\frac{P}{2\pi}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{3}{2}}}{\sin^3 i}(K_{\rm A}+K_{\rm b})^2 K_{\rm b} \tag{4.7}$$

$$M_{\rm b} = \frac{1}{G}\left(\frac{P}{2\pi}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{3}{2}}}{\sin^3 i}(K_{\rm A}+K_{\rm b})^2 K_{\rm A} \tag{4.8}$$

$$R_{\rm A} = r_{\rm A}a = \left(\frac{P}{2\pi}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin i} r_{\rm A}(K_{\rm A}+K_{\rm b}) \tag{4.9}$$

$$R_{\rm b} = r_{\rm b}a = \left(\frac{P}{2\pi}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin i} r_{\rm b}(K_{\rm A}+K_{\rm b}) \tag{4.10}$$

$$g_{\rm A} = \frac{GM_{\rm A}}{R_{\rm A}^2} = \left(\frac{2\pi}{P}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin i}\frac{K_{\rm b}}{r_{\rm A}^2} \tag{4.11}$$

$$g_{\rm b} = \frac{GM_{\rm b}}{{R_{\rm b}}^2} = \left(\frac{2\pi}{P}\right)\frac{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin i}\frac{K_{\rm A}}{{r_{\rm b}}^2} \tag{4.12}$$

$$\rho_{\rm A} = \frac{M_{\rm A}}{R_{\rm A}^3} = \frac{1}{G}\left(\frac{2\pi}{P}\right)^2\frac{1}{{r_{\rm A}}^3}\frac{K_{\rm b}}{(K_{\rm A}+K_{\rm b})} \tag{4.13}$$

$$\rho_{\rm b} = \frac{M_{\rm b}}{R_{\rm b}^3} = \frac{1}{G}\left(\frac{2\pi}{P}\right)^2\frac{1}{{r_{\rm b}}^3}\frac{K_{\rm A}}{(K_{\rm A}+K_{\rm b})}\,. \tag{4.14}$$

Para o cálculo de $K_{\rm b}$ utilizamos as equações 4.7 e 4.9. O cálculo é recursivo, e é interrompido quando encontramos o melhor $K_{\rm b}$ que minimiza o χ^2 para a massa e o raio da estrela pela equação:

$$\chi^2 = \left(\frac{M_{\rm A} - M_{\rm A,Southworth}}{\sigma_{M_{\rm A,Southworth}}}\right)^2 + \left(\frac{R_{\rm A} - R_{\rm A,Southworth}}{\sigma_{R_{\rm A,Southworth}}}\right)^2 \tag{4.15}$$

em que σ_x representa incerteza na quantidade x. O erro de $K_{\rm b}$ é calculado utilizando o intervalo de $\chi^2 + 1$.

A partir de $K_{\rm b}$ podemos calcular a partir das Equações 4.6 a 4.14, o semi-eixo maior $a_{K_{\rm b}}$, as massas $M_{\rm A,K_b}$ e $M_{\rm b,K_b}$, raios $R_{\rm A,K_b}$ e R_{b,K_b}, gravidades de superfície $g_{\rm A,K_b}$ e $g_{\rm b,K_b}$ e densidades $\rho_{\rm A,K_b}$ e $\rho_{\rm b,K_b}$ para a estrela e o planeta.

Utilizando a Southworth (2011, Equações 4 e 5) podemos calcular a temperatura de equilíbrio $T_{\rm eq}^{'}$ do planeta como:

$$T_{\rm eq}^{'} = T_{\rm eff}\sqrt{\left(\frac{R_{\rm A}}{2a}\right)} = T_{\rm eff}\sqrt{\left(\frac{r_{\rm A}}{2}\right)} \tag{4.16}$$

e o número de Safronov Θ definido em termos da velocidade de escape da superfície do planeta $V_{\rm esc}^2 = \frac{2GM_{\rm b}}{R_{\rm b}}$ e da velocidade orbital do planeta em torno da estrela $V_{\rm orb}^2 = \frac{GM_{\rm A}^2}{a(M_{\rm A}+M_{\rm b})}$ como:

$$\Theta = \frac{1}{2}\left(\frac{V_{\rm esc}}{V_{\rm orb}}\right)^2 = \left(\frac{a}{R_{\rm b}}\right)\left(\frac{M_{\rm b}}{M_{\rm A}}\right) = \frac{1}{r_{\rm b}}\frac{M_{\rm b}}{M_{\rm A}} \tag{4.17}$$

ele fornece uma medida da capacidade que um planeta tem de espalhar gravitacionalmente outros corpos no mesmo sistema.

