



Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Faculdade de Ciências Exatas e Naturais - FANAT
Departamento de Física
Programa de Pós-Graduação em Física

José Nacizo Holanda Luciano Junior

Análise de binárias eclipsantes com dados da
Missão *Kepler* usando o código JKTEBOP

Mossoró

2017

José Nacizo Holanda Luciano Junior

**Análise de binárias eclipsantes com dados da Missão
Kepler usando o código JKTEBOP**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Física da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM FÍSICA

Orientador: Prof. Dr. José Ronaldo Pereira da Silva

Mossoró

2017

Ficha catalográfica gerada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas
e Diretoria de Informatização (DINF) - UERN,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L937a Luciano Junior, José Nacizo Holanda.
Análise de binárias eclipsantes com dados da Missão Kepler
usando o código JKTEBOP / José Nacizo Holanda Luciano Junior -
2017.
102 p.

Orientador: José Ronaldo Pereira da Silva.
Coorientador: .
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio Grande do
Norte, Programa de Pós-Graduação em Física, 2017.

1. astrofísica estelar. 2. curva de luz. 3. parâmetros estelares. 4.
sistemas binários eclipsantes. I. Silva, José Ronaldo Pereira da,
orient. II. Título.

José Nacizo Holanda Luciano Junior

**Análise de binárias eclipsantes com dados da Missão
Kepler usando o código JKTEBOP**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Física da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM FÍSICA

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Ronaldo Pereira da Silva

Orientador

UERN

Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno

Examinador externo

UFERSA

Prof. Dr. Bráulio Batista Soares

Examinador interno

UFRN

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. José Ronaldo pela orientação e paciência na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Nilson Senna pelas lições de Física. Sem dúvida um grande exemplo de profissional a quem devo parte do meu amadurecimento intelectual e pessoal.

Ao professor Dr. Edésio Miguel pelas lições de Física e pela referência de bom profissional.

Ao professor Dr. Bráulio Soares pelo apoio e lições de Astrofísica.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós-graduação em Física da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte pelos conselhos, momentos de descontração e apoio nos momentos difíceis.

A Bruna Lima, minha companheira, pelo apoio incondicional.

À CAPES pela bolsa concedida, com a qual foi possível realizar este trabalho.

A todos aqueles que contribuíram com a conclusão desta dissertação.

Resumo

O presente trabalho visa analisar a eficiência do método de redes neurais para obtenção automática de elementos orbitais de sistemas binários eclipsantes a partir de curvas de luz. Para isso, selecionamos uma amostra com 100 sistemas de um total de 1412 sistemas binários eclipsantes destacados, provenientes do Catálogo de Binários Eclipsante da Missão Kepler, tratados com o método de redes neurais. Os parâmetros orbitais dos sistemas da amostra foram analisados utilizando o método tradicional de ajustes de curva de luz com incertezas estimadas pelo método de *bootstrapping*, via código JKTEBOP. Foi realizada a caracterização dos sistemas que compõem a amostra, essencialmente bem destacados, bem como a análise da correlação entre os parâmetros que apresentam correlação e anticorrelação de intensidade forte ou muito forte. Sobretudo, os valores calculados pelo métodos tradicional foram comparados com os obtidos pelo método de redes neurais para os mesmos sistemas. Os resultados mostram concordância entre os métodos para os parâmetros período ($\sim 99,6\%$), magnitude Kepler ($\sim 99,8\%$), inclinação orbital ($\sim 98\%$) e soma da fração dos raios ($\sim 63\%$), para outros, uma concordância menor a ser investigada.

Palavras-chave: astrofísica estelar; curvas de luz; parâmetros estelares; sistemas binários eclipsantes.

Abstract

The present work aims at analyzing the efficiency of the neural network method in automatic retrieval From orbital elements of eclipsing binary systems from light curves. We calculate the Orbital elements of a sample with 100 systems out of a total of 1412 eclipsing binaries detacheds, belong to the Eclipsing Catalog of the Kepler Mission, treated with the method Of neural networks. The orbital parameters of the 100 sample systems were calculated using method traditional adjustment of light curve with uncertainties estimated by the method of textit bootstrapping, via code JKTEBOP. A characterization of the systems that compose a sample, essentially well-detached, as well as an analysis of the correlation between the patterns that show correlation or anticorrelation strong or very strong intensity. Lastly, the values ââcalculated by traditional methods were compared with those obtained by Neural network method for the same systems. The results show agreement between the period ($\sim 99,6\%$), Kepler magnitude ($\sim 99,8\%$), orbital inclination ($\sim 98\%$) and sum of the fraction of the radius ($\sim 63\%$), for others parameters, a discrepancy to be investigated.

Keys words: stellar astrophysics; light curves; stellar parameters; eclipsing binaries systems.

Sumário

Lista de Tabelas	i
Lista de Figuras	iv
1 Introdução	1
2 Sistemas Binários	3
2.1 Sistemas Binários Visuais	3
2.2 Sistemas Binários Astrométricos	4
2.3 Sistemas Binários Espectroscópicos	5
2.4 Sistemas Binários Eclipsantes	7
2.4.1 Sistemas binários de semicontato	9
2.4.2 Sistemas binários de contato	10
2.4.3 Sistemas binários destacados	11
2.5 Curvas de Luz	12
2.5.1 Algol	12
2.5.2 β Lyrae	13
2.5.3 W UMa	13
2.6 Parâmetros de Sistemas Binários	14
3 O Código JKTEBOP	18
4 Metodologia	24
4.1 Missão Kepler	24
4.2 Catálogo de Binários Eclipsantes	26

4.2.1	EBAI	28
4.3	Temperaturas individuais	29
4.4	Gravidade superficial e metalicidade	30
4.5	Amostra	30
4.5.1	Sistemas descartados	31
4.6	Ajustes	37
5	Resultados	43
5.1	Amostra contra Catálogo	43
5.2	Correlações	53
5.3	Caracterização estatística da amostra	61
6	Conclusão e Perspectivas	72
6.1	Conclusões	72
6.2	Perspectivas	73
A	Tabelas com os principais parâmetros obtidos nesta Dissertação	74
	Bibliografia	83

Lista de Tabelas

- 2.1 A tabela sintetiza tipos de sistemas binários e parâmetros que podemos obter para cada caso. “s”, “n” e “p” significam, respectivamente, “sim, é possível obter”, “não é possível obter” e “sim, mas em casos particulares”. Das abreviaturas na primeira linha, entende-se: BV, binárias visuais; BA, binárias astrométricas; BE1, binárias espectroscópicas de uma linha; BE2, binárias espectroscópicas de duas linhas; e BEC, binárias eclipsantes. “*” refere-se a órbita absoluta e “**” infere-se para as estrelas da sequência principal. Fonte: Manceroni, 2006. 16
- 2.2 A tabela refere-se aos parâmetros que podem ser obtidos em binárias eclipsantes a partir de cinco combinações de curva de luz e curva de velocidade radial. Os parâmetros são: a , é o semieixo maior da órbita; i , a inclinação da órbita; M , a massa da estrela; R , o raio da estrela; L , a luminosidade da estrela; e , a excentricidade; ω , a longitude do periastro; T , o período orbital; q_{sp} , a razão de massa espectroscópica; q_{ph} , a razão de massa fotométrica; i , a inclinação orbital; g , a aceleração gravitacional; A , o albedo; x , o coeficiente de escurecimento do limbo; l_3 , a terceira luz do sistema; e T , a temperatura efetiva da estrela. Fonte: Kallrath & Milone, 2009. 17
- 3.1 Os parâmetros explorados pelo código JKTEBOP quando se dispõe apenas da curva de luz. 23
- 4.1 O teste de Anderson-Darling para os parâmetros período e magnitude. A segunda coluna refere-se a probabilidade de significância com ajuste nas caldas. 31

4.2	Tabela com classificação de descartes. Os sistemas de KIC classificados em “sem ajuste” estão assinalados com “S” e os sistemas classificados em “contaminação” estão assinalados com “C”.	32
4.3	Exemplo de parâmetros obtidos com o JKTEBOP para os sistemas de KIC 4851464, 5115178, 8314801 e 8879915. As barras de erro foram estimadas pelo método de <i>bootstrapping</i> conforme a tarefa 7 do código. A tabela completa para todos os sistemas é apresentada no Apêndice.	37
5.1	Os valores de α e β e o número de sistemas para as distribuição de um dado parâmetro. A fórmula geral da regressão é expressa por $Y \sim \alpha + \beta X$, onde a variável resposta Y está atribuída ao valor divulgado pelo catálogo e a variável explanatória X está atribuída ao valor encontrado pelo código JKTEBOP. A letra σ é o desvio quadrático médio, $\%_{\text{erro}}$ o desvio percentual médio absoluto e r^2 o coeficiente de correlação linear.	51
5.2	Tabela para interpretar a intensidade do coeficiente de correlação. O valor de r_s pode variar entre +1 e -1, caracterizando uma correlação e uma anticorrelação máximas, respectivamente. A coluna da esquerda fornece o intervalo para a intensidade da correlação e a coluna da direita fornece a interpretação mais adequada para cada intervalo. Fonte: Mukaka, 2012	53
5.3	O coeficiente r_s de Spearman para diferentes combinações de parâmetros. Valores positivos quantificam a correlação direta, enquanto que valores negativos quantificam a anticorrelação. Na terceira coluna o <i>valor - p</i> relativo a um intervalo de confiança de 95%.	59
5.4	O resumo dos diagramas de caixa para os parâmetros. A segunda coluna refere-se ao primeiro quartil, a terceira coluna refere-se a mediana da amostra, enquanto que a quarta coluna refere-se ao terceiro quartil. Para ω e i os valores são dados em graus, os demais parâmetros são adimensionais.	71
A.1	Resultados da modelagem: melhor ajuste para 2σ de incerteza.	75
A.2	Continuação.	76
A.3	Continuação.	77

A.4	Continuação.	78
A.5	Continuação.	79
A.6	Continuação.	80
A.7	Continuação.	81
A.8	Continuação.	82

Lista de Figuras

2.1	Krüger 60, um sistema binário visual localizado na constelação de Cefeu. As três imagens foram obtidas pelo Observatório Fotográfico Sproul durante um período de 12 anos. Fonte: Percy, 2007.	3
2.2	A existência de companheiro invisível implica no movimento oscilatório da estrela visível em torno do centro de massa do sistema. Fonte: Carrol & Ostlie, 2006.	4
2.3	No esquema, V é a velocidade da estrela e V_r é a velocidade projetada na direção do observador. Fonte: Vitense, 1989.	5
2.4	O deslocamento periódico no espectro de uma binária espectroscópica de linha dupla pode ser compreendido em quatro etapas: (a) a estrela 1 move-se na direção do observador (deslocamento para o azul) enquanto a estrela 2 se afasta (deslocamento para o vermelho). (b) Ambas as estrelas têm velocidades perpendiculares à linha da visada (ausência de deslocamento). (c) A estrela 1 se afasta do observador (deslocamento para o vermelho) enquanto a estrela 2 se aproxima (deslocamento para o azul). (d) Novamente ambas as estrelas têm velocidades perpendiculares. λ_0 representa o comprimento de onda observado sem deslocamento Doppler. Fonte: Carroll & Ostlie, 2006.	6

2.5	Neste sistema idealizado temos estrelas de massa M e m em quatro instantes diferentes (A, B, C e D), no decorrer de suas órbitas em torno do centro de massa do sistema. Está representado acima, o deslocamento das linhas no espectro do sistemas, assim, as linhas atribuídas à estrela que se afasta sofrem deslocamento para o vermelho enquanto que as linhas atribuídas à estrela que se aproxima sofrem deslocamento para o azul. Na parte inferior da figura, temos as curvas de velocidade radial para ambas as estrelas do sistema, assim como os instantes antes mencionados. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.	7
2.6	Na ilustração, o sistema binário eclipsante é formado por uma estrela pequena (mais brilhante) e uma estrela grande (menos brilhante), abaixo, sua curva de luz. À medida que a estrela mais brilhante passa em frente da estrela maior, mais fraca, há um mínimo secundário. Quando a estrela mais brilhante passa atrás da mais fraca (à direita), há um mínimo primário. Os eventos t_1 , t_2 , t_3 , t_4 são os tempos dos quatro contatos. As letras T e T' são a duração do eclipse primário e secundário, respectivamente. Os intervalos τ e τ' são o tempo decorrido entre o segundo e terceiro contatos para o eclipse primário e secundário, respectivamente. Fonte: Percy, 2007.	8
2.7	O sistema ilustrado é formado por estrelas de 0,85 e 0,17 massas solares. A separação entre as componente é a , que assume o valor de 0,718 em raios solares. O centro de massa do binário está em \times . Os pontos L_1 , L_2 , L_3 e L_4 são pontos lagrangeanos. Fonte: Carroll & Ostlie, 2006.	9
2.8	Em sistemas binários eclipsantes de semicontato, uma das estrelas preenche por completo o seu respectivo lóbulo de Roche. Fonte: Percy, 2007.	10
2.9	Em sistemas binários eclipsantes de semicontato uma das estrelas cede massa através do primeiro ponto de lagrange. Adaptado de: Percy, 2007.	10
2.10	Em sistemas binários eclipsantes de contato, ambas as estrelas preenchem por completo os seus respectivos lóbulos de Roche. Fonte: Percy, 2007.	11
2.11	Em sistemas binários eclipsantes destacados as estrelas não preenchem por completo os seus respectivos lóbulos de Roche. Fonte: Percy, 2007.	11
2.12	Curva de luz sintética do tipo Algol, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.	12

2.13	Curva de luz sintética do protótipo β Lyrae, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.	13
2.14	Curva de luz sintética do protótipo W Ursa Majoris, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.	14
2.15	Elementos orbitais de um sistema binário. Ω é o ângulo de posição do nodo ascendente (medido no plano tangente) ou o ângulo de posição da linha de nodos. ω é o ângulo distância entre o plano orbital e a linha de nodos. N é usado para orientar o plano do céu e aponta para o norte. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.	15
3.1	Arquivo de entrada do código JKTEBOP. Neste arquivo é possível fixar (0) ou ajustar (1) parâmetros de entrada. Na primeira linha designa-se a tarefa e a largura do anel de integração, na linha seguinte são dados os valores iniciais para a soma da fração dos raios e razão dos raios.	19
3.2	O código JKTEBOP em execução. É exibido o resumo de cada Tarefa e as instruções para a construção do arquivo de entrada específicos.	20
4.1	O campo de visão da Missão Kepler. O campo observado está próximo ao plano galáctico, centrado nas coordenadas galácticas de ascensão reta igual a 19h 22m 40s e declinação igual a $44^\circ 30' 0''$. Fonte: Fraquelli Thompson, 2014.	25
4.2	As estrelas observadas com o Satélite Kepler estão situadas em uma região vizinha ao sistema solar, na Via Láctea. Aglomerados de estrelas jovens, regiões ricas em hidrogênio ionizado (HII) e regiões de distribuição de hidrogênio neutro (HI) definem os braços da Galáxia. Fonte: https://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/ , acessado em 07/12/2016.	26
4.3	A função de distribuição de probabilidades acumulada do parâmetro período. Na cor azul as estrelas do catálogo e na cor vermelha as estrelas da amostra.	32
4.4	A função de distribuição de probabilidades acumulada do parâmetro magnitude. Na cor azul as estrelas do catálogo e na cor vermelha as estrelas da amostra.	33

4.5	Sistema de <i>KIC</i> 10464078, classificado como sem ajuste. Eclipses pouco evidentes e pouca quantidade de pontos. O tempo, eixo horizontal, está graduado em Data Juliana Baricêntrica (<i>Barycentric Julian Date</i>). O eixo vertical fornece a magnitude Kepler.	34
4.6	Sistema de <i>KIC</i> 7678434, classificado como sem ajuste. Não houve convergência com valores fisicamente possíveis para esse sistema. Note que esse sistema apresenta variações pequenas de magnitude durante o eclipse e grandes variações fora do eclipse. O tempo, eixo horizontal, está graduado em Data Juliana Baricêntrica (<i>Barycentric Julian Date</i>). O eixo vertical fornece a magnitude Kepler.	35
4.7	Sistema de <i>KIC</i> 12365000, classificado como contaminação. Houve ajuste com o código, os parâmetros foram calculados, mas as incertezas e a inconsistência dos valores comprometem a análise da amostra.	36
4.8	Valores obtidos nas 1.000 simulações de <i>bootstrapping</i> para os parâmetros soma da fração dos raios, excentricidade, razão de brilho central de superfície, inclinação orbital, razão dos raios e razão de luminosidade, referentes ao sistema de <i>KIC</i> 4851464.	38
4.9	Curva de luz do sistema de <i>KIC</i> 4851464.	39
4.10	Curva de luz do sistema de <i>KIC</i> 8879915.	40
4.11	Curva de luz do sistema de <i>KIC</i> 83144801.	41
4.12	Curva de luz do sistema de <i>KIC</i> 8879915.	42
5.1	O período orbital para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha. A reta de regressão linear, para este parâmetro, coincide visualmente com a reta de igualdade. Os 83 sistemas selecionados contam com períodos divulgados no catálogo de binários eclipsantes.	44

5.2	Distribuição do parâmetro magnitude para sistemas da amostra (X) e catálogo (Y). A reta de igualdade e a reta de regressão linear coincidem visualmente. As barras de erro, da ordem de 10^{-4} , são relativas a um intervalo de confiança de 2σ	45
5.3	Parâmetro $e \sin \omega$ para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha e a regressão linear é dada pela reta de cor azul. As barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 2σ	47
5.4	Parâmetro $e \cos \omega$ para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha e a reta de regressão linear representada na cor azul. As barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 2σ	48
5.5	A inclinação orbital para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha.	50
5.6	A distribuição do parâmetro soma da fração dos raios, com valores encontrados para amostra (X) e divulgados pelo catálogo (Y). Em cor vermelha a reta de igualdade, na cor azul a reta de regressão linear.	52
5.7	Os parâmetros período (P) e soma da fração dos raios ($r_a + r_b$) apresentam uma anticorrelação muito forte ($r_s = -0,91$). O período orbital, dado em dias, é o tempo decorrido entre dois mínimos primários de luz.	54
5.8	A relação entre a soma da fração dos raios e a probabilidade de detecção do eclipse no sistema binário. A linha tracejada equivale a posição que os sistemas ocupariam ou ocupam, para um valor nulo de excentricidade.	55
5.9	A distribuição dos parâmetros soma da fração dos raios e período orbital, com logaritmo. A reta de regressão está traçada em cor azul e apresenta coeficiente angular igual a 0,64.	56
5.10	Distribuição do período orbital e excentricidade. As curvas assumem valores diferentes para o <i>cutoff</i> (P_c), período o qual as órbitas em sua maioria sofrem circularização. O coeficiente de correlação de Spearman é 0,76 e as barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 1σ	58

5.11	Distribuição do módulo de $e \cos \omega$ e fração do raio da componente primária do sistema binário. A reta tracejada na cor vermelha delimita as órbitas semicirculares ($e < 0,05$) das órbitas excêntricas. A extremidade inferior das barras de erro foi truncada, para $ e \cos \omega $	60
5.12	A soma da fração dos raios é definida por $r_a + r_b = \frac{R_a + R_b}{a}$, onde a é o semieixo maior da órbita.	62
5.13	A razão dos raios k é definida por $k = \frac{R_b}{R_a}$, isto é, o raio da componente secundária dividido pelo raio da componente primária.	63
5.14	A inclinação orbital dos 78 sistemas que compõem a amostra de binários eclipsantes destacados. Há uma grande ocorrência de binários eclipsantes com inclinação orbital entre 85° e 90° . Esse comportamento é esperado pois o eclipse torna-se mais provável quando o sistema binário apresenta inclinação orbital próxima a 90° , independentemente de outros parâmetros.	64
5.15	A razão de brilho central superficial é definida por $J = \frac{J_b}{J_a}$, ou seja, o brilho central de superfície da componente secundária pelo brilho central de superfície da componente primária.	65
5.16	Gráficos com o perfil de magnitude da amostra. No diagrama, a mediana assume o valor de 14,8. Os valores mais prováveis de magnitude estão entre 13,67 e 15,51.	66
5.17	Período orbital da amostra de 83 sistemas. O período é um parâmetro de extrema importância pois apresenta covariância com parâmetros orbitais. . .	67
5.18	A razão de luminosidade é definida por $\frac{L_b}{L_a}$, isto é, a luminosidade da componente secundária pela luminosidade da componente primária. Além de evidenciar que as componentes primárias são mais luminosas que as componentes secundárias, é um parâmetro que se correlaciona muito fortemente com a razão dos raios.	68
5.19	Excentricidade da amostra de 78 sistemas assume valores prováveis entre 0,05 e 0,48. A mediana apresenta valor de 0,23.	69
5.20	A longitude do periastro apresenta bimodalidade e mediana em $142,0661^\circ$. .	70

Capítulo 1

Introdução

Estima-se que pelo menos metade de todas as estrelas da nossa galáxia estejam em sistemas múltiplos, ou seja, sistemas formados por duas ou mais estrelas orbitando um centro de massa comum [1]. Esse fato faz das estrelas binárias um tema estatisticamente relevante para a Astrofísica. Medidas espectroscópicas combinadas com medidas fotométricas, em sistemas binários eclipsantes, constituem uma forma direta de se obter medidas precisas da massa e do raio das estrelas e tais parâmetros são fundamentais para testes de modelos de estrutura e evolução estelar [2]. Nos últimos cinco anos, o número de medidas de curvas de luz de sistemas binários eclipsantes aumentou significativamente graças ao lançamento dos telescópios espaciais CoRoT (*CO*nvection, *RO*tation and *PL*anetary *TR*ansit - ESA/CNES)¹ e Kepler (NASA)², que disponibilizaram uma grande quantidade de dados observacionais para esses sistemas. O telescópio espacial PLATO (*PL*Anetary *TR*ansits and *OS*cillations of *ST*ars - ESA)³, previsto para entrar em atividade no ano de 2024, ampliará ainda mais essa base de dados. A necessidade de analisar o grande volume de dados disponibilizados tornou imprescindível o uso de ferramentas computacionais robustas para tratamento automático desses dados. Nesse contexto, o presente trabalho faz parte de um projeto para desenvolver, implementar e utilizar ferramentas computacionais para obtenção automática de parâmetros orbitais de curvas de luz de sistemas binários eclipsantes a serem medidas pelo PLATO. A fase atual visa avaliar a eficiência do EBAI (*Eclipsing Binaries via Artificial Intelligence*)⁴ [3],

¹Convecção, Rotação e Trânsitos Planetários - Agência Espacial Europeia/ Centro Nacional de Estudos Espaciais

²Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

³Trânsito Planetário e Oscilações de estrelas - Agência Espacial Europeia

⁴Binárias Eclipsantes via Inteligência Artificial.

a rede neural treinada com curvas de luz sintéticas usada para análise de dados de sistemas binários eclipsantes provenientes da Missão Kepler. Para tal, o método tradicional foi usado no ajuste de dados de curva de luz reais, porém, apenas para sistemas binários eclipsantes destacados medidos pela Missão Kepler.