Por último, utilizando equações analíticas de Seager e Mallén-Ornelas (2003) que descrevem a curva de luz do trânsito podemos determinar a profundidade do trânsito ΔF, o parâmetro de impacto b, a duração do trânsito total $t_{\rm T}$ e a duração da parte 'plana' do trânsito $t_{\rm F}$, identificados na Figura 4.1 e calculados como:

$$\Delta F = \left(\frac{R_\mathrm{b}}{R_\mathrm{A}}\right)^2 \tag{4.18}$$

$$\frac{\sin t_\mathrm{F}\pi/P}{\sin t_\mathrm{T}\pi/P} = \sqrt{\frac{\left[1-(R_\mathrm{b}/R_\mathrm{A})\right]^2 - \left[a/R_\mathrm{A}\cos i\right]^2}{\left[1+(R_\mathrm{b}/R_\mathrm{A})\right]^2 - \left[a/R_\mathrm{A}\cos i\right]^2}} \tag{4.19}$$

$$t_\mathrm{T} = \frac{P}{\pi}\arcsin\left(\frac{R_\mathrm{A}}{a}\sqrt{\frac{\left[1+(R_\mathrm{b}/R_\mathrm{A})\right]^2 - \left[a/R_\mathrm{A}\cos i\right]^2}{1-\cos^2 i}}\right) \tag{4.20}$$

$$b = \frac{a}{R_\mathrm{A}}\cos i \tag{4.21}$$

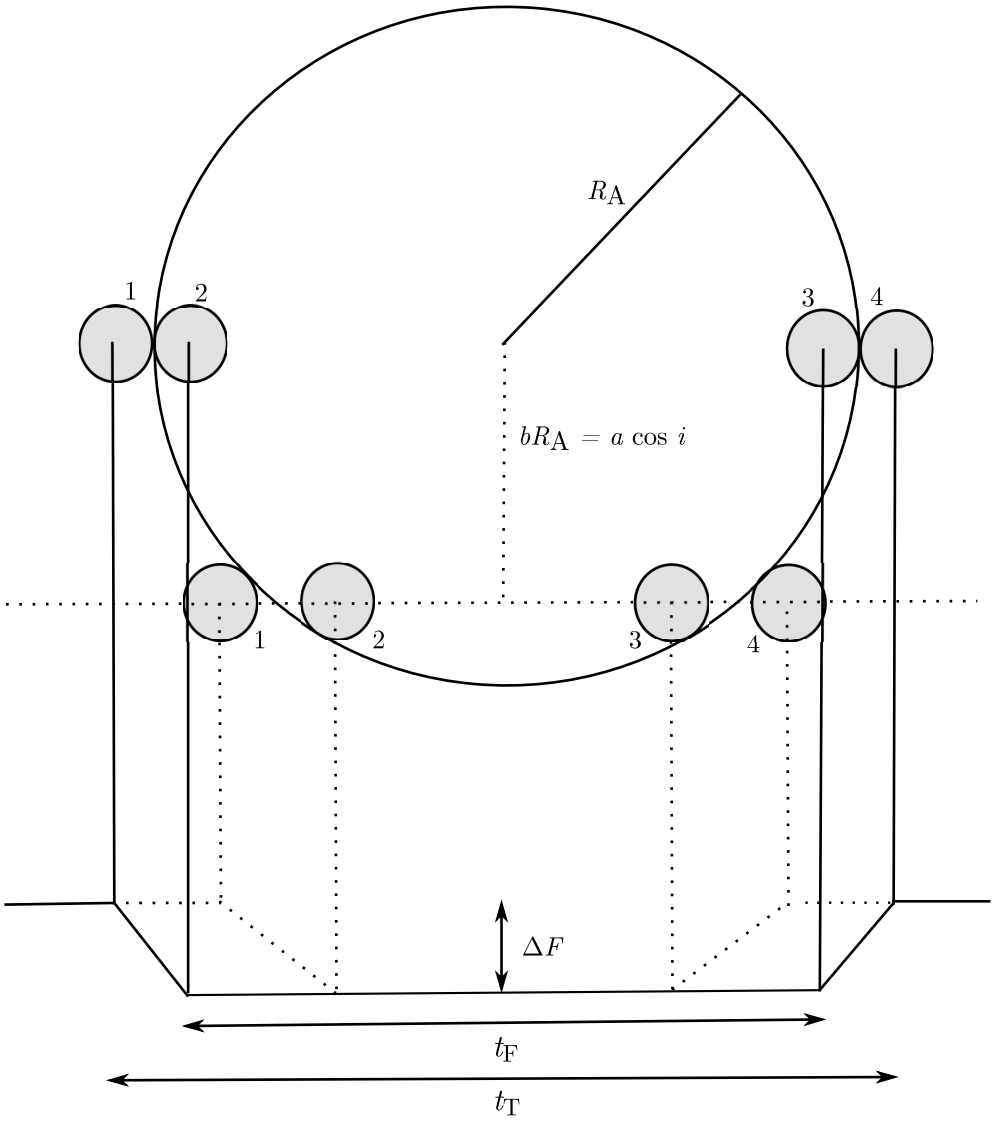

Figura 4.1: Definição de parâmetros geométricos do trânsito. Foram esboçadas duas curvas de trânsito (pontilhada e sólida) na parte inferior referentes às duas passagens ilustradas. Os números indicam a ordem do movimento do planeta. Imagem adaptada de Seager e Mallén-Ornelas (2003).

4.3 Resultados

Utilizando os dados obtidos na análise de velocidades radiais (Capítulo 2) e de trânsitos (Capítulo 3), iremos calcular os parâmetros absolutos descritos no início deste capítulo.

Os parâmetros de entrada relativos ao espectro foram retirados dos artigos de descoberta. Para CoRoT-6b, foram utilizados espectros sintéticos calculados com o pacote SME 2.1 (Valenti e Piskunov, 1996, *Spectroscopy Made Easy*), a temperatura efetiva $T_{\rm eff}$ é de 6090 $\pm$ 70 K e a metalicidade $\left[\frac{\rm M}{\rm H}\right]$ é de -0.20 $\pm$ 0.1 dex. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-6b obtidos com o código SOUTHWORTH_PROPAG a partir das observaçõs fotométricas do trânsito e velocidades radiais, e comparações com Fridlund et al. (2010).

	Neste trabalho	Fridlund et al. (2010)
Densidade da estrela $\rho_{\rm A}$ (gm^{-3})	1.35 ± 0.18	
Massa de Southworth da estrela $M_{\rm A,Southworth}$ ($M_\odot$)	1.01 ± 0.05	
Raio de Southworth da estrela $R_{\rm A,Southworth}$ ($R_\odot$)	1.025 ± 0.055	
Semi-amplitude de velocidade do planeta $K_{\rm b}$ (kms^{-1})	103.1 ± 1.8	
Semi-eixo maior $a_{K_{\rm b}}$ (UA)	0.084 ± 0.002	0.0855 ± 0.0015
Massa da estrela $M_{\rm A,K_b}$ ($M_\odot$)	1.01 ± 0.06	1.05 ± 0.05
Raio da estrela $R_{\rm A,K_b}$ ($R_\odot$)	1.017 ± 0.049	1.025 ± 0.026
Massa do planeta $M_{\rm b,K_b}$ ($M_{\rm Jup}$)	2.74 ± 0.22	2.96 ± 0.34
Raio do planeta R_{b,K_b} ($R_{\rm Jup}$)	1.08 ± 0.62	1.166 ± 0.035
Gravidade de superfície da estrela $\log g_{\rm A,K_b}$ (dex)	4.43 ± 0.03	
Gravidade de superfície do planeta $\log g_{\rm b,K_b}$ (dex)	3.76 ± 0.08	
Densidade da estrela com K_b $\rho_{\rm A,K_b}$ (gm^{-3})	1.35 ± 0.21	
Densidade do planeta com K_b $\rho_{\rm b,K_b}$ (gm^{-3})	2.17 ± 3.73	2.32 ± 0.31
Temperatura de Equilíbrio do planeta $T'_{\rm eq}$ (K)	1020.5 ± 25.4	1017 ± 19
Número de Safronov do planetaΘ	0.42 ± 0.25	
Profundidade do Trânsito ΔF	0.012 ± 0.014	
Parâmetro de impacto b	0.12 ± 0.34	0.291 ± 0.091
Duração total do trânsito $t_{\rm T}$ (dias)	0.175 ± 0.021	
Duração da 'parte plana' do trânsito $t_{\rm F}$ (dias)	0.140 ± 0.017	