Este trabalho tem a seguinte estrutura: a introdução à teoria de sistemas binários se dá no capítulo 2, com uma explanação geral sobre sua classificação que baseia-se no método de detecção e morfologia do sistema, assim como quais parâmetros podem ser obtidos com os diferentes tipos de dados sobre esses sistemas. O capítulo 3 aborda o código JKTEBOP, ferramenta utilizada no cálculo dos elementos orbitais e razões físicas trabalhadas nesta dissertação. O capítulo 4 aborda a descrição dos objetivos gerais da Missão Kepler e as características dos dados levantados e utilizados neste trabalho, bem como os catálogos que serão avaliados com base nos valores encontrados pelo método tradicional de ajuste de curvas de luz. Os resultados são apresentados e discutidos no capítulo 5, sob três frentes: a comparação entre o método tradicional e o método de redes; a análise da correlação entre parâmetros de interesse; e a caracterização dos sistemas selecionados do catálogo de sistema binários eclipsantes da Missão Kepler. Por fim, no capítulo 6, as conclusões e perspectivas à cerca dos levantamentos realizados nesta produção.

Capítulo 2

Sistemas Binários

Um sistema binário estelar é formado por um par de estrelas que orbitam um centro de massa em comum. As estrelas que formam o sistema podem estar em contato ou até mesmo separadas por dezenas de unidades astronômicas [4]. Os sistemas binários são numerosos e por isso são de grande importância estatística, além disso, são fontes primárias para estudos relativos às propriedades fundamentais das estrelas [5].

Os Sistemas Binários recebem classificações de acordo com o método pelos quais são detectados ou estudados. Segue nas seções seguintes uma breve discussão acerca de suas principais características.

2.1 Sistemas Binários Visuais

Se duas estrelas estão visualmente próximas e a distâncias não muito diferentes da Terra, movendo-se juntas pelo espaço, elas são, provavelmente, um sistema binário verdadeiro. Caso contrário, se as estrelas estiverem a distâncias muito diferentes, o par constitui uma dupla óptica [2]. A Figura 2.1 ilustra o quão longos podem ser os períodos dos binários visuais.



Figura 2.1: Krüger 60, um sistema binário visual localizado na constelação de Cefeus. As três imagens foram obtidas pelo Observatório Fotográfico Sproul durante um período de 12 anos. Fonte: Percy, 2007.

A separação angular é um fator preponderante na detecção de binários visuais. Quanto mais próximo da Terra o sistema estiver, mais fácil é detectá-lo. Um outro fator de seleção é a diferença de magnitude entre as estrelas que formam o binário visual, especialmente se a separação angular for pequena [4].

2.2 Sistemas Binários Astrométricos

Se uma das componentes do binário for significativamente mais brilhante que a outra, a observação direta de ambas pode não ser possível. Neste caso, a existência da componente invisível pode ser deduzida através da oscilação observada no movimento da componente visível [1]. Dessa forma, assim como pode ocorrer com planetas, estrelas companheiras que participam desse tipo de sistema são detectáveis de forma indireta.

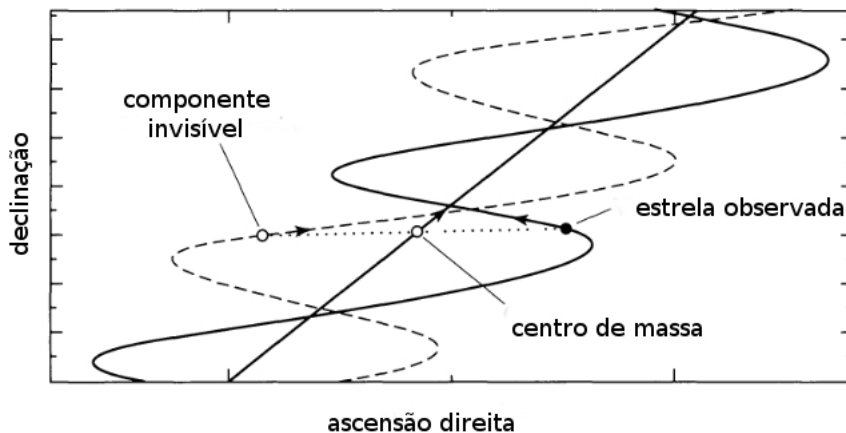


Figura 2.2: A existência de companheiro invisível implica no movimento oscilatório da estrela visível em torno do centro de massa do sistema. Fonte: Carrol & Ostlie, 2006.

Na Figura 2.2 a trajetória da estrela mais massiva oscila menos em torno da trajetória do centro de massa do sistema (reta), assim, quanto menor for a massa da companheira invisível menor é a oscilação.

A diferença entre um binário visual e um binário astrométrico pode estar no poder de resolução do equipamento utilizado na observação[5]. O critério de Raylight nos mostra que

$$\Delta = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2.1)$$

onde Δ é a separação angular dada em radianos, λ o comprimento de onda e D a abertura do telescópio.

2.3 Sistemas Binários Espectroscópicos

Se o binário apresenta estrelas muito próximas, existem meios de identificar e estudar o sistema. Por exemplo, o espectro da “estrela” pode revelar a presença de dois conjuntos diferentes de linhas de absorção - sistema binário de espectro. Caso as linhas apresentem efeito Doppler, o sistema passa a ser classificado como espectroscópico [2]. As binárias espectroscópicas podem ser de linha dupla, se apresentarem dois conjuntos de linhas a deslocar-se, ou, linha única, no caso do deslocamento de apenas um conjunto de linhas. Note, para que exista deslocamento das linhas de absorção o movimento orbital deve apresentar uma componente de velocidade na direção da linha de visada.

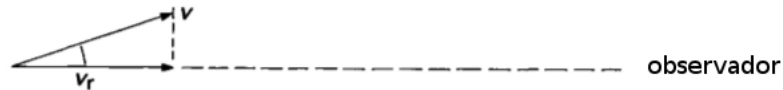


Figura 2.3: No esquema, V é a velocidade da estrela e V_r é a velocidade projetada na direção do observador. Fonte: Vitense, 1989.

O efeito Doppler é muito importante para vários ramos da astronomia. No contexto de binárias, contribui com a velocidade da estrela na linha de visada, ou a conhecida velocidade radial da estrela [6]. Se a luz da binária é emitida na direção do observador o comprimento de onda encurta uma quantidade $\Delta\lambda$, que relaciona-se com a velocidade radial da seguinte forma:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_r}{c}. \quad (2.2)$$

. Onde λ_0 é o comprimento de onda original, sem efeito Doppler, e c a velocidade de propagação da luz no vácuo. As estrelas a compor esse tipo de sistema apresentam período orbital relativamente pequeno se comparado ao de sistemas binários visuais.

Podendo ser binário espectroscópico e eclipsante, o sistema ilustrado na Figura 2.4 não exhibe deslocamento nas linhas de absorção no momento central dos mínimos de luz, isto é, no

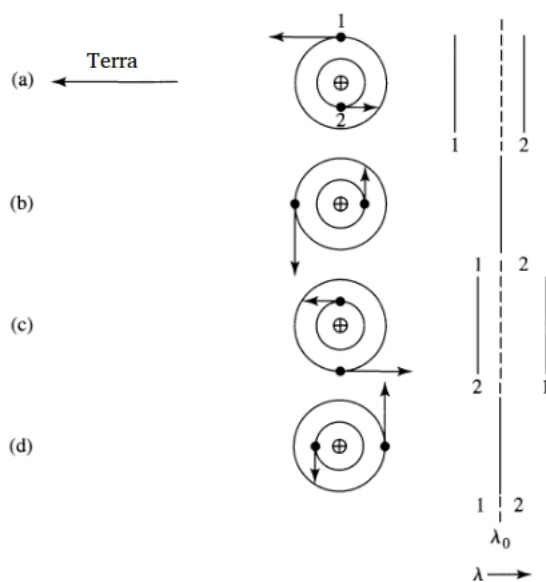


Figura 2.4: O deslocamento periódico no espectro de uma binária espectroscópica de linha dupla pode ser compreendido em quatro etapas: (a) a estrela 1 move-se na direção do observador (deslocamento para o azul) enquanto a estrela 2 se afasta (deslocamento para o vermelho). (b) Ambas as estrelas têm velocidades perpendiculares à linha da visada (ausência de deslocamento). (c) A estrela 1 se afasta do observador (deslocamento para o vermelho) enquanto a estrela 2 se aproxima (deslocamento para o azul). (d) Novamente ambas as estrelas têm velocidades perpendiculares. λ_0 representa o comprimento de onda observado sem deslocamento Doppler. Fonte: Carroll & Ostlie, 2006.

instante do eclipse. Particularmente é um caso interessante para a astrofísica, pois a possibilidade de combinar curva de luz e curvas de velocidade radiais aumenta consideravelmente o número de parâmetros que podem ser inferidos das estrelas do binário.

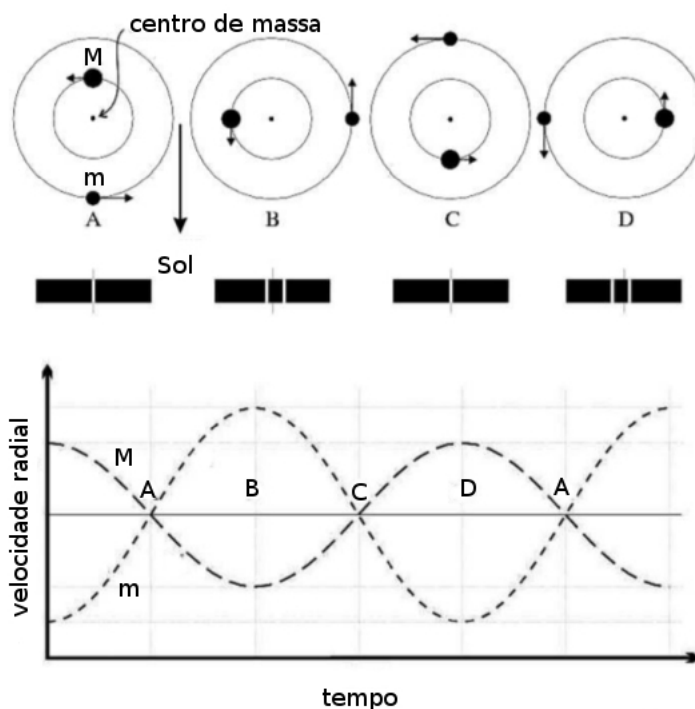


Figura 2.5: Neste sistema idealizado temos estrelas de massa M e m em quatro instantes diferentes (A, B, C e D), no decorrer de suas órbitas em torno do centro de massa do sistema. Está representado acima, o deslocamento das linhas no espectro do sistemas, assim, as linhas atribuídas à estrela que se afasta sofrem deslocamento para o vermelho enquanto que as linhas atribuídas à estrela que se aproxima sofrem deslocamento para o azul. Na parte inferior da figura, temos as curvas de velocidade radial para ambas as estrelas do sistema, assim como os instantes antes mencionados. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

A Figura 2.5 relaciona a posição das estrelas na órbita, o deslocamento das linhas de absorção no espectro e as curvas de velocidades radiais.

2.4 Sistemas Binários Eclipsantes

Os sistemas binários eclipsantes são sistemas binários nos quais o plano orbital está orientado de tal forma que as duas componentes eclipsam uma a outra (na perspectiva de um dado observador), acarretando na diminuição do brilho do sistema [4]. A curva de luz, normalmente graduada em fluxo luminoso e tempo, é a soma do fluxo das componentes no decorrer

de sua órbita. Em outra classificação, os sistemas binários eclipsantes são estrelas variáveis, mais precisamente, estrelas variáveis extrínsecas [7]. Isto é, a variabilidade observada na curva de luz tem origem geométrica.

De maneira geral, estrelas variáveis mudam de brilho aparente em uma escala de tempo entre eventos de ordem dinâmica e térmica. Em se tratando de sistemas binários eclipsantes, a variabilidade observada na curva de luz é periódica [5]. A hierarquia das estrelas componentes do sistema binário (primária ou secundária) é um pouco confusa na literatura, havendo divergência entre fotometristas e espectroscopistas [5]. Neste contexto, adotaremos a concepção de que o eclipse da componente primária é responsável pelo mínimo primário, enquanto que o eclipse da componente secundária pelo mínimo secundário. Assim, a estrela primária do sistema apresenta maior brilho (Figura 2.6).

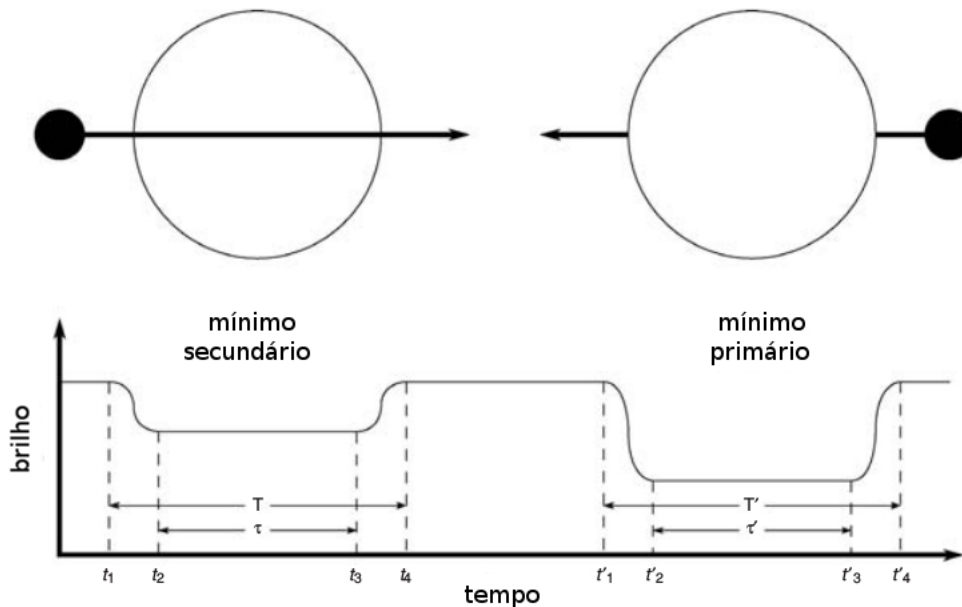


Figura 2.6: Na ilustração, o sistema binário eclipsante é formado por uma estrela pequena (mais brilhante) e uma estrela grande (menos brilhante), abaixo, sua curva de luz. À medida que a estrela mais brilhante passa em frente da estrela maior, mais fraca, há um mínimo secundário. Quando a estrela mais brilhante passa atrás da mais fraca (à direita), há um mínimo primário. Os eventos t_1, t_2, t_3, t_4 são os tempos dos quatro contatos. As letras T e T' são a duração do eclipse primário e secundário, respectivamente. Os intervalos τ e τ' são o tempo decorrido entre o segundo e terceiro contatos para o eclipse primário e secundário, respectivamente. Fonte: Percy, 2007.

Pelo menos metade das estrelas constituem sistemas binários ou sistemas múltiplos. No

tocante a abundância de variáveis eclipsantes, pelo menos 3 por cento das 300 estrelas mais brilhantes do céu noturno são classificadas como tal [2].

Do ponto de vista morfológico a classificação das variáveis eclipsantes é feita com base no conceito de superfície Lagrangeana e lóbulos de Roche. A Figura 2.7 ilustra a distribuição das equipotenciais gravitacionais para um sistema formado por estrelas de baixa massa em que ambas as componentes não preenchem completamente seus respectivos lóbulos de Roche.

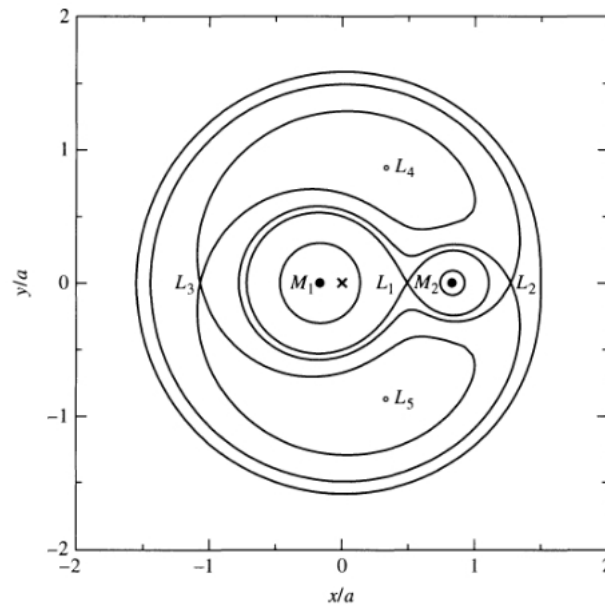


Figura 2.7: O sistema ilustrado é formado por estrelas de 0,85 e 0,17 massas solares. A separação entre as componente é a , que assume o valor de 0,718 em raios solares. O centro de massa do binário está em \times . Os pontos L_1 , L_2 , L_3 e L_4 são pontos lagrangeanos. Fonte: Carroll & Ostlie, 2006.

A morfologia dos sistema binários, de maneira geral, depende do preenchimento dos lóbulos ocupados pelas estrelas. A seguir, a descrição dos três casos mais gerais encontrados na literatura.

2.4.1 Sistemas binários de semicontato

Sistemas em semicontato (ou semidestacados) contam com uma estrela que preencheu completamente o seu lóbulo de Roche, isto é, alcançou a primeira superfície equipotencial.

A forma da estrela que preenche o lóbulo de Roche é distorcida e esta passa a perder massa através do primeiro ponto lagrangeano. A estrela que não preenche o seu lóbulo acreta massa

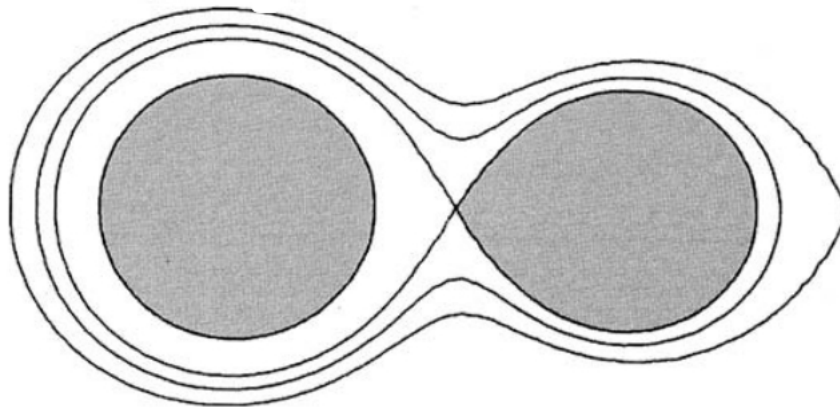


Figura 2.8: Em sistemas binários eclipsantes de semicontato, uma das estrelas preenche por completo o seu respectivo lóbulo de Roche. Fonte: Percy, 2007.

de sua companheira, como ilustrado na Figura 2.9.

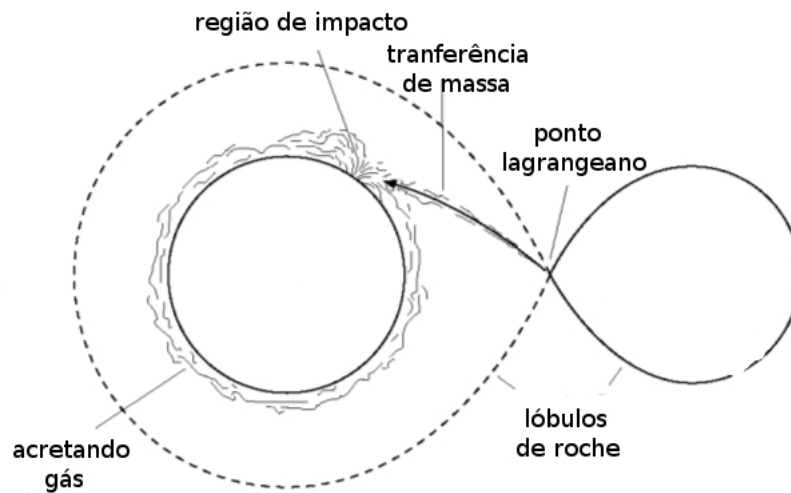


Figura 2.9: Em sistemas binários eclipsantes de semicontato uma das estrelas cede massa através do primeiro ponto de lagrange. Adaptado de: Percy, 2007.

2.4.2 Sistemas binários de contato

Neste caso, ambas as estrelas preencheram seus respectivos lóbulos de Roche.