Os parâmetros atmosféricos da estrela do objeto CoRoT-20b foram obtidos de Deleuil et al. (2012). Eles usaram o pacote de análise de comprimentos de onda VWA de Bruntt et al. (2004), obtendo para temperatura efetiva $T_{\rm eff}$ e metalicidade $\left[\frac{\rm M}{\rm H}\right]$, os valores de 5880 $\pm$ 90 K e 0.14 $\pm$ 0.05, respectivamente. Os resultados obtidos a partir do código SOUTHWORTH_PROPAG podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Analisando a Tabela 4.2 percebemos alguns valores discrepantes, principalmente os de densidade. Esses valores são afetados principalmente pelas estimativas da soma dos raios fracionados $r_{\rm A} + r_{\rm b}$ e a razão dos mesmos $k = r_{\rm b}/r_{\rm A}$, obtidos do ajuste do trânsito. Isto serve de alerta, pois aparentemente os dados fotométricos de CoRoT-20b estavam bem

Tabela 4.2 - Conjuto de parâmetros do objeto CoRoT-20b obtidos com o código SOUTHWORTH_PROPAG a partir das observaçõs fotométricas do trânsito e velocidades radiais, e comparações com Deleuil et al. (2012).

	Neste trabalho	Deleuil et al. (2012)
Densidade da estrela $\rho_{\rm A}$ (gm^{-3})	3.87 ± 2.74	$1.51^{+0.15}_{-0.17}$
Massa de Southworth da estrela $M_{\rm A,Southworth}$ ($M_\odot$)	0.95 ± 0.09	
Raio de Southworth da estrela $R_{\rm A,Southworth}$ ($R_\odot$)	0.71 ± 0.35	
Semi-amplitude de velocidade do planeta $K_{\rm b}$ (kms^{-1})	119.2 ± 4.3	
Semi-eixo maior $a_{K_{\rm b}}$ (UA)	0.078 ± 0.004	0.0902 ± 0.0021
Massa da estrela $M_{\rm A,K_b}$ ($M_\odot$)	0.95 ± 0.12	1.14 ± 0.085
Raio da estrela $R_{\rm A,K_b}$ ($R_\odot$)	0.64 ± 0.16	1.02 ± 0.05
Massa do planeta $M_{\rm b,K_b}$ ($M_{\rm Jup}$)	3.80 ± 0.43	4.24 ± 0.23
Raio do planeta R_{b,K_b} ($R_{\rm Jup}$)	0.367 ± 0.085	0.84 ± 0.04
Gravidade de superfície da estrela $\log g_{\rm A,K_b}$ (dex)	4.80 ± 0.29	4.20 ± 0.15
Gravidade de superfície do planeta $\log g_{\rm b,K_b}$ (dex)	4.85 ± 0.30	
Densidade da estrela com K_b $\rho_{\rm A,K_b}$ (gm^{-3})	5.05 ± 3.71	
Densidade do planeta com K_b $\rho_{\rm b,K_b}$ (gm^{-3})	109 ± 76	8.87 ± 1.10
Temperatura de Equilíbrio do planeta $T'_{\rm eq}$ (K)	816 ± 97	1002 ± 24
Número de Safronov do planetaΘ	1.69 ± 0.482	
Profundidade do Trânsito ΔF	0.0034 ± 0.0023	
Parâmetro de impacto b	0.59 ± 0.61	0.26 ± 0.08
Duração total do trânsito $t_{\rm T}$ (dias)	0.100 ± 0.064	
Duração da 'parte plana' do trânsito $t_{\rm F}$ (dias)	0.083 ± 0.053	

ajustados, sendo assim, objetos com poucas observações ou com grande dispersão devem ser analisados com maior cuidado, sendo interessante a comparação com métodos de análise diferentes. Outra causa, pode ser a excentricidade da órbita, pois foi suposta uma órbita circular no cálculo da terceira lei de Kepler. Seria iteressante fazer um estudo da influência disso nos resultados analisados e se a correção, adotando uma órbita excêntrica, elimina os erros.

Capítulo 5

Considerações finais

Utilizando dados fotométricos e de velocidades radiais realizamos a caracterização de dois objetos da missão CoRoT, os planetas CoRoT-6b e CoRoT-20b.

A partir das análises desses dados, concluímos que CoRoT-6b, considerado um 'Júpiter quente' possui raio de 1.08 $\pm$ 0.62 R_{Jup}, massa de 2.74 $\pm$ 0.22 M_{Jup} e semi-eixo maior de 0.084 $\pm$ 0.002 UA. Sua órbita é praticamente esférica com excentricidade 0.076, típico dessa classe de planetas. E seu período orbital é de 8.88661 $\pm$ 0.00004 dias.

CoRoT-20b é um planeta gigante com massa de 3.80 $\pm$ 0.43 M_{Jup}. Seu período orbital é de 9.2432 ± 0.0008 dias e sua excentricidade é 0.647.

No Capítulo 2, utilizamos a Equação 2.8 para ajustes dos dados de velocidade radial em função do tempo, os dados foram bem ajustados, fornecendo os valores apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2. Uma ressalva foi feita ao uso do ajuste para observações bem espaçadas, como do objeto CoRoT-33b, sendo interessante adaptar a equação em função da fase.

No Capítulo 3, mostramos o tratamento da curva de luz para o objeto CoRoT-33b, fazendo o ajuste da Equação 3.1 para 1 $P_{\rm rot}$, para anular o período de rotação estelar. Os resíduos desses ajustes foram analisados pelo código JKTEBOP (Southworth, 2008) e os resultados são apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. Para CoRoT-20b o código foi bastante sensível aos parâmetros de entrada, sendo que os coeficientes da lei de escurecimento de limbo tiveram seus valores fixados. É provável que a dispersão nos dados cause esse tipo de problema no ajuste, sendo necessária a comparação com outros métodos e análises para que melhores resultados sejam obtidos.

A partir dos parâmetros calculados, uma série de outros parâmetros absolutos foram determinados a partir da metodologia descrita no Capítulo 4. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Para o objeto CoRoT-6b, todos os parâmetros são

compatíveis dentro de $\pm$ 3 σ com Fridlund et al. (2010), já para CoRoT-20b, grande parte dos parâmetros foram discrepantes, o que pode ser causado pela dispersão dos dados de trânsito e a dificuldade na convergência do ajuste ou pela alta excentricidade do objeto.

Por último, nossa intenção foi apresentar um método de análise para objetos do CoRoT tendo em vista que uma grande quantidade de dados de estrelas da Galáxia foi liberada ao público pelo grupo responsável (CoRoT Team, 2016). Esses dados compõem uma grande fonte de conhecimento, em especial permitindo o estudo estatístico a partir da distribuição de exoplanetas no espaço paramétrico. Por isso a dedução de vários parâmetros foi implementada. O que ressaltamos nesse trabalho, é que está análise deve ser realizada cuidadosamente, levando em conta as particularidades de cada exoplaneta.