Pode existir um envoltório de material comum envolvendo as duas estrelas, assim, obscurecendo a identidade de cada uma. Sistemas com atmosfera em comum são chamados de binários de sobrecontato [2]. Na curva de luz, se eclipsante, o sistema exibe mínimos com

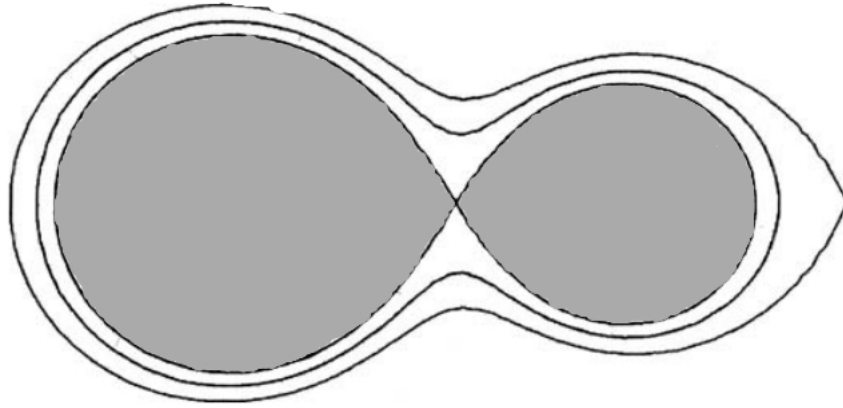


Figura 2.10: Em sistemas binários eclipsantes de contato, ambas as estrelas preenchem por completo os seus respectivos lóbulos de Roche. Fonte: Percy, 2007.

profundidade muito semelhante.

2.4.3 Sistemas binários destacados

Neste caso, as estrelas que compõem o sistema não preenchem por completo os seus respectivos lóbulos de Roche, ou seja, não alcançam a primeira superfície equipotencial e o primeiro ponto de Lagrange. Esta classe tem como característica marcante a ausência de contato entre as componentes do sistema, boa separação orbital, o que minimiza os efeitos de maré e permite que as estrelas se aproximem da forma esférica [2].

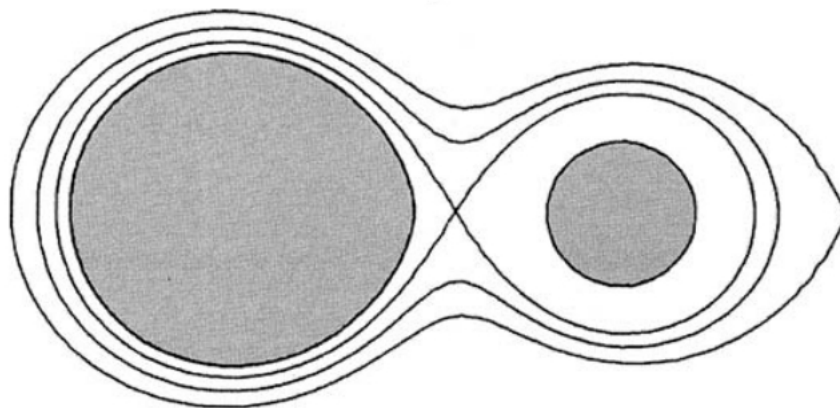


Figura 2.11: Em sistemas binários eclipsantes destacados as estrelas não preenchem por completo os seus respectivos lóbulos de Roche. Fonte: Percy, 2007.

No presente trabalho iremos analisar apenas sistemas binários destacados, por serem estes os sistemas que envolvem uma menor complexibilidade para determinação de parâmetros

orbitais e razões físicas.

2.5 Curvas de Luz

A curva de luz é o que uma estrela variável tem de mais particular entre as demais. Por tanto, é através da geometria da curva de luz que as variáveis eclipsantes são classificadas. Historicamente, as curvas de luz de binárias eclipsantes são classificadas em: Algols, sistemas β Lyrae e sistemas W Ursae Majoris [5].

2.5.1 Algol

A classe Algol apresenta fluxo constante em grande parte da curva luz, e grande diferença na profundidade dos mínimos. A pouca variabilidade do fluxo na curva nos sugere efeitos de proximidade pequenos, podendo também associa-la a sistemas de períodos relativamente longos [5].

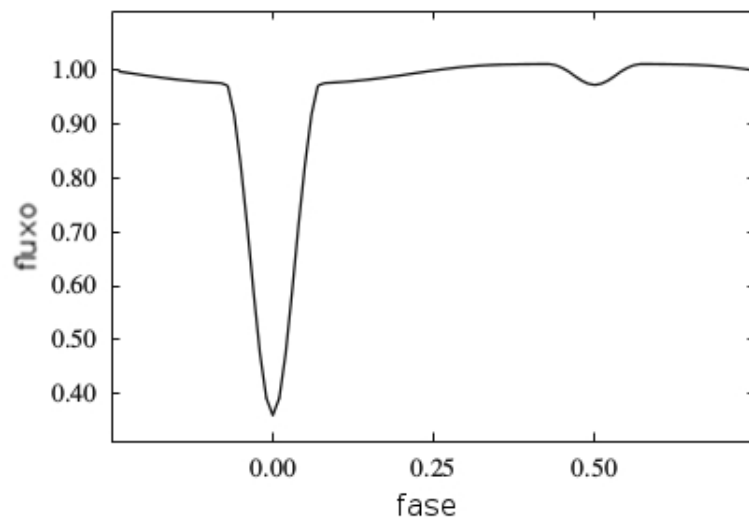


Figura 2.12: Curva de luz sintética do tipo Algol, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

O pequeno aumento do fluxo luminoso na entrada e na saída do mínimo secundário é causado pela reflexão luminosa na estrela primária. Tal efeito pode ser mais ou menos acentuado, às vezes até encobrindo o mínimo secundário para certos intervalos de comprimento de onda.

2.5.2 β Lyrae

É a classe cujo fluxo luminoso muda continuamente ao longo da curva de luz, tornando difícil identificar onde começa e onde termina cada eclipse. Difere da classe W UMa (ver seção 2.5.3) pela diferença de profundidade em seus mínimos, além de apresentar períodos ligeiramente mais longos, da ordem de um dia [7].

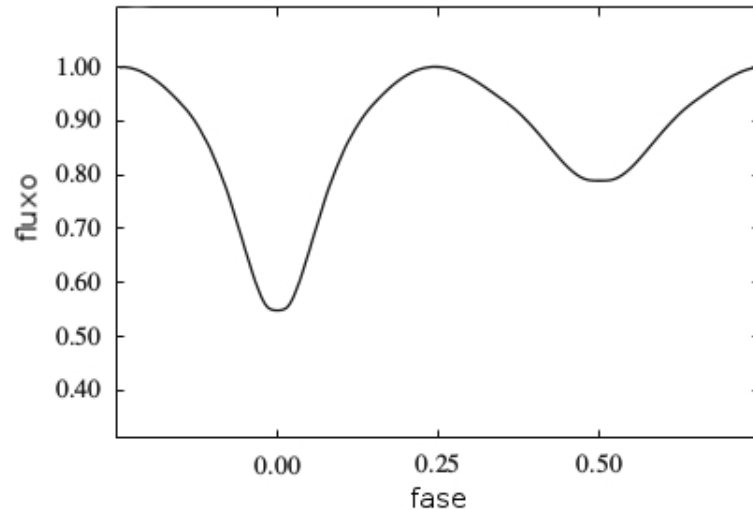


Figura 2.13: Curva de luz sintética do protótipo β Lyrae, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

Nesta classe, os efeitos de maré atuam de forma efetiva nas componentes, distorcendo-as, e a notável diferença de profundidade nos mínimos de luz implica a grande diferença de brilho na superfície das estrelas [5].

2.5.3 W UMa

Sistemas binários da classe W Ursa Majoris, assim como as β Lyrae, apresentam eclipses que ocupam a maior parte da curva de luz. Normalmente apresentam curto período, de 7 horas a um dia [7], o que as torna suscetíveis a efeitos de maré mais intensos. A profundidade dos mínimos, secundário e primário, não difere muito, devido o brilho na superfície ser praticamente o mesmo para ambas as estrelas.

Enquanto as curvas de luz da classe β Lyrae estão frequentemente relacionados a sistemas binários destacados e de semicontato, as curvas W UMa associam-se a sistemas de contato [5].

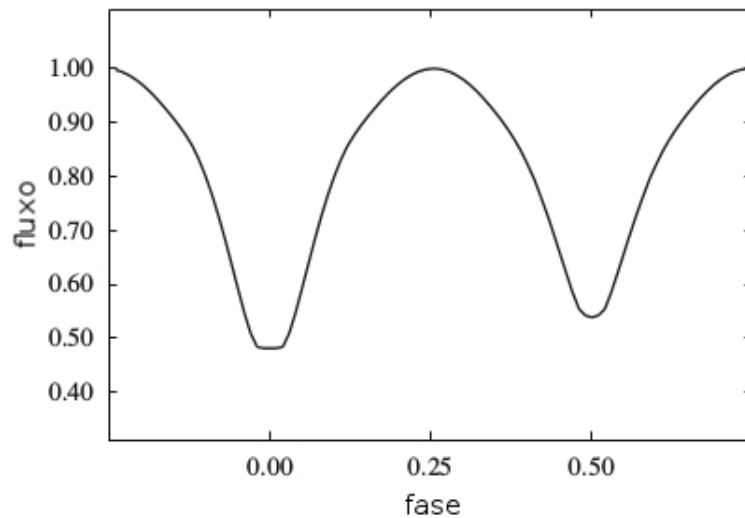


Figura 2.14: Curva de luz sintética do protótipo W Ursa Majoris, no visível. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

2.6 Parâmetros de Sistemas Binários

Os sistemas binários constituem fonte ímpar de parâmetros astrofísicos. Diante da sua diversidade, a Tabela 2.1 relaciona o tipo de binária com os possíveis parâmetros que podem ser determinados. As letras “s”, “n” e “p” significam, respectivamente, “sim, é possível obter”, “não é possível obter” e “sim, mas em casos particulares”. Os parâmetros que definem a órbita são: semieixo maior, a , e semieixo maior aparente, a'' ; excentricidade, e ; período orbital, P ; época do primeiro mínimo primário, T_0 ; inclinação orbital, i ; longitude do periastro, ω ; e a orientação da linha dos nodos, Ω . Os parâmetros remanescentes são: massa, $m_{1,2}$; raio, $R_{1,2}$, e raio aparente, $R''_{1,2}$; luminosidade, $\frac{L_2}{L_1}$; coeficiente de escurecimento de limbo, $x_{1,2}$; e coeficiente de escurecimento gravitacional, $\beta_{1,2}$.

A Figura 2.15 ilustra os parâmetros orbitais de um sistema binário. Os ângulos são medidos com referência ao plano tangente e orbital.

No contexto desenvolvido nas seções anteriores, a determinação de parâmetros físicos e elementos orbitais de binárias eclipsantes pode ser conduzida com o levantamento de dados de fotometria e/ou espectroscopia. Da fotometria, leva-se em conta a curva da luz; da espectroscopia, toma-se a curva de velocidade radial. Esta última, pode tanto ser referente a uma única componente do sistema ou a ambas.

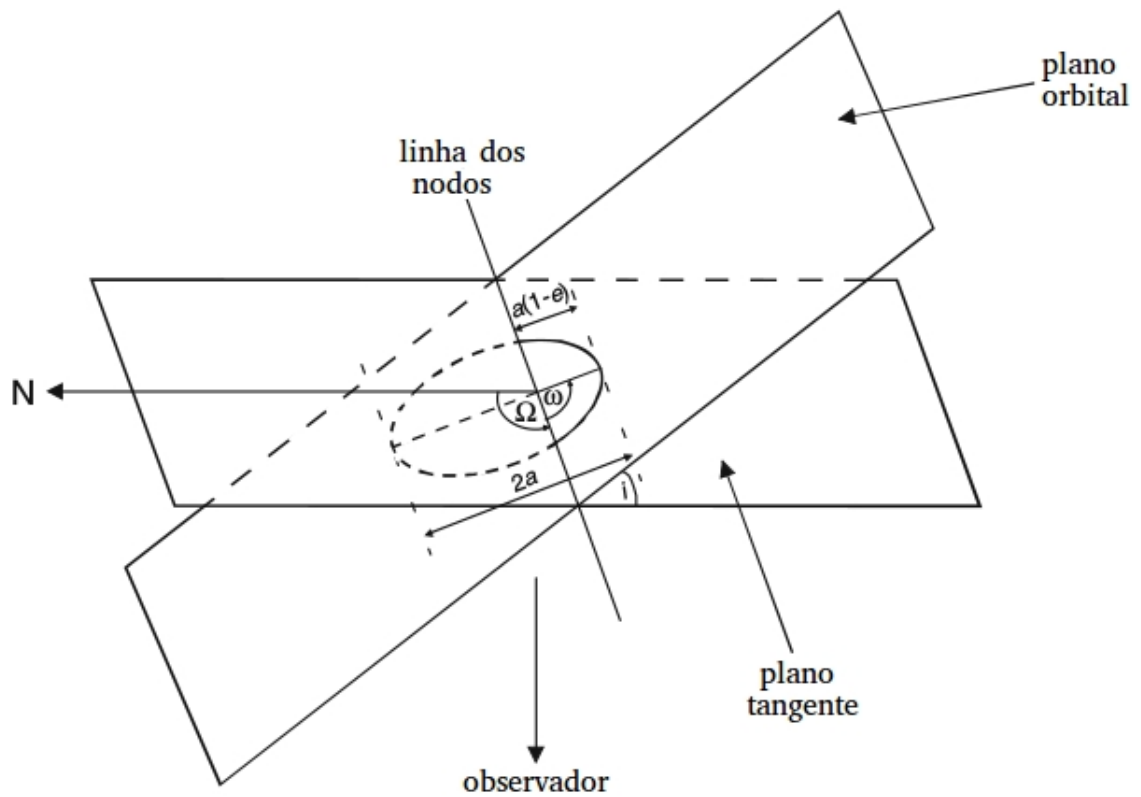


Figura 2.15: Elementos orbitais de um sistema binário. Ω é o ângulo de posição do nodo ascendente (medido no plano tangente) ou o ângulo de posição da linha de nodos. ω é o ângulo distância entre o plano orbital e a linha de nodos. N é usado para orientar o plano do céu e aponta para o norte. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

Parâmetros	BV	BA	BE1	BE2	BEC
a	a''	a''	$a_1 \text{sen} i$	$a \text{sen} i$	n
e	s	s	s	s	s
P, T_0	s	s	s	s	s
i	s	s	n	n	s
ω	s	s	s	s	s
Ω	$\pm 180^\circ$	$\pm 180^\circ$	n	n	n
$m_{1,2}$	*	*	$f(m)$	$m_{1,2} \text{sen}^3 i$	n
$R_{1,2}$	n	$R''_{1,2}$	**	**	$\frac{R_{1,2}}{a}$
$\frac{L_2}{L_1}$	s	s	n	**	s
$x_{1,2}$	n	p	n	n	p
$\beta_{1,2}$	n	p	n	n	p

Tabela 2.1: A tabela sintetiza tipos de sistemas binários e parâmetros que podemos obter para cada caso. “s”, “n” e “p” significam, respectivamente, “sim, é possível obter”, “não é possível obter” e “sim, mas em casos particulares”. Das abreviaturas na primeira linha, entende-se: BV, binárias visuais; BA, binárias astrométricas; BE1, binárias espectroscópicas de uma linha; BE2, binárias espectroscópicas de duas linhas; e BEC, binárias eclipsantes. “*” refere-se a orbita absoluta e “**” infere-se para a estrelas da sequência principal. Fonte: Manceroni, 2006.

A Tabela 2.2 aborda as possibilidades de cinco combinações de dados distintas, tais são: curva de luz, 1; uma curva de velocidade radial, 2; ambas as curvas de velocidade radial, 3; curva de luz e uma curva de velocidade radial, 4; e curva de luz e ambas as curvas de velocidade radial, 5.

Os casos marcados com “?” referem-se a possibilidade de que as temperaturas possam ser derivadas a partir de características espectrais. A fim de calcular a temperatura da secundária (T_2) a partir da curva de luz, a temperatura da primária (T_1) deve ser conhecida. Nosso trabalho visa estimar parâmetros fazendo uso apenas de curvas de luz. Assim, curvas de luz podem prover quantidades relativas, como: raios, em função do semieixo maior ($\frac{R_2}{R_1}$; $\frac{R_2+R_1}{a}$); informações de temperatura (T); luminosidade ($\frac{L_2}{L_1}$); ou, em casos específicos, razão das massas fotométricas (q_{ph}). E, também, elementos orbitais, como: excentricidade (e); longitude do periastro ω ; e inclinação orbital i [5]. Além do período orbital do sistema (P). A razão das massas fotométricas é um parâmetro particular não explorado neste trabalho. Há dois casos em que se pode estimar q_{ph} : sistemas binários de semicontato e, de forma mais precisa, em sistemas binários de contato [5].

Parâmetros	1	2	3	4	5
$a_1 \text{ sen } i$ ou $a_2 \text{ sen } i$	n	s	s	s	s
$a \text{ sen } i$, $a_{1,2} \text{ sen } i$ e $m_{1,2} \text{ sen}^3 i$	n	n	s	n	s
a , $a_{1,2}$, $M_{1,2}$, $R_{1,2}$, $L_{1,2}$ e d	n	n	n	p	s
e , ω e P	s	s	s	s	s
q_{sp}	n	n	s	n	s
q_{ph}	p	n	n	p	p
i , $\frac{R_{1,2}}{a}$, $\frac{L_2}{L_1}$, $g_{1,2}$, $A_{1,2}$, $x_{1,2}$ e l_3	s	n	n	s	s
T_2	s	?	?	s	s

Tabela 2.2: A tabela refere-se aos parâmetros que podem ser obtidos em binárias eclipsantes a partir de cinco combinações de curva de luz e curva de velocidade radial. O parâmetros são: a , é o semieixo maior da órbita; i , a inclinação da órbita; M , a massa da estrela; R , o raio da estrela; L , a luminosidade da estrela; e , a excentricidade; ω , a longitude do periastro; T , o período orbital; q_{sp} , a razão de massa espectroscópica ; q_{ph} , a razão de massa fotométrica; i , a inclinação orbital; g , a aceleração gravitacional; A , o albedo; x , o coeficiente de escurecimento do limbo; l_3 , a terceira luz do sistema ; e T , a temperatura efetiva da estrela. Fonte: Kallrath & Milone, 2009.

Capítulo 3

O Código JKTEBOP

O código utilizado para a análise das curvas de luz é a versão 34 do JKTEBOP¹ [8, 9, 10], escrito em FORTRAN e baseado no EBOP (*Eclipsing Binary Orbital Program*²), código produzido por Etzel em 1981 [11]. É um eficiente software para analisar sistemas binários eclipsantes destacados, desde que sejam formados por estrelas bem separadas, onde os efeitos de proximidade são mínimos. No que diz respeito ao seu funcionamento, a área eclipsada na curva de luz e a luz perdida durante o eclipse são integradas semi-analiticamente. A região eclipsada da estrela é fragmentada em anéis concêntricos de raio $r \cos \phi$ e largura $\Delta\gamma = r \cos \phi d\phi$, para um ϕ equivalendo a distância angular até o centro do disco [5]. O fluxo médio pode ser obtido integrando sobre todo o disco,

$$F = \frac{1}{r^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\phi) 2\pi r \sin \phi r \cos \phi d\phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\phi) \cos \phi d\phi. \quad (3.1)$$

Segundo Kallrath e Milone (2009), a precisão desta função depende de $\Delta\gamma$ e da precisão das observações envolvidas. Além dessa operação herdada do EBOP, o JKTEBOP tem como principais características:

- As estrelas são projetadas como esferas para calcular as formas do eclipse e como esferóides biaxiais para calcular os efeitos de proximidade;
- Usa o algoritmo de otimização Levenberg-Marquardt [12, 13] para encontrar o melhor ajuste do modelo;

¹Acesso ao código no endereço: <http://www.astro.keele.ac.uk/jkt/codes/jktebop.html>

²Programa de Binário Eclipsante Orbital.

- Pode ajustar curvas de velocidade radial para as componentes do sistema binário; e
- Os arquivos de entrada e saída são relativamente simples.

A Figura 3.1 refere-se ao arquivo de entrada do código JKTEBOP que contém os parâmetros iniciais. O código possibilita fixar ou ajustar tais parâmetros, dependentemente da tarefa (ver página 20) utilizada.

```

0 0      Task to do (from 2 to 9)  Integ. ring size (deg)
0 0      Sum of the radii         Ratio of the radii
0 0      Orbital inclination (deg) Mass ratio of system
0 0      Eccentricity or ecosw    Peri.longitude or esinw
0 0      Gravity darkening (star A) Grav darkening (star B)
0 0      Surface brightness ratio Amount of third light
law law  LD law type for star A   LD law type for star B
0 0      LD star A (linear coeff) LD star B (linear coeff)
0 0      LD star A (nonlin coeff) LD star B (nonlin coeff)
0 0      Reflection effect star A  Reflection effect star B
0 0      Phase of primary eclipse  Light scale factor (mag)
0 0      Orbital period of eclipsing binary system (days)
0 0      Reference time of primary minimum (HJD)
0 0      Adjust RADII SUM or RADII RATIO
0 0      Adjust INCLINATION or MASSRATIO
0 0      Adjust ECCENTRICITY or OMEGA
0 0      Adjust GRAVDARK1 or GRAVDARK2
0 0      Adjust SURFACEBRIGHT2 or THIRDLIGHT
0 0      Adjust LD-lin starA or LD-lin starB
0 0      Adjust LD-nonlinA or LD-nonlinB
0 0      Adjust REFLECTION COEFFS A and B
0 0      Adjust PHASESHIFT or SCALE FACTOR
0 0      Adjust PERIOD or TZERO (min light)
kic.dat  Name of file containing light curve
kic.par  Name of output parameter file
kic.out  Name of output light curve file
kic.fit  Name of output model light curve fit file

```

Figura 3.1: Arquivo de entrada do código JKTEBOP. Neste arquivo é possível fixar (0) ou ajustar (1) parâmetros de entrada. Na primeira linha designa-se a tarefa e a largura do anel de integração, na linha seguinte são dados os valores iniciais para a soma da fração dos raios e razão dos raios.

A otimização de Levenberg-Marquardt na maioria das vezes é referida como método dos mínimos quadrados amortecido, e uma boa propriedade do algoritmo é a sua estabilidade numérica [5]. Entretanto, não é raro que o valor encontrado para determinado parâmetro não seja o mínimo global, mas uma conclusão prematura do algoritmo, ou seja, um mínimo local. Então, primeiramente, para que um parâmetro seja aceitável ele deve ter significado físico. Por seguinte, o critério formal para detectar uma convergência inadequada é comparar o desvio do melhor ajuste, σ^{fit} , e o ruído interno, σ^{data} . A solução é aceitável se $\sigma^{fit} \approx \sigma^{data}$ [5]. Se a plausibilidade Astrofísica do parâmetro falhar, a simulação convergiu diante de um mínimo local.

Os arquivos de entrada e saída são de fácil compreensão, tornando o código atrativo para pesquisadores iniciantes no assunto. Os parâmetros calculados e usados pelo JKTEBOP são: razão de brilho central; soma da razão dos raios; razão dos raios; coeficiente de escurecimento do limbo linear, quadrático, cúbico e logarítmico (primária e secundária); inclinação orbital; componente tangencial da excentricidade, $e \cos \omega$; componente radial da excentricidade, $e \sin \omega$; coeficiente de escurecimento gravitacional (primária e secundária); luz refletida pela estela (primária e secundária); razão das massas; atraso pela maré; terceira luz; correção de fase; fator de escala de luz; espessura dos anéis de integração; período orbital; época do primeiro eclipse; amplitude de velocidade (primária e secundária); e velocidade sistêmica (primária e secundária). Os parâmetros extras são: fração do raio (primária e secundária); razão de luminosidade; excentricidade; longitude do periastro; impacto no eclipse (primária e secundária); semi-eixo maior da orbita; razão de massa para velocidades radiais; massa da estrela (primária e secundária); raio da estrela (primária e secundária); $\log g$ da estrela (primária e secundária); distância projetada entre os centros das estrelas (eclipse primário e secundário); densidade da estrela (primária e secundária); e chi-quadrado reduzido.

Os parâmetros extras constam somente nos arquivos de saída. O JKTEBOP também possibilita um ajuste auxiliado por polinômios, dessa forma, os coeficientes das funções podem ser inclusos no arquivo de entrada, assim como referências para mínimos com épocas fora da curva de luz. Quanto as ferramentas estatísticas para a análise de erros, o código dispõe de *bootstrapping*, Monte Carlo e permutações residuais (detalhes em [14]). Nestes termos, o programa conta com 9 tarefas, as quais estão enumeradas abaixo:

```
JKTEBOP v34      John Southworth (Keele University, UK, astro.js-keele.ac.uk)
A package for modelling the light curves of well-detached eclipsing binary stars
Task 1  outputs limb and gravity darkening coefficients for given Teff and log g
Task 2  outputs one model light curve calculated using a set of input parameters
Task 3  finds the best fit of the model to observations (formal errorbars only)
Task 4  finds the best fit to the observations, sigma clips, and refits the data
Task 5  finds global best fit, by perturbing parameters and refitting many times
Task 6  fits observations and finds goodness of fit for several parameter values
Task 7  finds robust reliable errors by analysing with a bootstrapping algorithm
Task 8  finds robust errors by analysing with a Monte Carlo simulation algorithm
Task 9  finds robust errors using Monte Carlo given significant correlated noise

Usage: 'jktebop [inputfile]' to undertake one of these tasks
Usage: 'jktebop newfile'    to output an empty input file for a given task
Usage: 'jktebop 1'         to undertake Task 1 (limb darkening coefficients)
```

Figura 3.2: O código JKTEBOP em execução. É exibido o resumo de cada Tarefa e as instruções para a construção do arquivo de entrada específicos.

Tarefa 1 Estima o(s) coeficiente(s) de escurecimento de limbo através do JKTL³, código também elaborado por Southworth. São necessários dados de temperatura, microturbulência, metalicidade e $\log g$ para que os coeficientes sejam estimados. JKTL usa tabelas, com dados previamente calculados a partir de modelo de atmosfera estelares para interpolar.

Tarefa 2 Constrói uma curva de luz modelo baseada nos parâmetros de entrada fixos. Isto é, sem ajuste nos parâmetros. Esta tarefa mostra-se útil na construção de uma curva de luz modelo que é produto de parâmetros encontrados através de tarefas mais robustas, como as Tarefas de 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Tarefa 3 Ajusta um modelo de curva de luz baseado nos resultados da otimização dos parâmetros livres. É a tarefa básica do código e completa ao que se propõe, pois para uma análise mais precisa nas tarefas mais robustas é necessário primeiro um bom ajuste nesta. As barras de erro estimadas neste caso são formais.

Tarefa 4 Nesta tarefa o JKTEBOP rejeita pontos de dados que estão distantes do melhor ajuste. Tal procedimento usa o valor inteiro de sigma designado no arquivo de entrada. É uma tarefa importante para melhorar os parâmetros iniciais de Tarefas mais robustas, como as 7, 8 e 9.

Tarefa 5 Tenta encontrar o mínimo global montando a curva de luz muitas vezes. O conjunto de parâmetros usados são bastante diferentes dos designados no arquivo de entrada, dessa forma, realiza uma minimização perturbando os parâmetros livres utilizados na entrada.

Tarefa 6 Investiga como diferentes parâmetros variam em torno do melhor ajuste. Para cada parâmetro ajustado, o código estuda como a qualidade de adaptação muda à medida que o valor do parâmetro varia. As barras de erro são robustas.

Tarefa 7 Realiza simulações de *bootstrapping* para estimativa robusta de erros. O conjunto de pontos da curva de luz sofre reamostragem com substituição aleatória de pontos,

³Informações e *download* em: <http://www.astro.keele.ac.uk/jkt/codes/jktdl.html>

de acordo com o método de *bootstrapping* e os conjuntos de dados resultantes são reajustados individualmente. O número de reamostragens é designado no arquivo de entrada e o intervalo de confiança (σ ou 2σ) está vinculado a ele. Nesta tarefa, os valores encontrados para cada parâmetro, em cada simulação, consta em um dos arquivos de saída. A curva de luz para o melhor ajuste não é gerada, requerendo o uso de outra tarefa.

Tarefa 8 Esta tarefa encontra o melhor ajuste e, em seguida, usa simulações de Monte Carlo para estimar as incertezas nos parâmetros. O ruído gaussiano de observação simulado é adicionado e o resultado é reajustado. Este processo é repetido e o intervalo entre os valores encontrados dá a incerteza no parâmetro livre. O número de repetições é designado no arquivo de entrada e o intervalo de confiança (σ ou 2σ) está vinculado a ele. Nesta tarefa, os valores encontrados para cada parâmetro, em cada simulação, consta em um dos arquivos de saída. A curva de luz para o melhor ajuste não é gerada, requerendo o uso de outra tarefa

Tarefa 9 Esta tarefa encontra o melhor ajuste e, em seguida, avalia a importância do ruído correlacionado nos parâmetros do ajuste. O método é usado onde os resíduos em torno do melhor ajuste são deslocados ponto-a-ponto através dos dados observacionais. Depois de cada laço, um novo melhor ajuste é calculado, assim o código conclui a tarefa com um número de melhores ajustes igual ao número de pontos da curva de luz. Cada melhor ajuste é salvo em um arquivo de saída.

Neste trabalho as tarefas 1, 2, 3 e 7 foram especialmente exploradas. No contexto das possibilidades que o código oferece, as curvas de luz usadas na construção dos resultados apresentados foram obtidas pela Missão Kepler (ver capítulo 4). Assim, o melhor ajuste para cada sistema analisado se deu baseado nos dados de fotometria disponibilizados por esta Missão. Os parâmetros dos sistemas binários eclipsantes investigados são listados na Tabela 3.1.

O código JKTLID foi usado para estimar os coeficientes de escurecimento do limbo. Neste processo os coeficientes são interpolados das tabelas de Sing [15], obtidas com o modelo estelar de atmosfera ATLAS [16]. O escurecimento do limbo contribui de maneira significativa para o formato dos eclipses na curva de luz. Embora ambos os códigos ofereçam diversas leis de escurecimento, a lei linear é satisfatória para as curvas de luz da maioria dos sistemas binários

Parâmetros	Símbolo
razão de brilho central	J
razão dos raios	k
fração dos raios	$r_a + r_b, r_{a,b}$
inclinação orbital	i
excentricidade	e
longitude do periastro	ω
componente tangencial da excentricidade	$e \cos \omega$
componente radial da excentricidade	$e \sin \omega$
terceira luz	L_3
primeira efeméride	T_0
correção da época do primeiro eclipse	$\Delta \phi$
período orbital	P
coeficientes de escurecimento de limbo (lei quadrática)	x_{lin} e x_{quad}
luz refletida pela estrela	$A_{1,2}$
magnitude do sistema	m_k
razão de luminosidade	$\frac{L_2}{L_1}$
distância projetada durante os eclipses	$b_{pri,sec}$

Tabela 3.1: Os parâmetros explorados pelo código JKTEBOP quando se dispõe apenas da curva de luz.

eclipsantes [17]. Contudo, foi adotado a lei quadrática para a grande maioria das estrelas analisadas, visando otimização dos resultados.

Capítulo 4

Metodologia

No contexto do método usado para obtenção e seleção de dados, na seção 4.1 abordaremos os objetivos e características gerais da Missão Kepler. Em seguida, a origem e perfil dos dados usados na produção deste trabalho é discutida (seções 4.2, 4.3 e 4.4). Os critérios usados para a seleção de uma amostra representativa, assim como a motivação para exclusão total ou parcial de alguns sistemas pertencentes a amostra inicial são abordados na seção 4.5. Por fim, a metodologia aplicada ao código JKTEBOP para obtenção dos resultados (seção 4.6).

4.1 Missão Kepler

A Missão Kepler foi projetada inicialmente para investigar uma região localizada entre as constelações do Cisne e da Lira (ascensão reta = 19h 22m 40s, declinação = 44° 30' 00"). O objetivo central da Missão é encontrar e caracterizar planetas semelhantes à Terra, dentro ou próximo da zona habitável, usando o método de detecção de trânsito planetário [18]. A zona habitável é definida pela distância de uma estrela onde a água líquida pode existir na superfície do planeta durante o período de tempo necessário para a evolução da vida [19].

O telescópio espacial Kepler tem uma abertura de 0,95 metros e um campo de visão de 115,6° quadrados. Está equipado com um fotômetro que contém 42 CCDs com 2200x1024 pixels, onde cada pixel cobre uma região de 4 arcseg. A nave opera em uma órbita heliocêntrica ao passo que persegue a órbita da Terra e apresenta um período de aproximadamente 372,5 dias [18]. Detalhes sobre a instrumentação da Missão em: [20].

Em sua primeira fase de operação manteve-se apontando para uma única região do céu, mas devido a perda de uma segunda das quatro rodas de reação, em maio de 2013, o Kepler

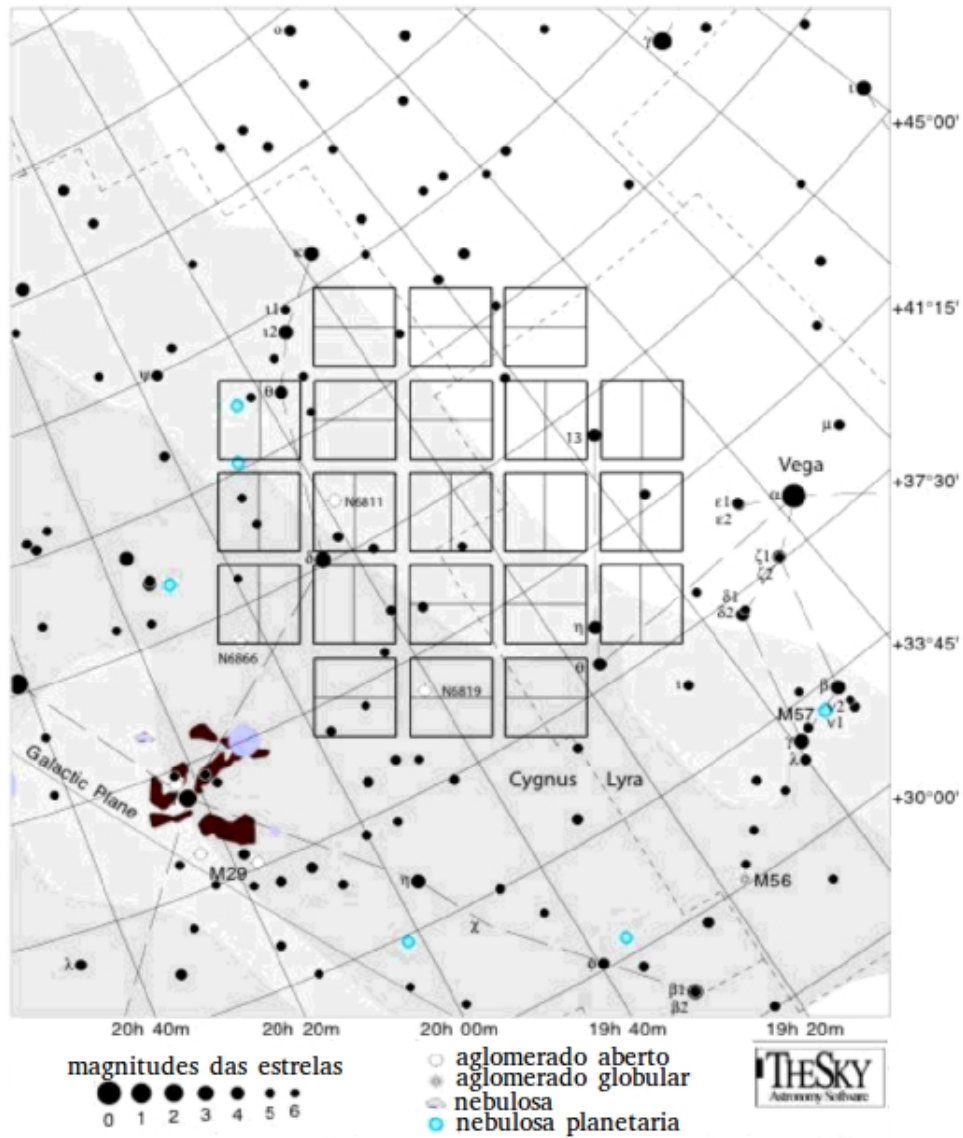


Figura 4.1: O campo de visão da Missão Kepler. O campo observado está próximo ao plano galáctico, centrado nas coordenadas galácticas de ascensão reta igual a 19h 22m 40s e declinação igual a 44° 30' 0". Fonte: Fraquelli Thompson, 2014.

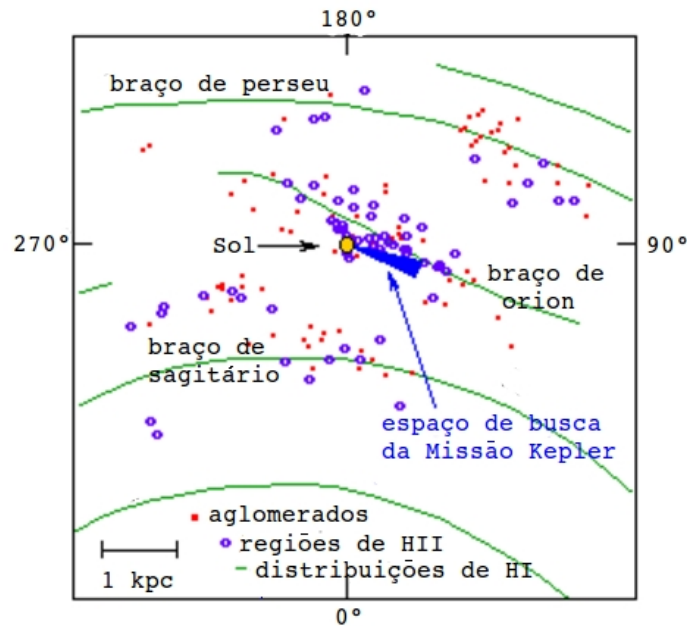


Figura 4.2: As estrelas observadas com o Satélite Kepler estão situadas em uma região vizinha ao sistema solar, na Via Láctea. Aglomerados de estrelas jovens, regiões ricas em hidrogênio ionizado (HII) e regiões de distribuição de hidrogênio neutro (HI) definem os braços da Galáxia. Fonte: <https://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>, acessado em 07/12/2016.

deixou de operar na sua função principal. Em junho de 2014 o Satélite entra novamente em operação, mas dessa vez através da Missão K2 [21].

O satélite Kepler foi lançado em março de 2009 e passou um pouco mais de quatro anos monitorando ~ 200.000 estrelas com amostragem contínua de ~ 30 minutos (longa cadência) e ~ 1 minuto (curta cadência). Os dados de fotometria usados neste trabalho são de longa cadência e oriundos da primeira fase de operação¹. Os dados de fotometria estão alocados em *quarters*, que, com exceção dos primeiros, têm uma duração trimestral devido a correção realizada pela nave espacial para se manter apontando para as mesmas estrelas.

4.2 Catálogo de Binários Eclipsantes

Referente aos sistemas binários eclipsantes observados pela Missão Kepler, existem três catálogos: versão I [22]; versão II [23]; e versão III [24]. Os catálogos são fundamentais

¹Acesso ao banco de dados da Missão em: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

neste trabalho, pois fornecem o *Kepler Input Catalog*² (KIC) dos sistemas binários eclipsantes, apresentam parâmetros obtidos com inteligência artificial e classificam os sistemas (destacados, semicontato, contato, elipsoidais ou indeterminado).

A primeira versão do catálogo³ trouxe 1.879 objetos com dados obtidos ainda nos primeiros dias de Missão. Os parâmetros apresentados para os objetos são: Período, P ; data do primeiro eclipse primário, BJD_0 ; temperatura efetiva, T_{eff} ; logaritmo da gravidade, $\log g$; avermelhamento, $E(B - V)$; razão de temperatura, $\frac{T_2}{T_1}$; fator de preenchimento, F ; razão das massas, q ; seno da inclinação orbital, $\sin i$; soma da fração dos raios, $\frac{R_1+R_2}{a}$; componente radial da excentricidade, $e \sin \omega$; e componente tangencial da excentricidade, $e \cos \omega$. Havendo particularidades relativas a morfologia dos sistemas, o fator de preenchimento e a razão das massas são parâmetros exclusivos dos sistemas cujas componentes estão em contato, assim como os parâmetros que caracterizam a órbita ($e \cos \omega$, $e \sin \omega$ e $\frac{R_1+R_2}{a}$) são exclusivos dos sistemas cujas componentes são destacadas ou semidestacadas. O perfil dos sistemas binários eclipsantes no campo de visão do Kepler é traçado através da análise estatística dos períodos e sua taxa de ocorrência. O método de inteligência artificial é descrito, como ferramenta para obtenção de parâmetros. No geral, o catálogo coloca-se como uma importante via de acesso entre os dados de binários eclipsantes da Missão Kepler e a comunidade científica.

A segunda versão do catálogo⁴ de sistemas binários eclipsantes da Missão Kepler fornece uma atualização dos dados antes discutidos na primeira versão. Foram excluídos 100 sistemas e adicionados 386, totalizando 2.165 sistemas no campo de visão do Kepler. Os sistemas excluídos tratavam-se de variáveis pulsantes e binários atípicos, prematuramente classificados na primeira versão por insuficiência de dados conclusivos. Os casos peculiares foram cuidadosamente discutidos e o período de pulsação de alguns sistemas divulgado. As efemérides e parâmetros foram recalculados e a análise estatística sobre a distribuição de latitude galáctica e período refeita.

A fluxo proveniente das medições do Kepler contém efeitos sistemáticos, produtos de desvios de foco, contaminações por atividade cromosférica, pulsações ou contaminações por uma terceira luz. Por isso, se fez necessário o refinamento dos dados. Na base de dados da

²Entrada do Catálogo Kepler

³Versão I disponível em: <http://keplerebs.villanova.edu/v1>

⁴Versão II disponível em: <http://keplerebs.villanova.edu/v2>

Missão Kepler, existem dois tipos de curvas de luz - calibrada e corrigida. O fluxo do tipo *Pre-search Data Conditioning*⁵ (PDC) corrige as anomalias e remove a variabilidade para tornar os alvos adequados para detecção precisa de trânsitos planetários e eclipses estelares. O fluxo calibrado, por sua vez, corrige o viés e a não-linearidade dos dados. A ausência de um método de condicionamento de dados próprio e a qualidade dos resultados obtidos com o fluxo do tipo PDC foram determinantes na escolha dos dados na produção deste trabalho. Na construção do catálogo de binárias eclipsantes da Missão Kepler foi realizada uma redução particular, onde a base do algoritmo de tratamento implementado é um ajuste polinomial de Legendre de mínimos quadrados [23]. O produto do processo é uma curva de luz normalizada, pronta para ser modelada pelo EBAI (ver seção 4.2.1).

A terceira versão do catálogo⁶ de sistemas binários eclipsantes atualiza os dados antes analisados na versão anterior. Diferentemente das versões I e II, o catálogo III incorpora os dados do *quarter* 0 ao *quarter* 17, isto é, todos os dados da Missão Kepler. Após remoção e inclusão de sistemas, totaliza-se 2.878 sistemas analisados no catálogo. As efemérides e os parâmetros foram recalculados e a classificação dos sistemas binários eclipsantes foi refeita levando-se em conta dois modelos analíticos. A análise estatística a respeito da distribuição de período e latitude galáctico foi refeita (maiores detalhes em: [24]).

4.2.1 EBAI

Na construção dos catálogos empregou-se o EBAI. Este método baseia-se em redes neurais e foi usado para encontrar os principais parâmetros de cada tipo de binário eclipsante. Para isso, foram criadas duas redes distintas devido as particularidades de cada morfologia - para sistemas destacados e semicontato e para sistemas de contato.

A rede neural encarregada do ajuste de sistemas em contato foi treinada com 10.000 curva de luz sintéticas geradas pelo *PHysics Of Eclipsing BinariEs*⁷ (PHOEBE) [25]. Neste processo, os parâmetros das curvas de luz são desenhados aleatoriamente a partir das funções de distribuição de probabilidade que descrevem sistemas fisicamente plausíveis. A seleção das funções de distribuição de probabilidade é minuciosa no intuito de otimizar o desempenho

⁵Condicionamento de dados pré-pesquisa.

⁶Versão III disponível em: <http://keplerebs.villanova.edu>

⁷Física de Binárias Eclipsantes.

da rede neural. O treinamento da rede foi realizado com 10.000.000 iterações, levando ~ 4 dias para ser concluído [22].