Referências Bibliográficas

Baglin A., Auvergne M., Boisnard L., Lam-Trong T., Barge P., Catala C., Deleuil M., Michel E., Weiss W., CoRoT: a high precision photometer for stellar ecolution and exoplanet finding. In 36th COSPAR Scientific Assembly , vol. 36 of COSPAR Meeting, 2006

Beaugé C., Ferraz-Mello S., Michtchenko T. A., , 2007 Planetary Masses and Orbital Parameters from Radial Velocity Measurements. p. 1

Bruntt H., Bikmaev I. F., Catala C., Solano E., Gillon M., Magain P., Van't Veer-Menneret C., Stütz C., Weiss W. W., Ballereau D., Bouret J. C., Charpinet S., Hua T., Katz D., Lignières F., Lueftinger T., Abundance analysis of targets for the COROT/MONS asteroseismology missions. II. Abundance analysis of the COROT main targets, A&A, 2004, vol. 425, p. 683

CoRoT Team The CoRoT Legacy Book: The adventure of the ultra high precision photometry from space, by the CoRot Team, 2016

Csizmadia S., Hatzes A., Gandolfi D., Deleuil M., Bouchy F., Fridlund M., Szabados L., Parviainen H., Cabrera J., Aigrain S., Alonso R., Almenara J.-M., Baglin A., Bordé P., Bonomo A. S., Deeg H. J., Díaz R. F., Erikson A., Ferraz-Mello S., Tadeu dos Santos M., Guenther E. W., Guillot T., Grziwa S., Hébrard G., Klagyivik P., Ollivier M., Pätzold M., Rauer H., Rouan D., Santerne A., Schneider J., Mazeh T., Wuchterl G., Carpano S., Ofir A., Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVIII. CoRoT-33b, an object in the brown dwarf desert with 2:3 commensurability with its host star, A&A, 2015, vol. 584, p. A13

Deleuil M., Bonomo A. S., Ferraz-Mello S., Erikson A., Bouchy F., Havel M., Aigrain S., Almenara J.-M., Alonso R., Auvergne M., Baglin A., Barge P., Bordé P., Bruntt H., Cabrera J., Carpano S., Cavarroc C., Csizmadia S., Damiani C., Deeg H. J., Dvorak R., Fridlund M., Hébrard G., Gandolfi D., Gillon M., Guenther E., Guillot T., Hatzes A., Jorda L., Léger A., Lammer H., Mazeh T., Moutou C., Ollivier M., Ofir A., Parviainen H., Queloz D., Rauer H., Rodríguez A., Rouan D., Santerne A., Schneider J., Tal-Or L., Tingley B., Weingrill J., Wuchterl G., Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XX. CoRoT-20b: A very high density, high eccentricity transiting giant planet, A&A, 2012, vol. 538, p. A145

Enoch B., Collier Cameron A., Parley N. R., Hebb L., An improved method for estimating the masses of stars with transiting planets, A&A, 2010, vol. 516, p. A33

Etzel P. B., A Simple Synthesis Method for Solving the Elements of Well-Detached Eclipsing Systems. In Photometric and Spectroscopic Binary Systems , 1981, p. 111

Ferraz-Mello S., Estimation of Periods from Unequally Spaced Observations, AJ, 1981, vol. 86, p. 619

Fridlund M., Hébrard G., Alonso R., Deleuil M., Gandolfi D., Gillon M., Bruntt H., Alapini A., Csizmadia S., Guillot T., Lammer H., Aigrain S., Almenara J. M., Auvergne M., Baglin A., Barge P., Bordé P., Bouchy F., Cabrera J., Carone L., Carpano S., Deeg H. J., de La Reza R., Dvorak R., Erikson A., Ferraz-Mello S., Guenther E., Gondoin P., den Hartog R., Hatzes A., Jorda L., Léger A., Llebaria A., Magain P., Mazeh T., Moutou C., Ollivier M., Pätzold M., Queloz D., Rauer H., Rouan D., Samuel B., Schneider J., Shporer A., Stecklum B., Tingley B., Weingrill J., Wuchterl G., Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. IX. CoRoT-6b: a transiting “hot Jupiter” planet in an 8.9d orbit around a low-metallicity star, A&A, 2010, vol. 512, p. A14

Giménez A., Equations for the analysis of the light curves of extra-solar planetary transits, Astronomy and Astrophysics, 2006, vol. 450, p. 1231

Giménez A., Equations for the analysis of the light curves of extra-solar planetary transits, Astronomy and Astrophysics, 2007, vol. 474, p. 1049

Henry G. W., Marcy G. W., Butler R. P., Vogt S. S., A Transiting "51 Peg-like" Planet, ApJ, 2000, vol. 529, p. L41

Kopal Z., Detailed effects of limb darkening upon light and velocity curves of close binary systems, Harvard College Observatory Circular, 1950, vol. 454, p. 1