A partir da temperatura efetiva e do logaritmo da gravidade, os coeficientes de escurecimento de limbo foram obtidos por interpolação a partir de tabelas atualizadas. No que se refere ao escurecimento gravitacional, foram utilizados os valores 1,0 e 0,32 para envoltórias radiativas e convectivas, respectivamente. Para o albedo os valores são 1,0 e 0,6, para envelopes radiativos e convectivos, respectivamente [22]. A rede neural destinada ao ajuste dos sistemas binários destacados e semicontato foi treinada com uma amostra sintética de 35.000 exemplares, obtidas utilizando o PHOEBE. O procedimento para a criação da amostra de treinamento é igual ao utilizado para sistemas binários de contato, exceto pelo número que visa suprir adequadamente os parâmetros mais complexos para esses tipos de sistema [22].

Coeficiente de morfologia A ferramenta de redução numérica utilizada para rotular as curvas de luz foi o *Locally Linear Embedding*⁸ (LLE) [26], cuja performance automatizada supera a classificação visual. O LLE proporciona uma catalogação quantitativa da curva de luz, assim, possibilitando a classificação através do coeficiente de morfologia. O coeficiente de morfologia assume valor dentro do intervalo de 0 a 0,1 para os sistemas muito destacados e, para valores abaixo de 0,5, predominantemente, os sistemas são destacados. Um coeficiente entre 0,5 e 0,7 denota que os sistemas são de semicontato. Os sistemas binários de contato predominantemente têm valores entre 0,7 e 0,8, enquanto valores maiores que 0,8 estão associados a variáveis elipsoidais [24]. O catálogo versão III tem seus sistemas classificados de acordo com o coeficiente de morfologia, assim, neste trabalho, a amostra foi selecionada de acordo com coeficiente de morfologia $< 0,5$.

4.3 Temperaturas individuais

As temperaturas individuais são parâmetros físicos necessários para se obter uma estimativa dos coeficientes de escurecimento de limbo individuais do sistema binário eclipsante.

⁸Incorporação Linear Local.

Neste trabalho, as temperaturas usadas foram obtidas no *Catalogue of Temperatures for Kepler Eclipsing Binary Stars*⁹ [27]. O catálogo de temperaturas é produto da combinação das informações do catálogo de binários eclipsantes do Kepler e do levantamento fotométrico realizado pelo *Howell-Everett Survey* (HES) [28], *Kepler INT Survey* (KIS) [29] e *The Two Micron All Sky Survey* (2MASS) [30], e tem como produtor as temperaturas individuais, informações sobre os raios estelares e relações de distância do binário para 2.600 sistemas binários eclipsantes. A precisão é, em média, de 370K para a temperatura da componente primária (T_1), e 620K para a temperatura da componente secundária (T_2) [27].

4.4 Gravidade superficial e metalicidade

O logaritmo da gravidade superficial, $\log g$, e o logaritmo da metalicidade, $\log Z$, foram obtidos de *Kepler Input Catalog: Photometric Calibration and Stellar Classification*¹⁰ [31], onde a descrição fotométrica e a classificação estelar realizadas são usadas pela Missão Kepler para selecionar os alvos ideais para estudo. Os parâmetros estelares divulgados são: temperatura efetiva, T_{eff} ; logaritmo da gravidade na superfície estelar, $\log g$; logaritmo da metalicidade, $\log Z$; e avermelhamento, $E(B - V)$.

4.5 Amostra

A “população” de sistemas binários eclipsantes estudados pela Missão Kepler consiste no catálogo de binários eclipsantes versão III, onde cada sistema é identificado pelo número KIC. O catálogo apresentava, em 1 de outubro de 2015, um total de 1412 sistemas cujos coeficientes de morfologia correspondem a sistemas binários eclipsantes destacados. Destes, foi selecionada de forma aleatória uma amostra contendo 100 sistemas. Dos sistemas selecionados, 17 foram excluídos por razões técnicas (ver seção 4.5.1). Verificou-se a representatividade estatística da amostra de 83 sistemas através do teste de Anderson-Darling [32] aplicado ao período (P) e à magnitude Kepler (m_k).

No primeiro teste, levou-se em conta o parâmetro P dos sistemas do catálogo e da amostra selecionada. O valor $-p$ encontrado foi de 0,18337 (com ajuste nas caldas), valor que

⁹Catálogo de Temperaturas para Estrelas Binárias Eclipsantes Kepler.

¹⁰Entrada do Catálogo Kepler: Calibração Fotométrica e Classificação Estelar.

possibilita considerar a hipótese nula do teste, isto é, de que os dados provém da mesma população com nível de confiança de 95%. No segundo teste o procedimento foi repetido mas levando-se em conta o parâmetro m_k para os sistemas do catálogo e da amostra. O valor para a probabilidade de significância encontrado foi de 0,12288 (com ajuste nas caldas). Novamente a hipótese nula foi considerada.

Parâmetros	<i>valor – p</i>
Período	0,18337
Magnitude	0,12288

Tabela 4.1: O teste de Anderson-Darling para os parâmetros período e magnitude. A segunda coluna refere-se a probabilidade de significância com ajuste nas caldas.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as funções de distribuição de probabilidade acumulada para período orbital e magnitude Kepler.

4.5.1 Sistemas descartados

Entre os 100 sistemas selecionados do catálogo foram descartados inicialmente 17. Após ajustes, verificou-se que 5 sistemas estavam contaminando a amostra de 83. Portanto, os descartes estão classificados em dois grupos: sem ajuste e contaminações. Os sistemas para os quais não houve convergência no ajuste pelo código JKTEBOP constituem o primeiro grupo e os sistemas que sofreram ajuste mas os resultados foram inconsistentes estão classificados como contaminações.

Os sistemas que não sofreram ajuste pelo código, listados na Tabela 4.2 e assinalados com “S”, apresentam diferentes anomalias em suas curvas de luz. Por exemplo, picos periódicos ou aperiódicos fora dos eclipses e/ou eclipses pouco evidentes. Alguns sistemas apresentam características de estrela variável intrínseca, não cabendo uma discussão a respeito da natureza desses sistemas neste trabalho.

Os sistemas classificados como contaminação sofreram ajuste com o código JKTEBOP, ou seja, tiveram parâmetros calculados, mas as incertezas e a inconsistência dos valores para esses sistemas comprometem a análise da amostra. Os parâmetros período e magnitude foram considerados para efeito de teste de representatividade (seção 4.5) e análise de resultados (seção 5.1), pois são parâmetros consistentes cuja estimativa não depende dos demais. A

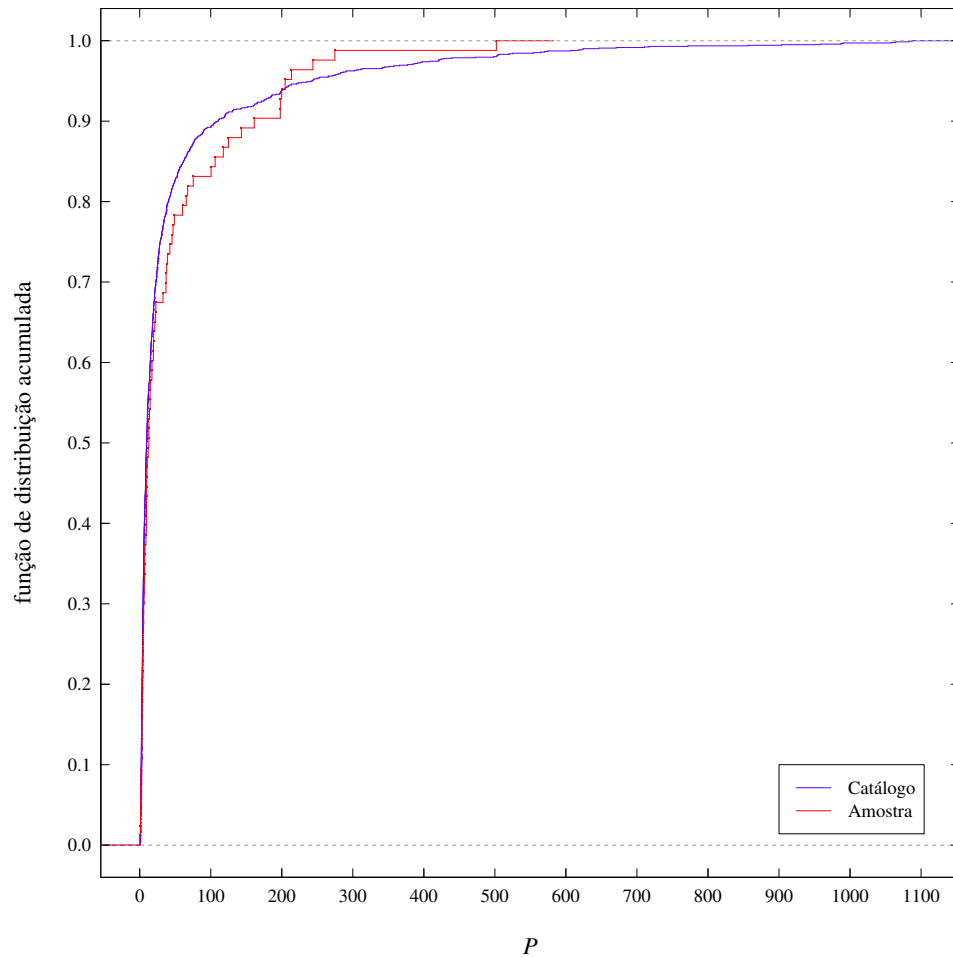


Figura 4.3: A função de distribuição de probabilidades acumulada do parâmetro período. Na cor azul as estrelas do catálogo e na cor vermelha as estrelas da amostra.

<i>KIC</i>	<i>Classificação</i>	<i>KIC</i>	<i>Classificação</i>
2440757	<i>C</i>	3757588	<i>S</i>
5817566	<i>S</i>	6758917	<i>S</i>
6989235	<i>C</i>	7362696	<i>S</i>
7678434	<i>S</i>	7918172	<i>S</i>
7940533	<i>S</i>	8458207	<i>C</i>
9140402	<i>S</i>	9834719	<i>S</i>
10091110	<i>S</i>	10287248	<i>S</i>
10464078	<i>S</i>	10514770	<i>C</i>
10616571	<i>S</i>	10857519	<i>S</i>
11100657	<i>S</i>	11706658	<i>S</i>
11824222	<i>S</i>	12365000	<i>C</i>

Tabela 4.2: Tabela com classificação de descartes. Os sistemas de KIC classificados em “sem ajuste” estão assinalados com “S” e os sistemas classificados em “contaminação” estão assinalados com “C”.

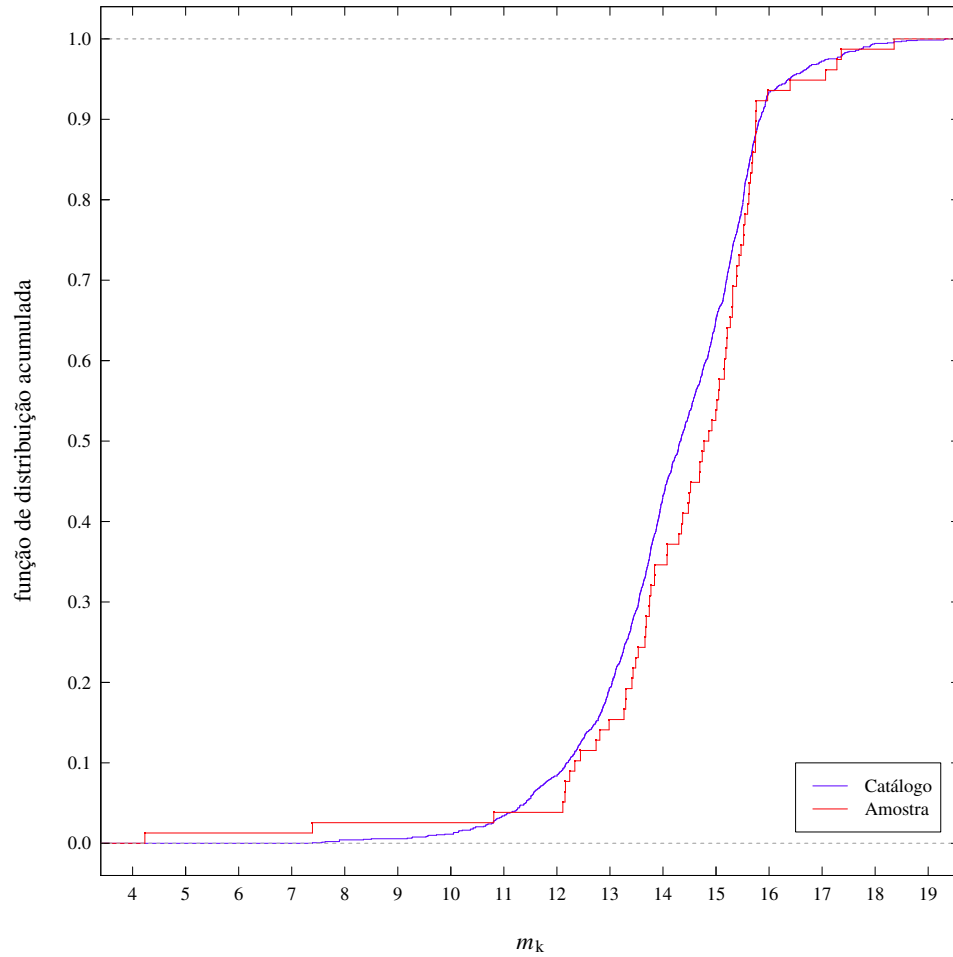


Figura 4.4: A função de distribuição de probabilidades acumulada do parâmetro magnitude. Na cor azul as estrelas do catálogo e na cor vermelha as estrelas da amostra.

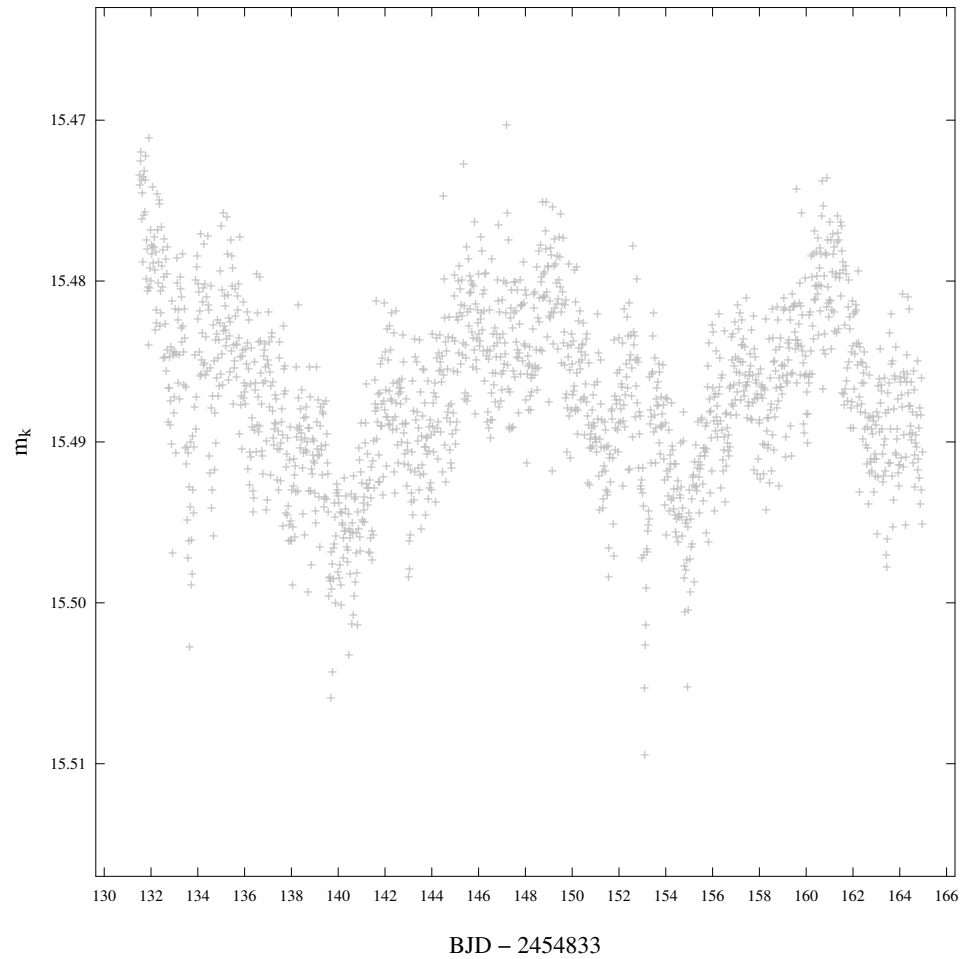


Figura 4.5: Sistema de *KIC* 10464078, classificado como sem ajuste. Eclipses pouco evidentes e pouca quantidade de pontos. O tempo, eixo horizontal, está graduado em Data Juliana Baricêntrica (*Barycentric Julian Date*). O eixo vertical fornece a magnitude Kepler.

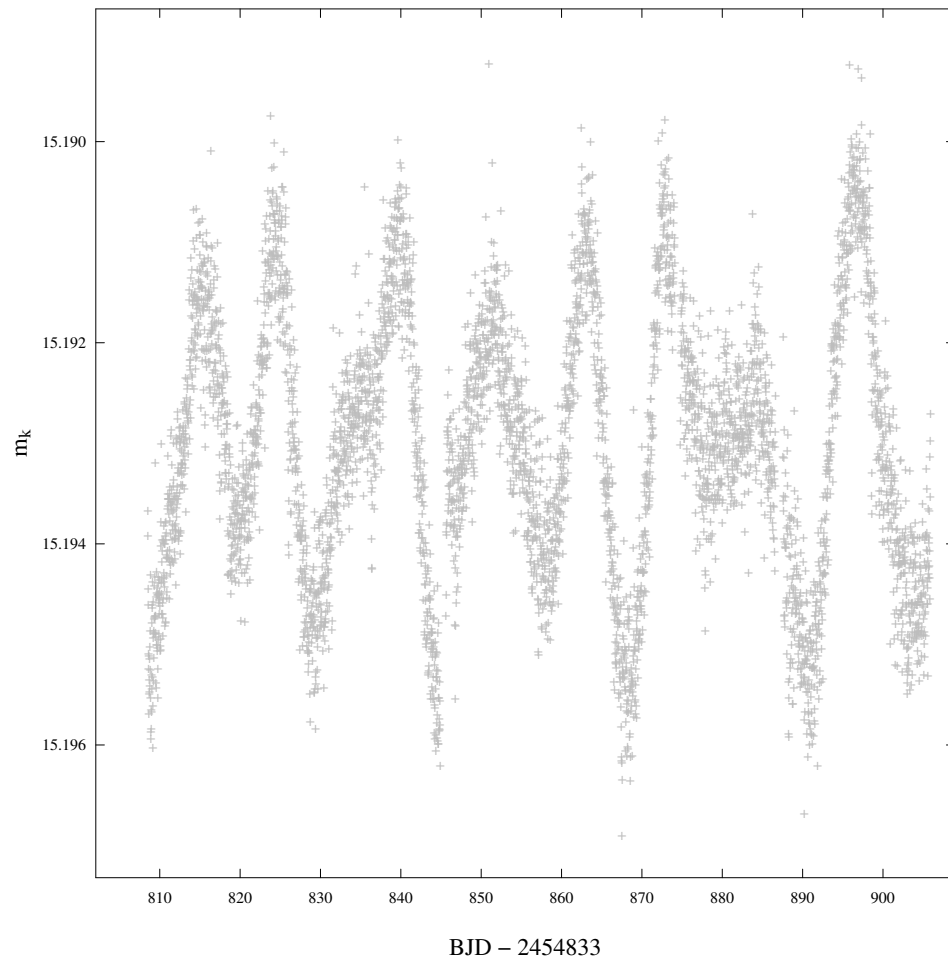


Figura 4.6: Sistema de *KIC* 7678434, classificado como sem ajuste. Não houve convergência com valores fisicamente possíveis para esse sistema. Note que esse sistema apresenta variações pequenas de magnitude durante o eclipse e grandes variações fora do eclipse. O tempo, eixo horizontal, está graduado em Data Juliana Baricêntrica (*Barycentric Julian Date*). O eixo vertical fornece a magnitude Kepler.

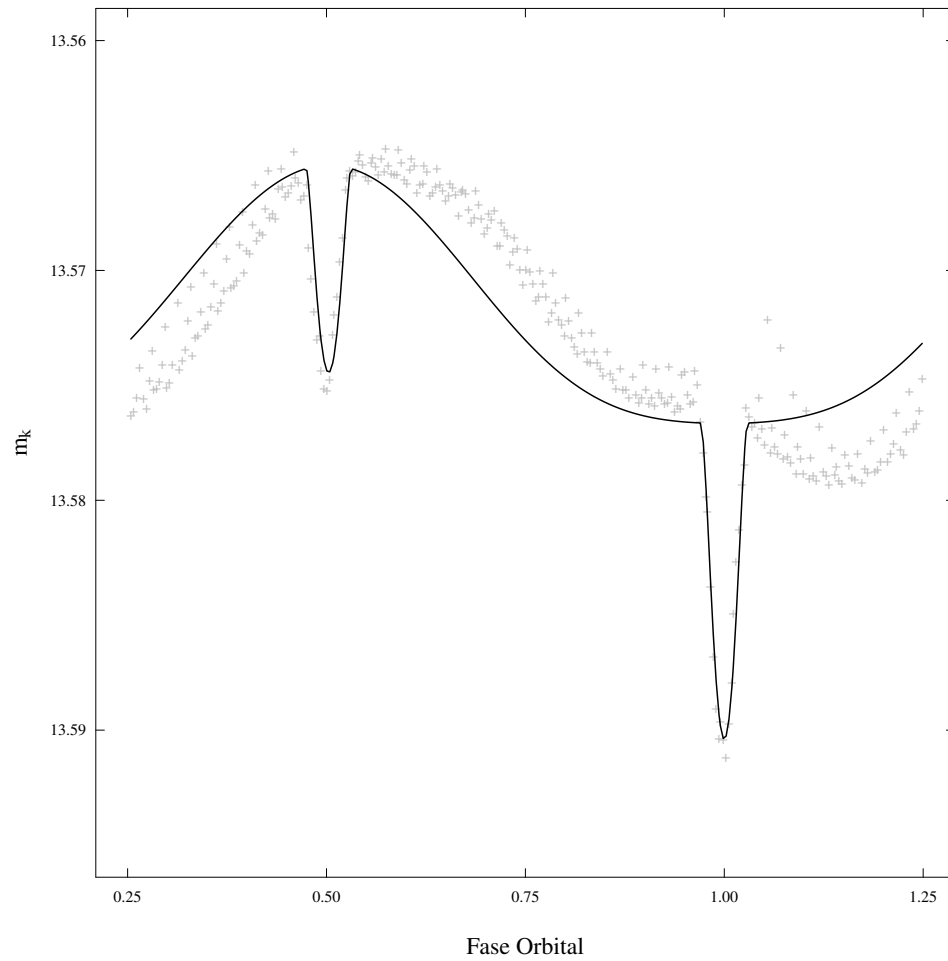


Figura 4.7: Sistema de *KIC* 12365000, classificado como contaminação. Houve ajuste com o código, os parâmetros foram calculados, mas as incertezas e a inconsistência dos valores comprometem a análise da amostra.

maioria dos sistemas descartados por contaminarem a amostra apresentam características de sistemas cujas componentes estão muito próximas. O código JKTEBOP é inadequado para sistemas em que as estrelas apresentam troca de matéria, exceto quando uma estrela intercepta o vento estelar da companheira, e quando os efeitos de maré não são suaves [17].

4.6 Ajustes

As curvas de luz foram obtidas da base de dados da Missão Kepler e posteriormente os arquivos de entrada do código JKTEBOP foram produzidos. Os valores iniciais dos parâmetros foram estimados com base no conhecimento prático adquirido sobre a geometria das curvas de luz. Através do código JKTLID os coeficientes de escurecimento do limbo foram estimados.

A tarefa 3 foi usada inicialmente com o objetivo de melhorar os valores iniciais de cada parâmetro. Para algumas curva de luz, onde não houve bom ajuste na tarefa 3, foi usada a tarefa 5, também com o mesmo objetivo. Após a verificação dos valores iniciais, foi usada a tarefa 7. O número de reamostragens de *bootstrapping* foi o mesmo para todos os sistemas da amostra, totalizando 1.000 reamostragens cada. Todos os parâmetros de saída apresentam intervalos de confiança para σ e 2σ .

A produção das curvas de luz requereu um novo ajuste. Este ajuste foi realizado usando os valores de saída da tarefa 7 fixados. A tabela 4.3 apresenta os parâmetros de 4 sistemas da amostra, selecionados aleatoriamente, com as saídas da tarefa 7. As barras de erro são simétricas em torno do melhor ajuste com intervalo de confiança de 2σ .

<i>KIC</i>	<i>P(dias)</i>	<i>e</i>	$r_a + r_b$	<i>J</i>
4851464	$5,54825 \pm 0,00002$	$0,03 \pm 0,03$	$0,159 \pm 0,005$	$0,099 \pm 0,004$
5115178	$12,85163 \pm 0,00006$	$0,2101 \pm 0,0001$	$0,103 \pm 0,002$	$0,9 \pm 0,4$
8314801	$37,1832 \pm 0,0001$	$0,386 \pm 0,003$	$0,0530 \pm 0,0001$	$1,1 \pm 0,1$
8879915	$3,44262 \pm 0,00002$	$0,01 \pm 0,01$	$0,161 \pm 0,001$	$0,45 \pm 0,07$

Tabela 4.3: Exemplo de parâmetros obtidos com o JKTEBOP para os sistemas de *KIC* 4851464, 5115178, 8314801 e 8879915. As barras de erro foram estimadas pelo método de *bootstrapping* conforme a tarefa 7 do código. A tabela completa para todos os sistemas é apresentada no Apêndice.

A Figura 4.8 apresenta os histogramas das distribuições de soma da fração dos raios, excentricidade, razão de brilho central de superfície, inclinação orbital, razão dos raios e

razão de luminosidade, resultantes da análise de erro realizada em todos os sistemas que não sofreram exclusão da amostra.

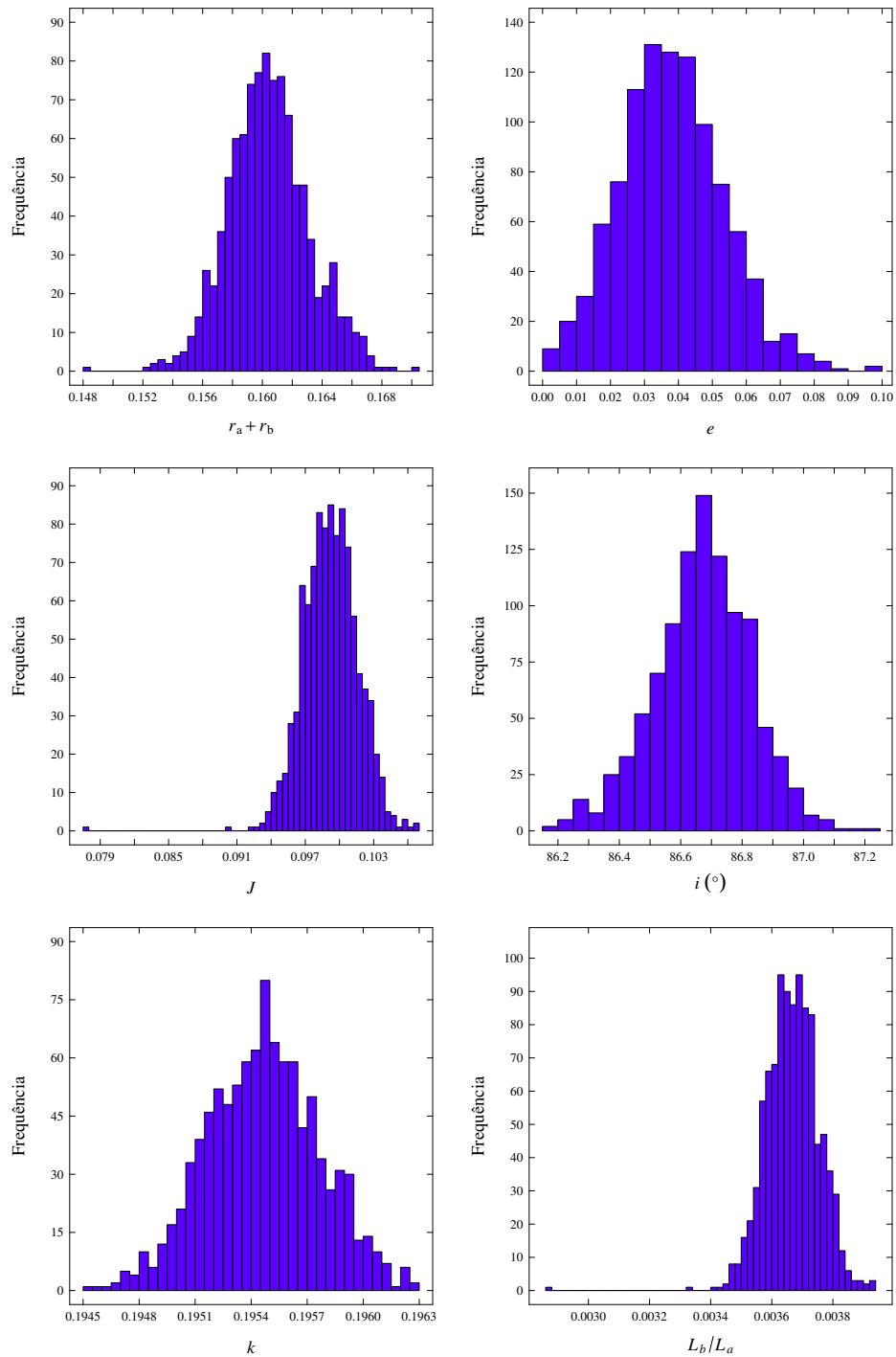


Figura 4.8: Valores obtidos nas 1.000 simulações de *bootstrapping* para os parâmetros soma da fração dos raios, excentricidade, razão de brilho central de superfície, inclinação orbital, razão dos raios e razão de luminosidade, referentes ao sistema de *KIC 4851464*.

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 são exemplos de curvas de luz. No eixo vertical a magnitude Kepler e no eixo horizontal a fase orbital. Na cor cinza os dados observados e a linha cheia o melhor ajuste. Na parte inferior da figura, apresentamos a diferença entre as magnitudes observadas e calculadas ($O - C$). Foram plotadas 78 curvas, uma para cada sistema da amostra. O número de pontos na curva de luz varia de acordo com a disponibilidade e qualidade dos dados fornecidos pela Missão Kepler. Priorizou-se os pontos do *quarter* 9, pois o satélite encontrava-se em plena atividade e não houveram eventos que comprometessem a qualidade dos dados (histórico de eventos em: [33]).

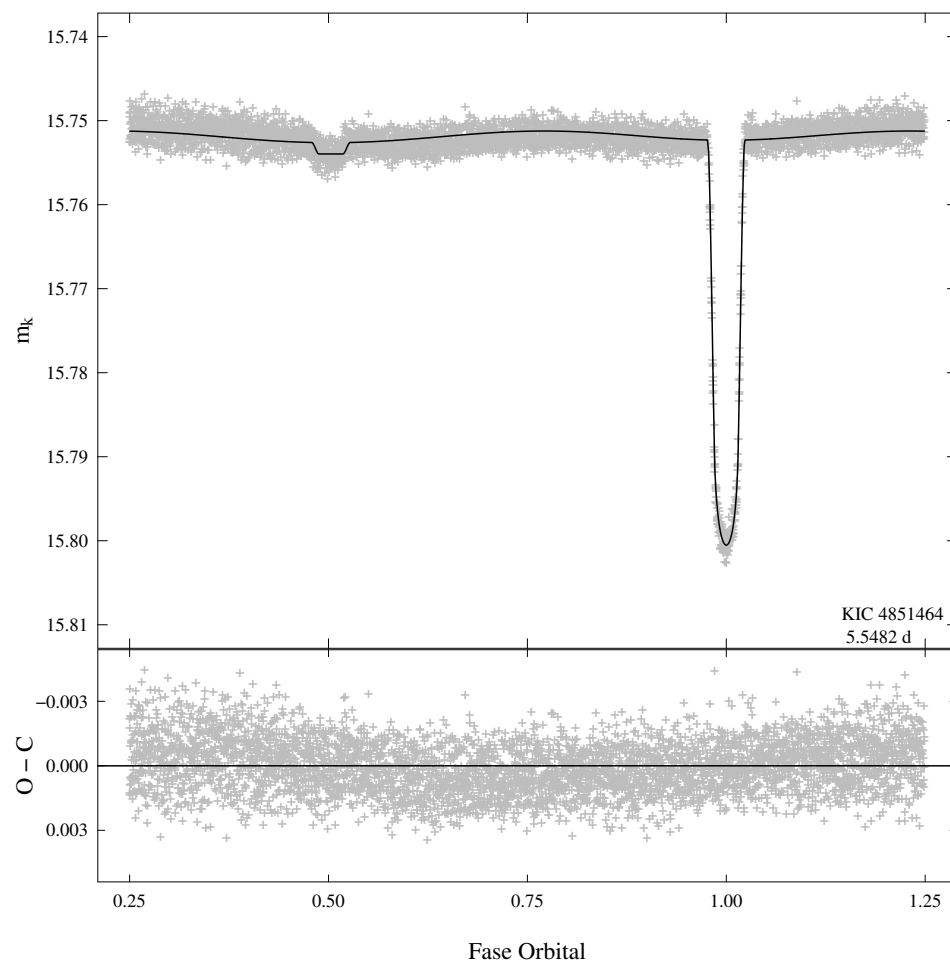


Figura 4.9: Curva de luz do sistema de KIC 4851464.

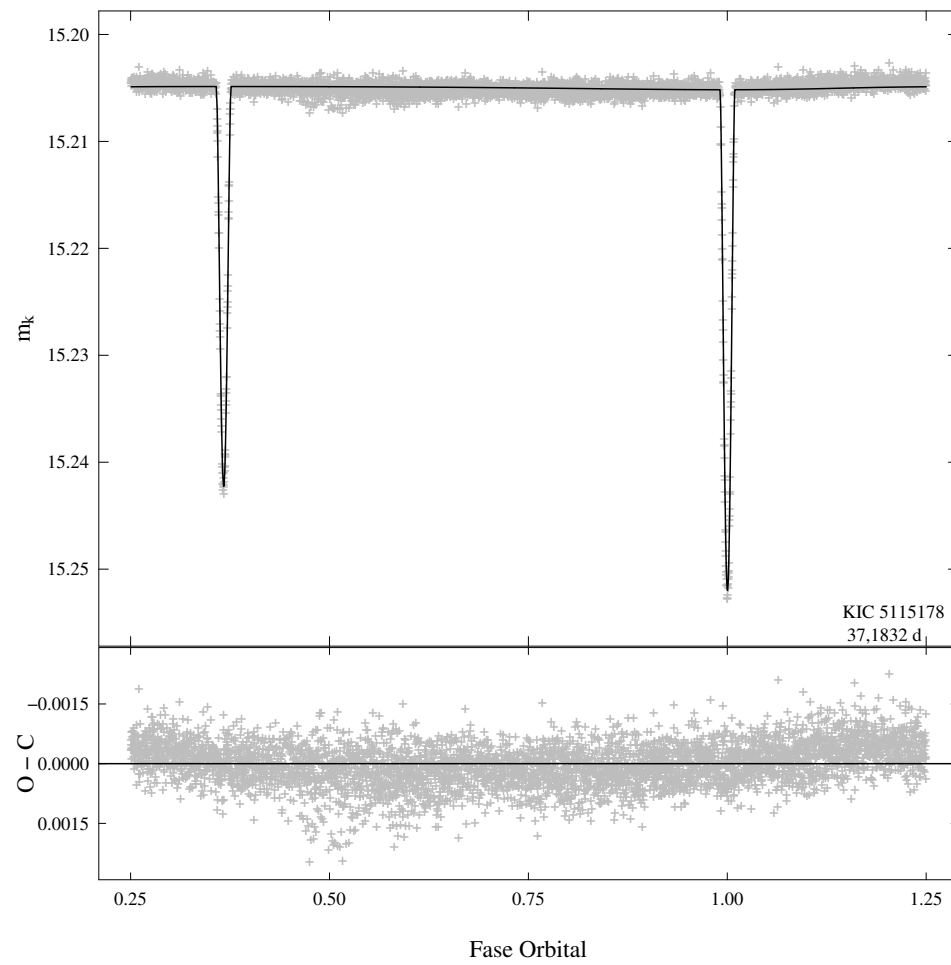


Figura 4.10: Curva de luz do sistema de KIC 8879915.

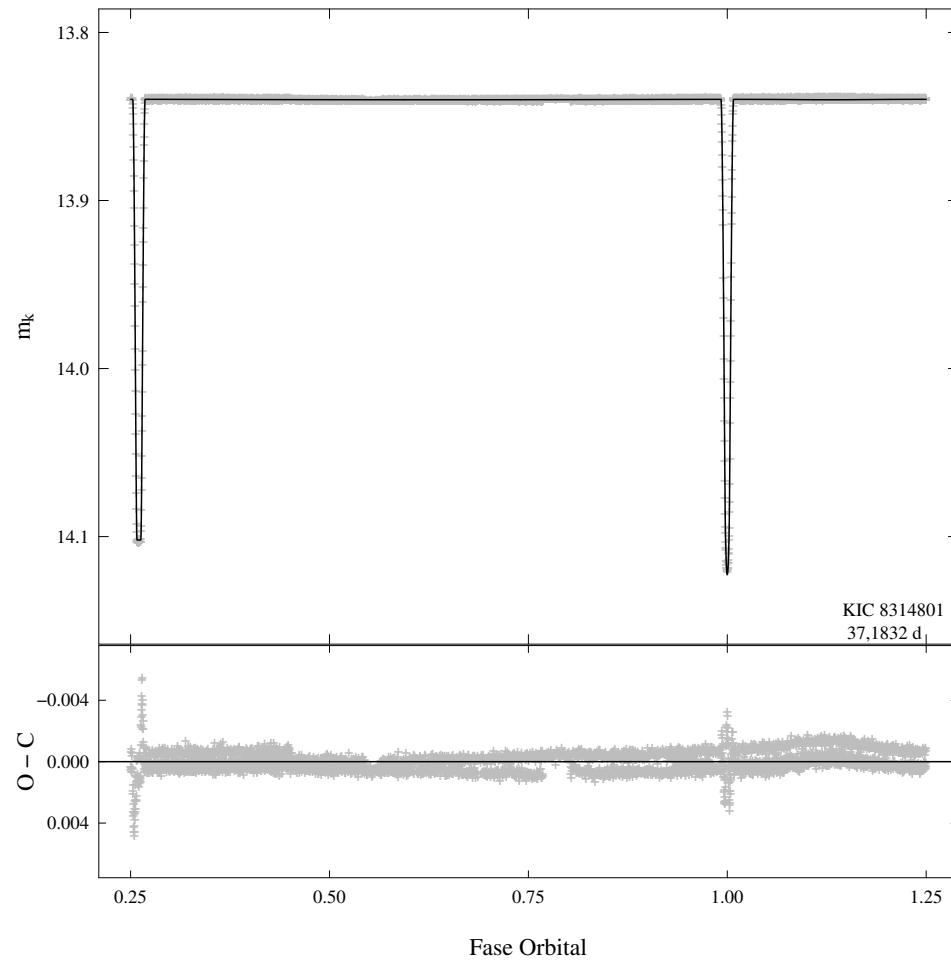


Figura 4.11: Curva de luz do sistema de KIC 83144801.

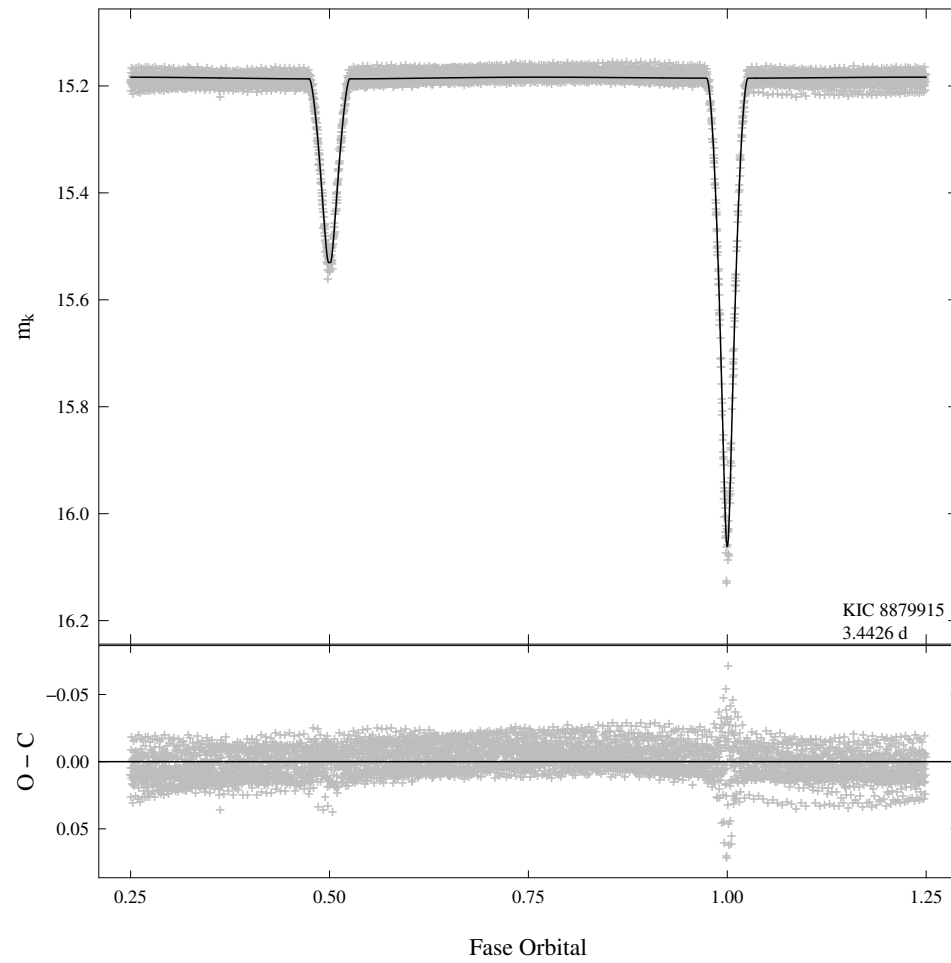


Figura 4.12: Curva de luz do sistema de KIC 8879915.

Capítulo 5

Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho estão organizados em três seções, cada uma delas com objetivos específicos. A comparação entre amostra e catálogo (seção 5.1), visa a análise da igualdade ou discrepância entre os parâmetros determinados pelo método tradicional e pelo método de redes neurais. Em seguida, a discussão das correlações entre os parâmetros determinados (seção 5.2) se dá com base nos resultados obtidos pelo código JKTEBOP. Por fim, o perfil estatístico da amostra (seção 5.3) é traçado com objetivo de caracterizar os sistemas binários selecionados do catálogo.

5.1 Amostra contra Catálogo

Entre os 83 sistemas da amostra, apenas 46 apresentam dados de P , m_k , $e \sin \omega$, $e \cos \omega$, $\sin i$ e $r_a + r_b$, no catálogo de sistemas binários eclipsantes da Missão Kepler. Os parâmetros P e m_k são divulgados para todos sistemas da amostra e quase todos os sistemas do catálogo. Foram excluídos 5 sistemas por contaminação (discussão na seção 4.5.1), portanto, a análise é feita com base em 41 sistemas quando se investiga os parâmetros $e \sin \omega$, $e \cos \omega$, $\sin i$ e $r_a + r_b$, e baseada nos 83 sistemas quando se investiga os parâmetros P e m_k .