Kovács G., Zucker S., Mazeh T., A box-fitting algorithm in the search for periodic transits, Astronomy and Astrophysics, 2002, vol. 391, p. 369

Lang K. R., Astrophysical Formulae. A Compendium for the Physicist and Astrophysicist., 1980, 46

Lindegren L., Dravins D., The fundamental definition of "radial velocity", A&A, 2003, vol. 401, p. 1185

Mandel K., Agol E., Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches, The Astrophysical Journal, 2002, vol. 580, p. L171

Mayor M., Queloz D., A Jupiter-mass companion to a solar-type star, Nature, 1995, vol. 378, p. 355

Murray C. D., Dermott S. F., Solar system dynamics, 1999

Parviainen H., , 2015 PyTransit: Transit light curve modeling Astrophysics Source Code Library

Popper D. M., Etzel P. B., Photometric orbits of seven detached eclipsing binaries, Astronomy and Astrophysics, 1981, vol. 86, p. 102

Seager S., Mallén-Ornelas G., A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve, ApJ, 2003, vol. 585, p. 1038

Sing D. K., VizieR Online Data Catalog: Stellar Limb-Darkening Coefficients (Sing, 2010), VizieR Online Data Catalog, 2010, vol. 351

Southworth J., Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - I. Light-curve analyses, MNRAS, 2008, vol. 386, p. 1644

Southworth J., Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - II. Physical properties, MNRAS, 2009, vol. 394, p. 272

Southworth J., Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - IV. Thirty systems with space-based light curves, MNRAS, 2011, vol. 417, p. 2166

Torres G., Andersen J., Giménez A., Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications, A&A Rev., 2010, vol. 18, p. 67

Valenti J. A., Piskunov N., Spectroscopy made easy: A new tool for fitting observations with synthetic spectra., A&AS, 1996, vol. 118, p. 595

Apêndice

Apêndice A

Conjunto de dados de velocidade radial

A.1 CoRoT-6b

Tabela A.1 - Velocidades radiais de CoRoT-6b medidas com o espectrógrafo SOPHIE. Os dados foram retirados de Fridlund et al. (2010).

BJD (2454000)	Velocidade radial ($km\,s^{-1}$)	$\pm 1\,\sigma$ ($km\,s^{-1}$)
642.5591	-18.465	0.066
646.4820	-17.967	0.039
679.4155	-18.345	0.044
681.4542	-17.999	0.048
685.3983	-18.510	0.050
689.4129	-18.202	0.063
700.3532	-18.011	0.048
702.3841	-18.333	0.072
704.3410	-18.469	0.044
706.3593	-18.229	0.041
707.3968	-18.041	0.040
711.3270	-18.341	0.049
712.3234	-18.525	0.060
715.4002	-18.321	0.059

A.2 CoRoT-20b

Tabela A.2 - Velocidades radiais de CoRoT-20b. Os dados foram retirados de Deleuil et al. (2012).

Data	HJD	Velocidade radial ($km\,s^{-1}$)	$\pm 1\,\sigma$ ($km\,s^{-1}$)	Espectrógrafo
2010-12-09	55540.70645	60.728	0.0169	HARPS
2010-12-14	55545.75533	60.353	0.0138	HARPS
2011-01-12	55574.60927	60.453	0.0119	HARPS
2011-01-16	55578.64264	60.985	0.0285	HARPS
2011-01-21	55583.64035	60.443	0.0334	HARPS
2011-01-28	55590.66159	60.320	0.0234	HARPS
2011-01-16	55578.41934	60.813	0.0385	SOPHIE
2011-01-17	55579.41057	61.048	0.0532	SOPHIE
2011-02-04	55597.44200	60.948	0.0213	SOPHIE
2011-02-05	55598.38017	61.077	0.0175	SOPHIE
2011-02-06	55599.39134	60.267	0.0183	SOPHIE
2011-01-06	55568.55091	60.611	0.032	FIES
2011-01-08	55570.59973	61.090	0.060	FIES
2011-01-18	55580.60213	60.260	0.036	FIES
2011-01-19	55581.56506	60.146	0.034	FIES