Para todos os parâmetros são feitas duas análises, regressão linear e teste de igualdade, representações as quais são visualizadas nas respectivas figuras por retas. A reta de regressão linear segue o modelo $Y \sim \alpha + \beta X$, onde α é o intercepto e β o coeficiente angular. As letras Y e X são, respectivamente, as variáveis resposta e explanatória [34]. A reta de igualdade ou reta de 45° está inserida no contexto de comparação, pois os pontos sobre essa reta assumem o mesmo valor encontrado pelos métodos em questão. Assim, o coeficiente angular da reta

de igualdade vale 1.

Nesse tipo de análise adotou-se que as variáveis respostas são parâmetros estimados através do método de redes neurais e as variáveis explanatórias são parâmetros estimados com o código JKTEBOP. Nos eixos horizontal e vertical estão representadas as variáveis explanatória e resposta, respectivamente. Supondo a correlação linear entre os parâmetros obtidos com o código JKTEBOP e os divulgados no catálogo, o coeficiente de correlação (r^2) é calculado em cada distribuição.

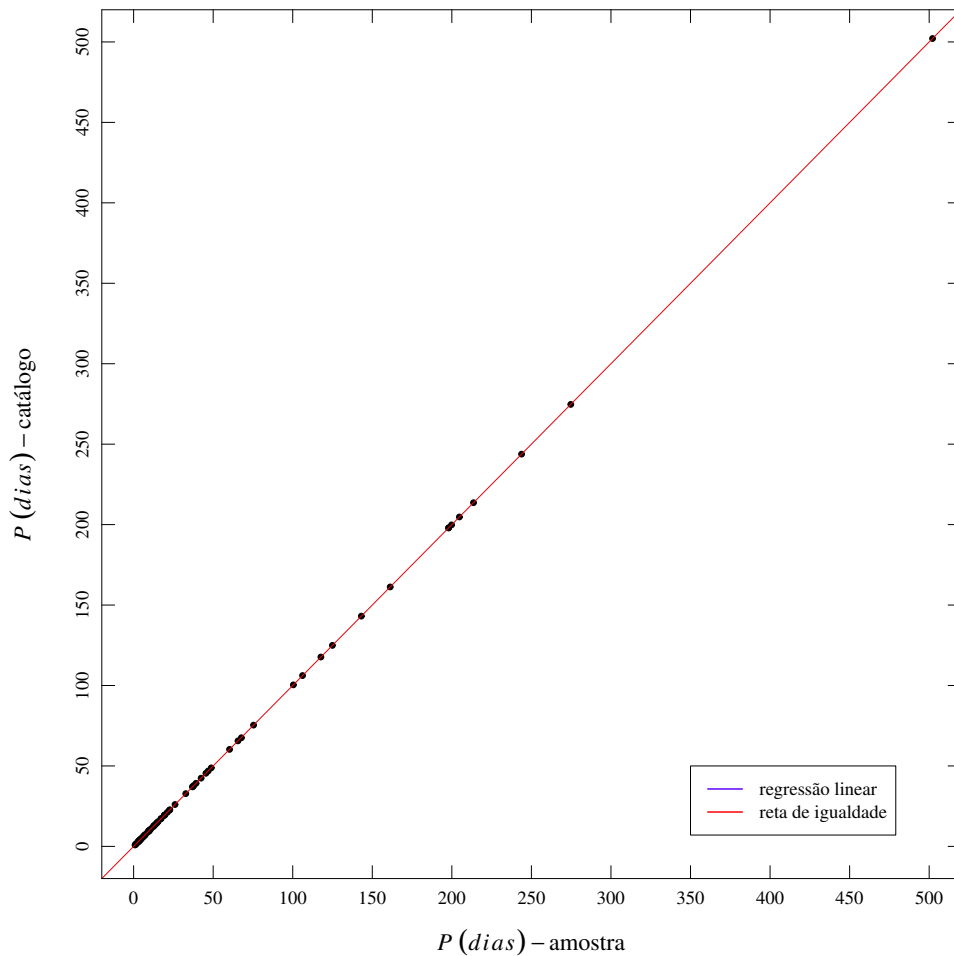


Figura 5.1: O período orbital para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha. A reta de regressão linear, para este parâmetro, coincide visualmente com a reta de igualdade. Os 83 sistemas selecionados contam com períodos divulgados no catálogo de binários eclipsantes.

O período orbital é um parâmetro de importância ímpar, pois relaciona-se fortemente a parâmetros orbitais e físicos (veja seção 5.2). A Figura 5.1 deixa claro a forte concordância

entre os períodos da amostra e catálogo, para os mesmo sistemas, sem apresentar desvio perceptível da reta de igualdade. Mesmo com barras de erro relativas a 2σ e da ordem de 10^{-4} , o desvio da reta de igualdade não torna-se visível ao comparar os resultados encontrados pelos dois métodos. Os coeficientes encontrados na regressão linear da distribuição foram $\alpha = -0.002$ e $\beta = 0.99$. O desvio quadrático médio para a reta de regressão é da ordem de $0,02$ e o coeficiente de correlação linear encontrado vale 1, ou seja, correlação linear máxima.

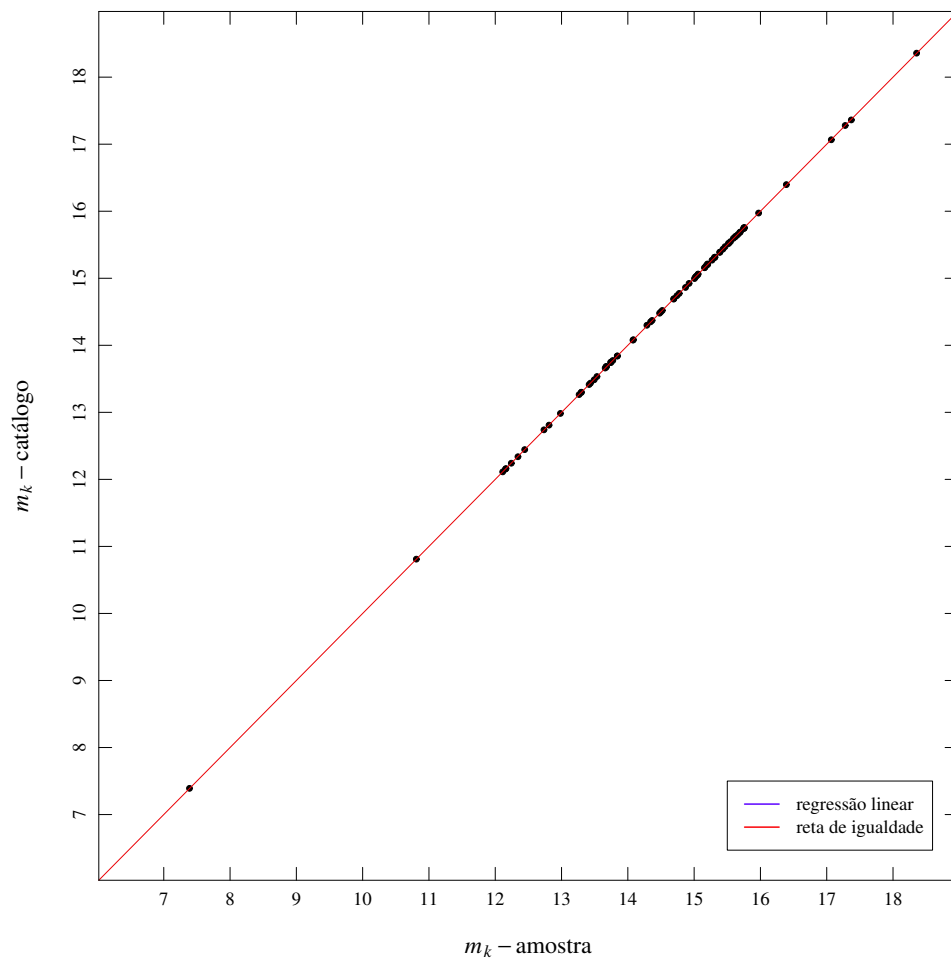


Figura 5.2: Distribuição do parâmetro magnitude para sistemas da amostra (X) e catálogo (Y). A reta de igualdade e a reta de regressão linear coincidem visualmente. As barras de erro, da ordem de 10^{-4} , são relativas a um intervalo de confiança de 2σ .

A Figura 5.2 expõe a distribuição do parâmetro magnitude para os 83 sistemas selecionados do catálogo. A reta de regressão linear (azul) é escrita com o coeficiente angular $0,99$, valor muito próximo ao atribuído a reta de igualdade. O desvio quadrático médio é muito pequeno, da ordem de 10^{-3} . Assim, como ocorre com o período orbital, há grande

concordância entre os métodos tradicional e de redes neurais ao se determinar a magnitude Kepler do sistema. A base de dados da Missão Kepler fornece a curva de luz medida em fluxo e tempo, enquanto o código JKTEBOP foi escrito para trabalhar com curvas de luz dadas em magnitude e tempo. Portanto, foi necessário a conversão do fluxo em magnitude através da seguinte equação:

$$m'_k = -2,5 \log F_N + m_k. \quad (5.1)$$

Onde m'_k é a magnitude do ponto na curva, F_N o fluxo normalizado por divisão e m_k a magnitude do sistema. A magnitude Kepler (m_k) adotada na conversão está disponível no catálogo de sistemas binários eclipsantes de Missão Kepler. Como esperado, o coeficiente de correlação encontrado foi máximo, 1.

A componente radial da excentricidade, expressa por $e \sin \omega$, não é um parâmetro de grande precisão quando calculado apenas com dados da curva de luz, podendo ser corrigido somente quando estão disponíveis as curvas de velocidade radial dos sistemas. Tal parâmetro pode ser estimado como [17]:

$$e \sin \omega \simeq \frac{T' - T}{T' + T}. \quad (5.2)$$

Onde a duração dos eclipses primário e secundário é expressa através de T e T' , respectivamente. Assim, $e \sin \omega$ é visto como a duração relativa dos eclipses. A duração dos eclipses foi esquematizada anteriormente na Figura 2.6.

A reta regressão linear apresenta na Figura 5.3 tem coeficiente angular igual a 0,45 e desvio quadrático médio de 0,01. O coeficiente de correlação linear obtido foi 0,46. A discrepância entre as medidas de $e \sin \omega$ é considerada grande, podendo estar vinculada à limitação da natureza dos dados usados para ajuste pelo código JKTEBOP, assim como a natureza da curva de luz utilizada (PDC) e também ao método de redução de dados empregado nas curvas de luz usadas na elaboração do catálogo. As barras de erro para este parâmetro são relativamente maiores se comparadas aos outros parâmetros, refletindo o grau de incerteza na obtenção dos resultados, que pode estar relacionado a qualidade da curva de luz utilizada.

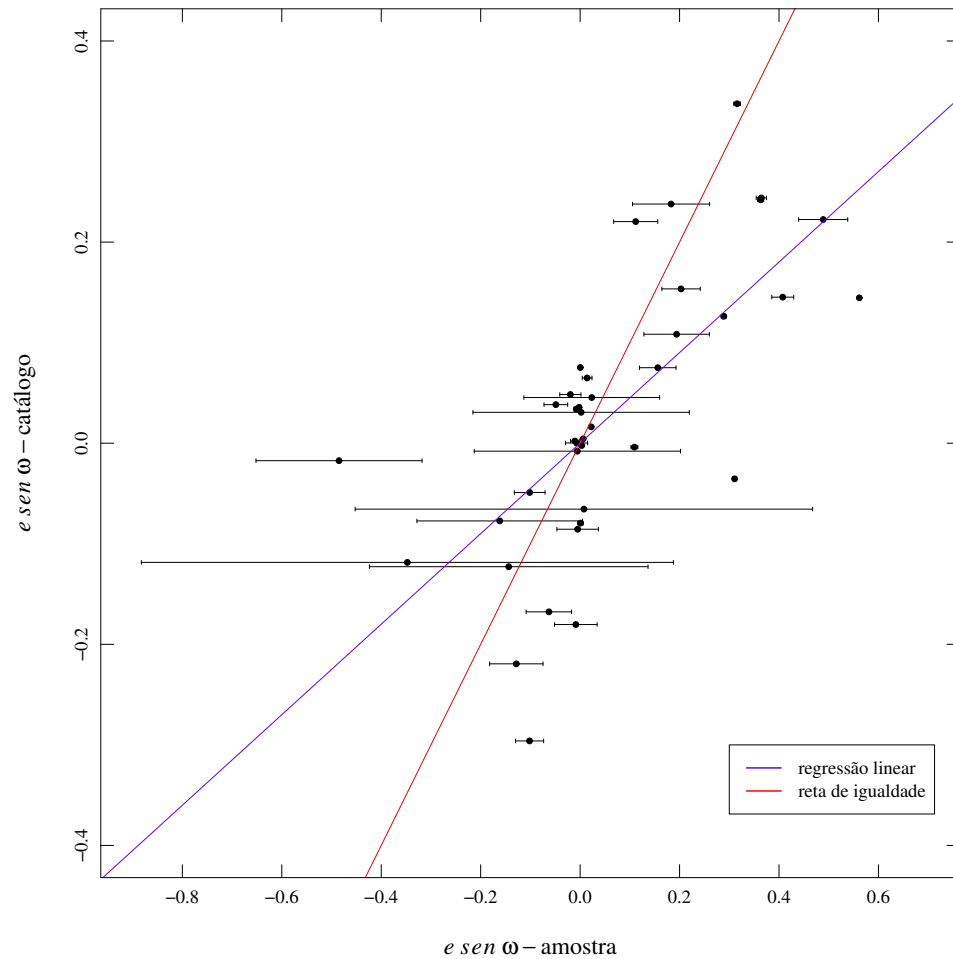


Figura 5.3: Parâmetro $e \text{ sen } \omega$ para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha e a regressão linear é dada pela reta de cor azul. As barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 2σ .

A componente tangencial da excentricidade, expressa por $e \cos \omega$, depende do tempo do mínimo secundário em relação ao mínimo primário, ou seja, da separação entre os mínimos. A precisão do parâmetro quando estimado somente com curvas de luz é considerada boa, podendo ser obtido com [17]:

$$e \cos \omega \simeq \frac{\pi}{2} \left(\frac{t_{sec} - t_{pri}}{P} - 0,5 \right). \quad (5.3)$$

Onde t_{pri} e t_{sec} são as datas de ocorrência dos eclipses primário e secundário. A relação entre a excentricidade e a componente tangencial da excentricidade é que $|e \cos \omega| \leq e$ [5]. Visualmente este parâmetro é estimado pela diferença de fase entre os mínimos de luz. Por exemplo, uma separação dada por meia fase implica que o parâmetro tende a zero.

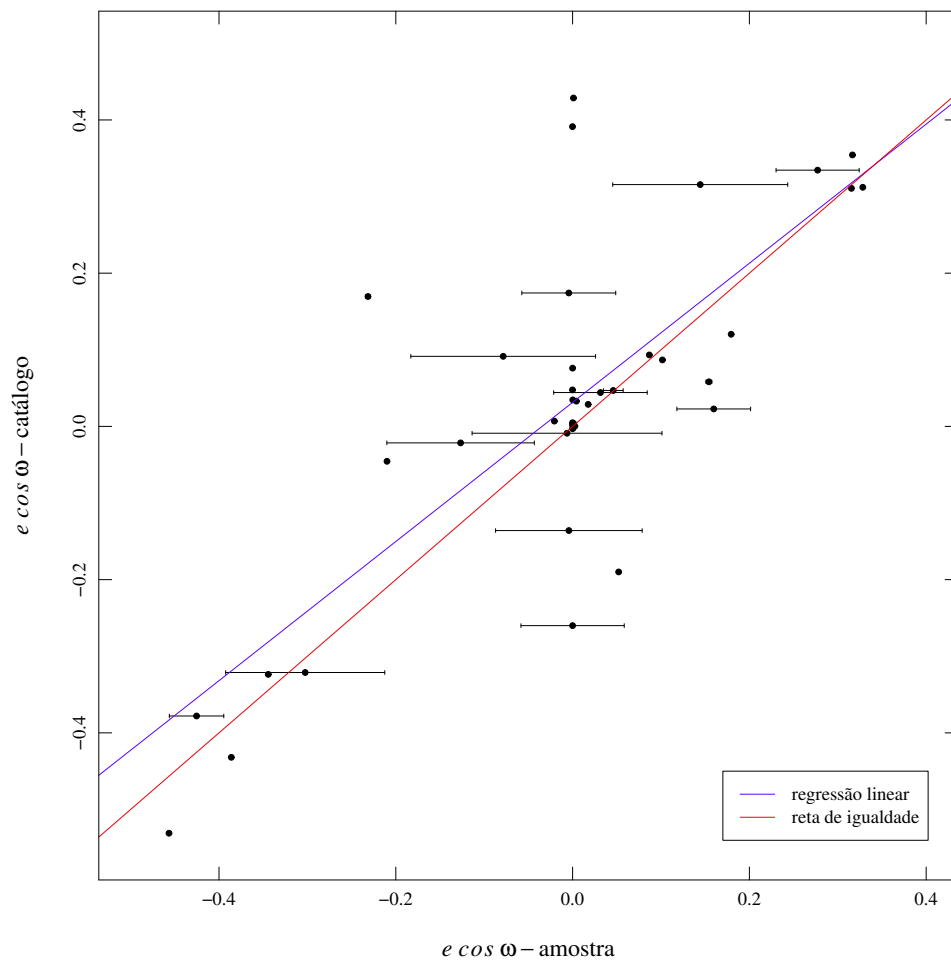


Figura 5.4: Parâmetro $e \cos \omega$ para sistemas do catálogo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) está representada na cor vermelha e a reta de regressão linear representada na cor azul. As barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 2σ .

Os coeficientes linear e angular da regressão que representa a distribuição (Figura 5.4) são, respectivamente, 0,03 e 0,91. O desvio quadrático médio assume valor de 0,13, enquanto a correlação linear para os resultados dos dois métodos tem como coeficiente 0,58. Visualmente as retas de regressão e igualdade são próximas, mas o espalhamento vertical em torno do valor zero atenua a correlação entre os resultados dos dois métodos, bem como aumenta muito o desvio percentual médio absoluto da distribuição.

A inclinação orbital deriva diretamente da forma do eclipse e do parâmetro b , definido como a distância projetada entre os centros das estrelas durante o eclipse, onde

$$b = \left[\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - \frac{\text{sen}^2 \tau \pi / P}{\text{sen}^2 T \pi / P} (1 + \sqrt{\Delta F})^2}{1 - \left(\frac{\text{sen}^2 \tau \pi / P}{\text{sen}^2 T \pi / P} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5.4)$$

para τ dado pelo intervalo de tempo entre o segundo e terceiro contatos, T dado pela duração do eclipse (esquematizados anteriormente na Figura 2.6) e ΔF dado pela variação de fluxo no eclipse. Por sua vez $\Delta F = k^2$, isto é, a profundidade do eclipse é igual a razão dos raios das componentes ao quadrado [35],

$$\Delta F \equiv \frac{F_{\text{sem eclipse}} - F_{\text{com eclipse}}}{F_{\text{sem eclipse}}} = \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^2. \quad (5.5)$$

Para o fluxo fora do eclipse, $F_{\text{sem eclipse}}$, e o fluxo durante o mínimo de luz, $F_{\text{com eclipse}}$. O raio das componentes primária e secundária denota-se por R_a e R_b , respectivamente. Por fim, a inclinação orbital assume a expressão [35]:

$$i = \cos^{-1} \text{left} \left(b \frac{R_a}{a} \text{right} \right). \quad (5.6)$$

Onde R_a é o raio da estrela primária do sistema e a o semieixo maior da órbita. O valor de a é determinado quando se conhece a massa da estrela, por esse motivo não dispomos desse parâmetro isoladamente. O código JKTEBOP encontra o valor de i , enquanto o catálogo fornece o valor de $\text{sen } i$. Assim, fez-se necessário a conversão dos valores obtidos pelo EBAI para a inclinação orbital dada em graus.

Figura 5.5 mostra a relação entre os resultados encontrados pelo método de redes neurais e pelo métodos tradicional, apresentando uma reta de regressão linear com coeficientes $\alpha = 34,52$ e $\beta = 0,57$. Observa-se que valores obtidos pelo método de redes neurais estão

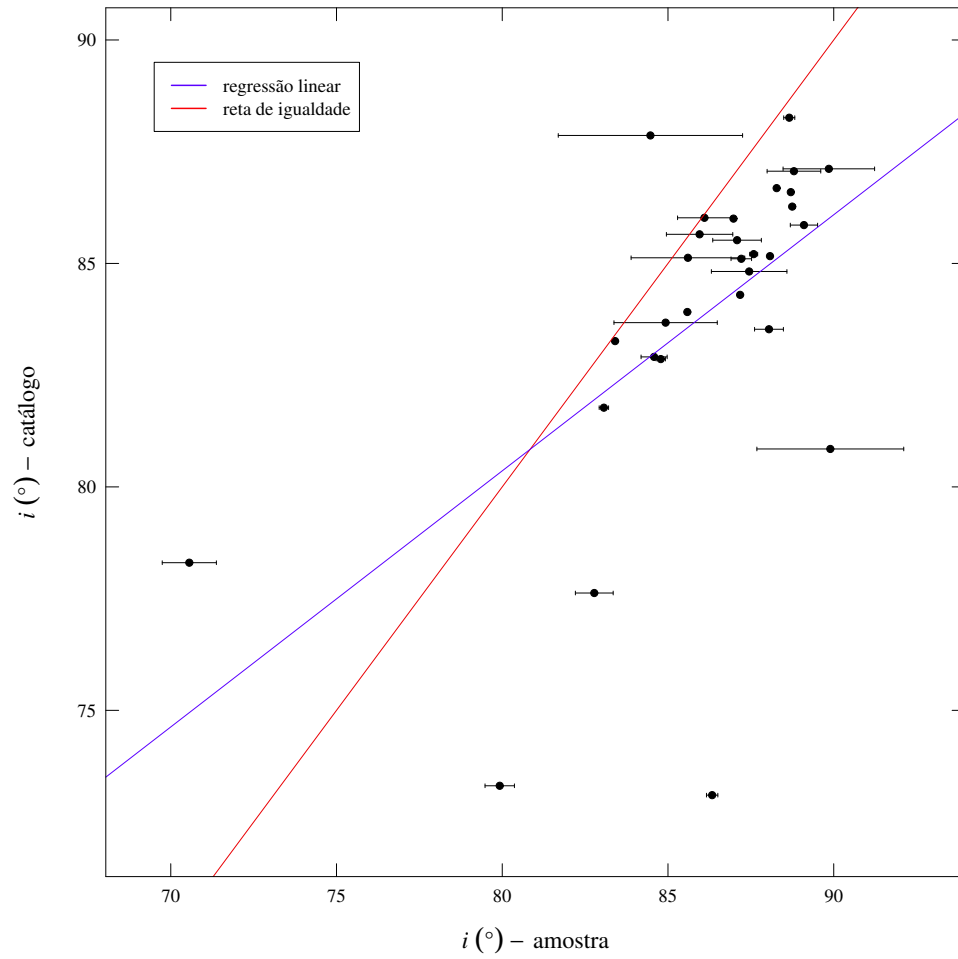


Figura 5.5: A inclina\u00e7\u00e3o orbital para sistemas do cat\u00e1logo (vertical) e amostra (horizontal). A reta de igualdade (45°) est\u00e1 representada na cor vermelha.

subestimando os resultados em relação ao método tradicional, para quase todos os sistemas. O desvio quadrático médio encontrado é de 3,08, indicando o acentuado espalhamento entre as medidas, também evidenciado pelo coeficiente de correlação linear (0,29).

A soma da fração dos raios é um parâmetro de boa precisão mesmo quando se tem apenas a curva de luz como fonte de dados [17]. A fração do raio individual, $\frac{R}{a}$, é estimada através da seguinte expressão [35]:

$$\frac{R}{a} = \left[\frac{\text{sen}^2 \frac{T\pi}{P}}{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 + b^2(1 - \text{sen}^2 \frac{T\pi}{P})} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.7)$$

Para uma duração total de eclipse dada por T e a profundidade do eclipse, em fluxo, dada por ΔF .

A reta de regressão observada na Figura 5.6 tem como coeficiente linear o valor de 0,04 e coeficiente angular no valor de 0,77, e o desvio quadrático médio é da ordem é 0,04. Visualmente, para a soma da fração dos raios, observa-se boa concordância entre as medidas obtidas pelos dois métodos, refletindo em um coeficiente de correlação linear de 0,68.

A tabela 5.1 sintetiza os coeficientes encontrados para todas as retas de regressão linear traçadas nas distribuições de P , m_k , $e \text{ sen } \omega$, $e \text{ cos } \omega$, i e $r_a + r_b$. Todas as retas de igualdade usadas apresentam coeficientes $\alpha = 0$ e $\beta = 1$. A medida do desvio quadrático médio é dado por σ , o desvio percentual médio absoluto dado por $\%_{\text{erro}}$ e a intensidade da correlação, dada por r^2 .

Parâmetro	α	β	N° de sistemas	σ	$\%_{\text{erro}}$	r^2
P	-0,0026	0,9999	83	0,0244	0,0413	1
m_k	0,0042	0,9997	83	0,0041	0,0188	1
$e \text{ sen } \omega$	0,0	0,4501	41	0,0972	175,1803	0,4656
$e \text{ cos } \omega$	0,0313	0,9080	41	0,1373	577,8869	0,5844
i	34,5167	0,5730	41	3,0833	2,4624	0,2915
$r_a + r_b$	0,0374	0,7756	41	0,0406	37,4163	0,686

Tabela 5.1: Os valores de α e β e o número de sistemas para as distribuição de um dado parâmetro. A fórmula geral da regressão é expressa por $Y \sim \alpha + \beta X$, onde a variável resposta Y está atribuída ao valor divulgado pelo catálogo e a variável explanatória X está atribuída ao valor encontrado pelo código JKTEBOP. A letra σ é o desvio quadrático médio, $\%_{\text{erro}}$ o desvio percentual médio absoluto e r^2 o coeficiente de correlação linear.

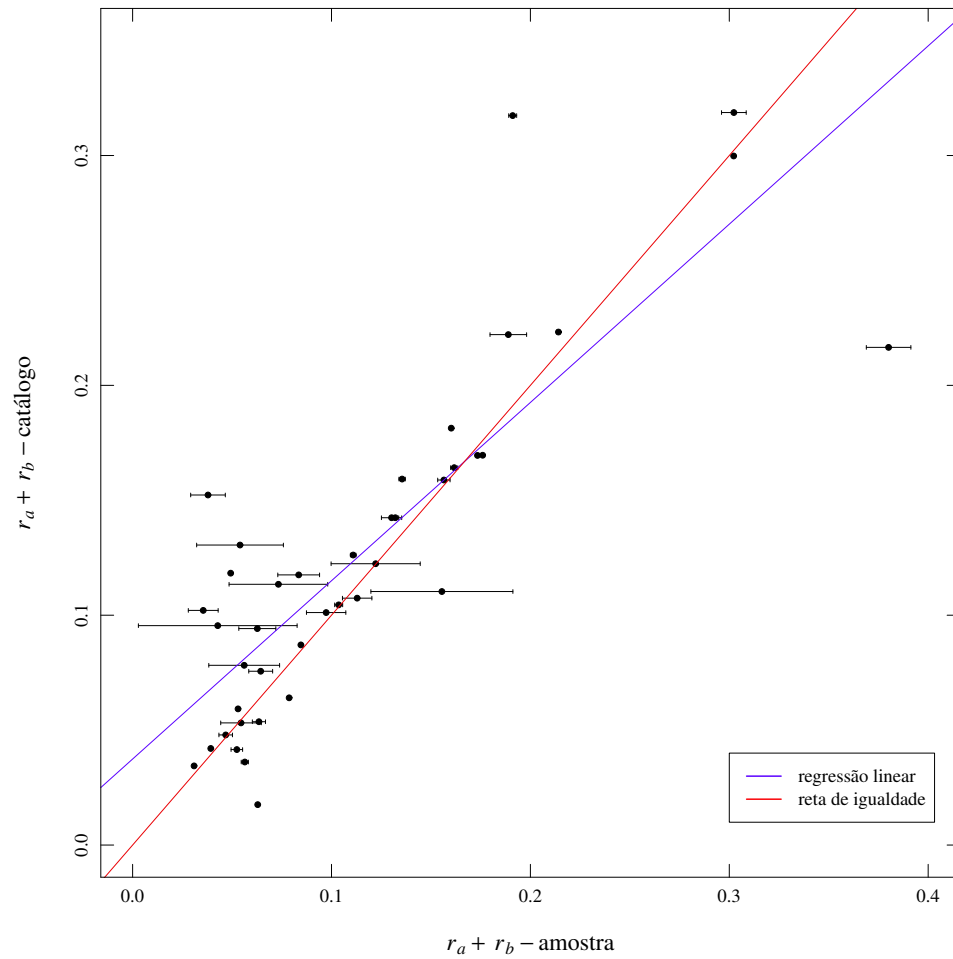


Figura 5.6: A distribuição do parâmetro soma da fração dos raios, com valores encontrados para amostra (X) e divulgados pelo catálogo (Y). Em cor vermelha a reta de igualdade, na cor azul a reta de regressão linear.

5.2 Correlações

A análise de dados neste trabalho envolve vários parâmetros orbitais e razões de parâmetros físicos. Para investigar como essas variáveis se relacionam, utilizamos o coeficiente de correlação de Spearman. O coeficiente de Spearman avalia o quão bem uma função monotônica arbitrária pode descrever uma relação entre duas variáveis, sem qualquer suposição sobre a distribuição de frequência e a relação linear das variáveis [36].

Intesidade da correlação	Interpretação
$\pm 0,9$ a $\pm 1,0$	muito forte
$\pm 0,7$ a $\pm 0,9$	forte
$\pm 0,5$ a $\pm 0,7$	moderada
$\pm 0,3$ a $\pm 0,5$	fraca
$\pm 0,0$ a $\pm 0,3$	insignificante

Tabela 5.2: Tabela para interpretar a intensidade do coeficiente de correlação. O valor de r_s pode variar entre $+1$ e -1 , caracterizando uma correlação e uma anticorrelação máximas, respectivamente. A coluna da esquerda fornece o intervalo para a intensidade da correlação e a coluna da direita fornece a interpretação mais adequada para cada intervalo. Fonte: Mukaka, 2012

A Tabela 5.2 apresenta a regra para interpretar o valor do coeficiente de correlação, seja ele linear ou não, caracterizando a intensidade de relação positiva ou negativa, no intervalo de 1 a -1 . O coeficiente positivo denota uma correlação, enquanto o coeficiente negativo denota uma anticorrelação entre as variáveis testadas. As correlações e anticorrelações exploradas neste trabalho limitam-se a intensidades fortes e muito fortes.

Como esperado, existe uma anticorrelação muito forte entre período orbital e soma da fração dos raios ($r_s = -0,91$), pois, para grandes órbitas espera-se um período orbital de valor grande. O semieixo maior da órbita (a) é o parâmetro que reflete o tamanho da orbita relativa do sistema (veja equação 5.7). A distribuição da Figura 5.7 é consistente com os resultados de Coughlin, em *Low-mass Eclipsing Binaries in the Initial Kepler Data Release*¹ [37], onde os parâmetros orbitais de sistemas binários eclipsantes de baixa massa, do campo do Satélite Kepler, foram obtidos usando o código JKTEBOP.

No contexto da soma da fração dos raios, a probabilidade de um sistema binário eclipsante ser detectado da Terra depende diretamente desse parâmetro. O parâmetro excentricidade

¹Binárias Eclipsantes de baixa massa na atualização inicial dos dados do Kepler

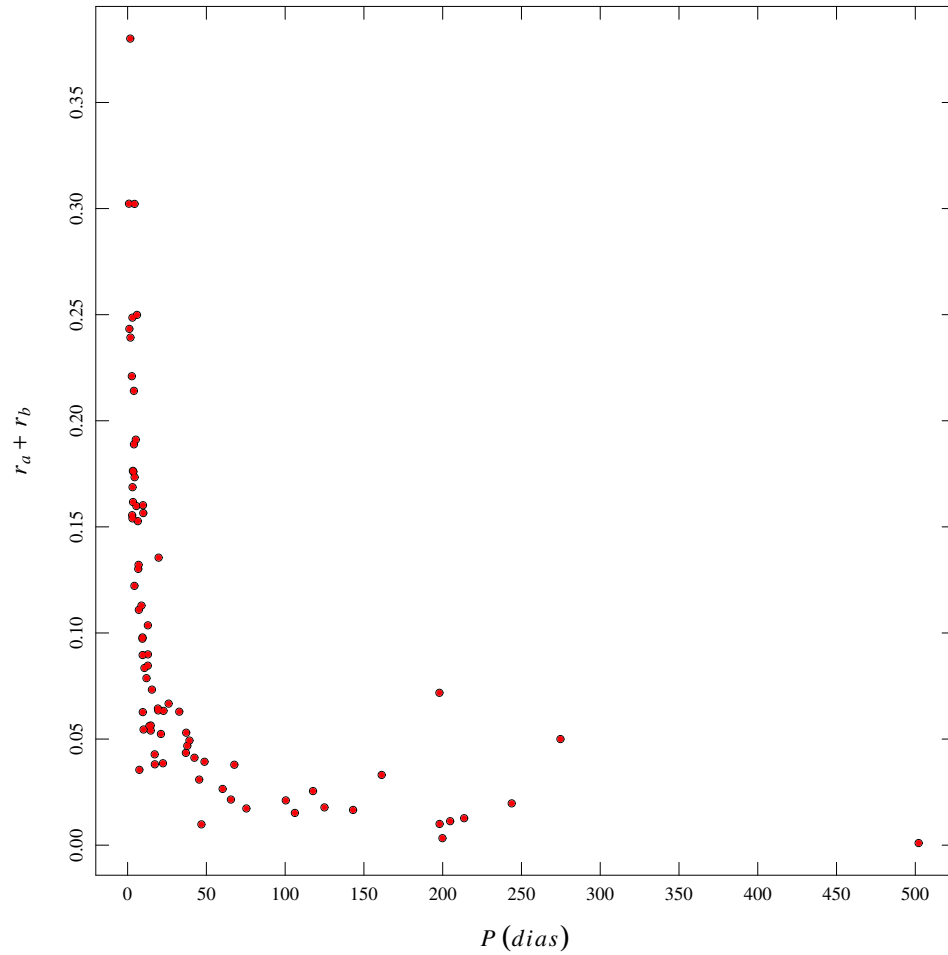


Figura 5.7: Os parâmetros período (P) e soma da fração dos raios ($r_a + r_b$) apresentam uma anticorrelação muito forte ($r_s = -0,91$). O período orbital, dado em dias, é o tempo decorrido entre dois mínimos primários de luz.

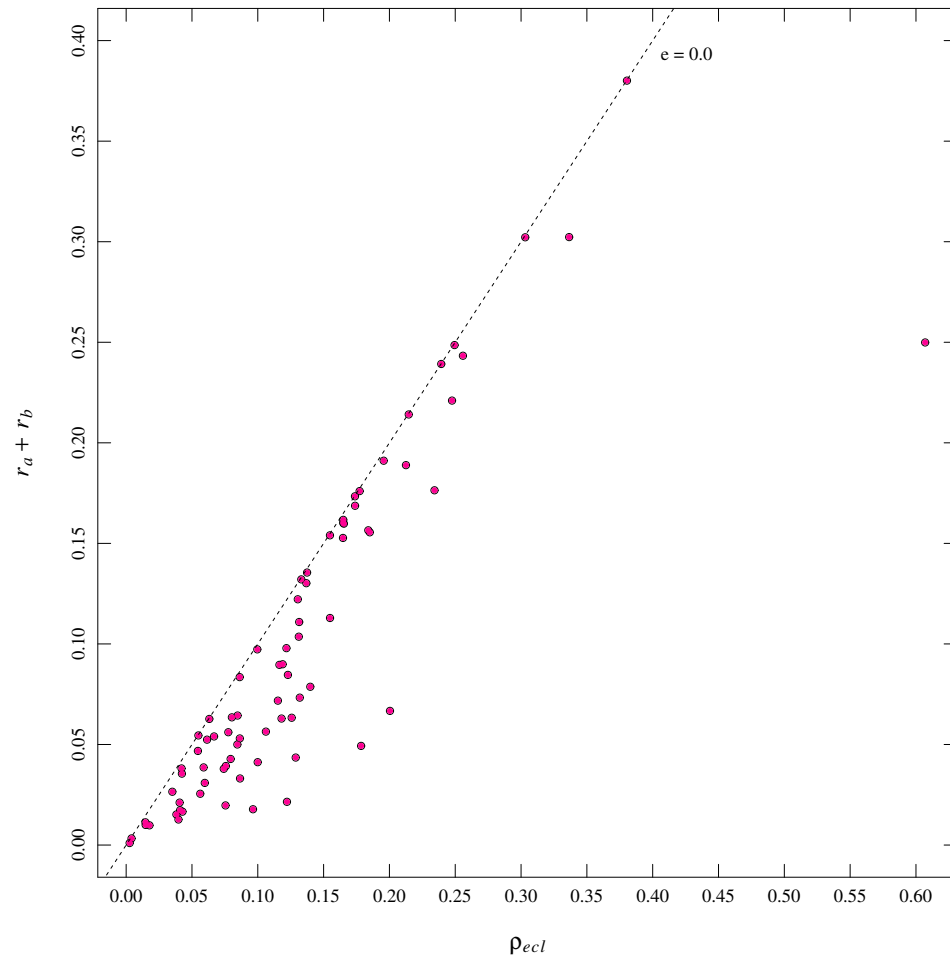


Figura 5.8: A relação entre a soma da fração dos raios e a probabilidade de detecção do eclipse no sistema binário. A linha tracejada equivale a posição que os sistemas ocupariam ou ocupam, para um valor nulo de excentricidade.

também influi na detecção de eclipses, tornando-os mais prováveis de detecção a medida que seu valor aumenta. Tal probabilidade é dada por [19]:

$$\rho_{ecl} = \frac{R_a + R_b}{a} \frac{1}{(1 - e^2)}. \quad (5.8)$$

Onde e é a excentricidade orbital e o termo $\frac{R_a + R_b}{a}$ é a soma da fração dos raios. Para órbitas circulares a Equação 5.8 se reduz ao equivalente do parâmetro soma da fração dos raios. A Figura 5.8 é a distribuição da probabilidade de detecção dos sistemas binários eclipsantes da amostra pela sua respectiva soma da fração dos raios. A linha tracejada equivale ao valor de excentricidade nulo, assim, é possível perceber o efeito das órbitas muito excêntricas favorecendo a detecção dos eclipses.

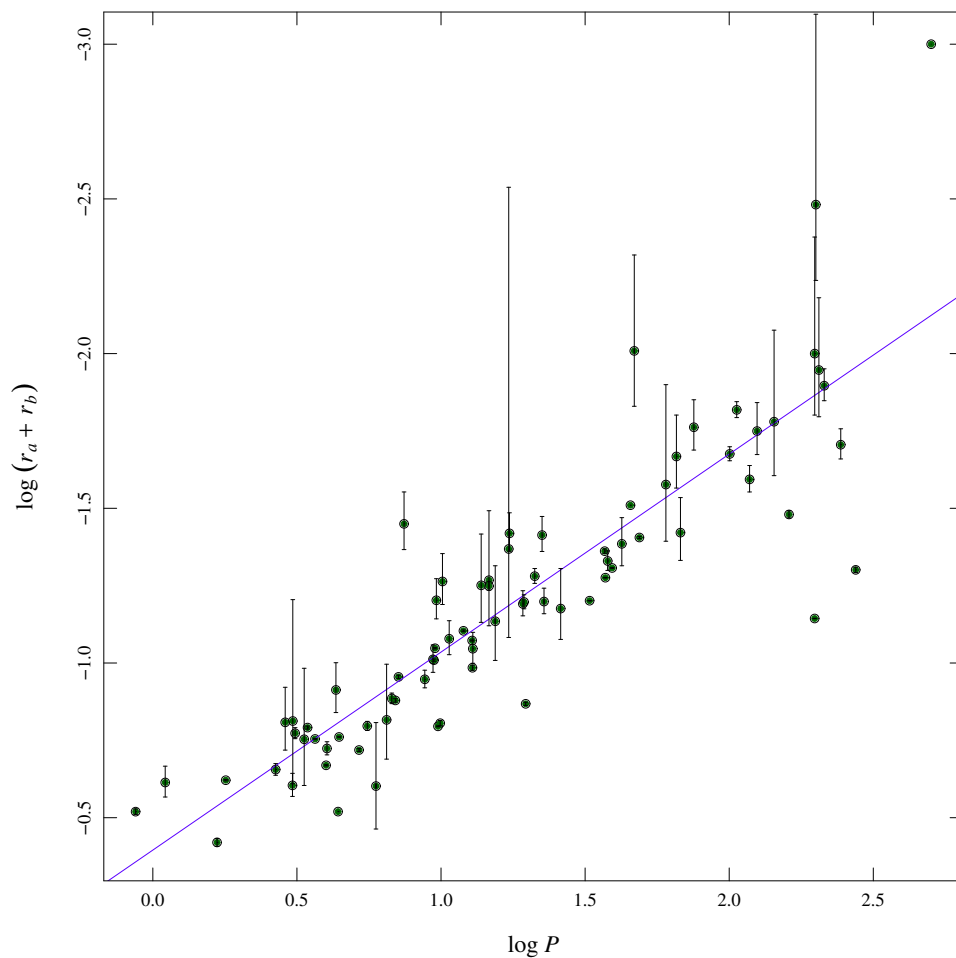


Figura 5.9: A distribuição dos parâmetros soma da fração dos raios e período orbital, com logaritmo. A reta de regressão está traçada em cor azul e apresenta coeficiente angular igual a 0,64.

Outra abordagem para investigar a correlação entre período orbital e soma da fração dos raios é analisar a distribuição das variáveis em escala logarítma, como na Figura 5.9. A reta de regressão apresenta coeficiente angular de 0,64 e o desvio quadrático médio é de 0,22. O coeficiente de correlação linear para a distribuição tem o valor de 0,77, caracterizando uma correlação linear forte. A transformação realizada entre as distribuições da Figura 5.7 e Figura 5.9 pode ser expressa como:

$$Y = \alpha X^\beta$$

$$\log Y = \log \alpha + \beta \log X. \quad (5.9)$$

Proporcionando a possibilidade de ajuste através de uma reta.

A excentricidade é um parâmetro que mede o formato ou o achatamento da órbita do sistema [19]. A correlação entre o período e excentricidade é bem conhecida na Astrofísica, em especial quando se investiga os efeitos de maré na evolução dos elementos orbitais de sistemas binários. A distribuição apresentada na Figura 5.10 é consistente com os resultados encontrados por Duquennoy e Mayor, em *Distribution and Evolution of Orbital Elements for 1 M_\odot Primaries*² [38], para sistemas binários espectroscópicos formados por estrelas de uma massa solar nos aglomerados *Hyades*, *Praesepe* e *Coma Berenice*. As órbitas com $P < 12$ dias apresentam uma tendência para valores de excentricidade próximos a zero, caracterizando órbitas sob efeito de circularização, enquanto órbitas com $P > 50$ dias apresentam valores maiores para excentricidade indicando que o processo da circularização da órbita ainda não sofreu forte influência dos efeitos de marés gravitacionais. Apesar da falta de um método para determinação de um período de *cutoff*, em particular devido a heterogeneidade de nossa amostra, a Figura 5.10 nos permite visualizar uma faixa de período em que o *cutoff* pode ocorrer. A função que descreve a estimativa assume a forma [39]:

$$e(P) = \begin{cases} 0, & \text{se } P \leq P_c \\ \alpha [1 - e^{\beta(P_c - P)}]^\gamma, & \text{se } P > P_c. \end{cases} \quad (5.10)$$

Esta função matemática é baseada em observações de distribuições de período, excentricidade e modelagem numérica baseada na teoria de Zahn (1977) [40]. A transição entre órbitas

²Distribuição e evolução dos elementos orbitais para primárias de 1 M_\odot

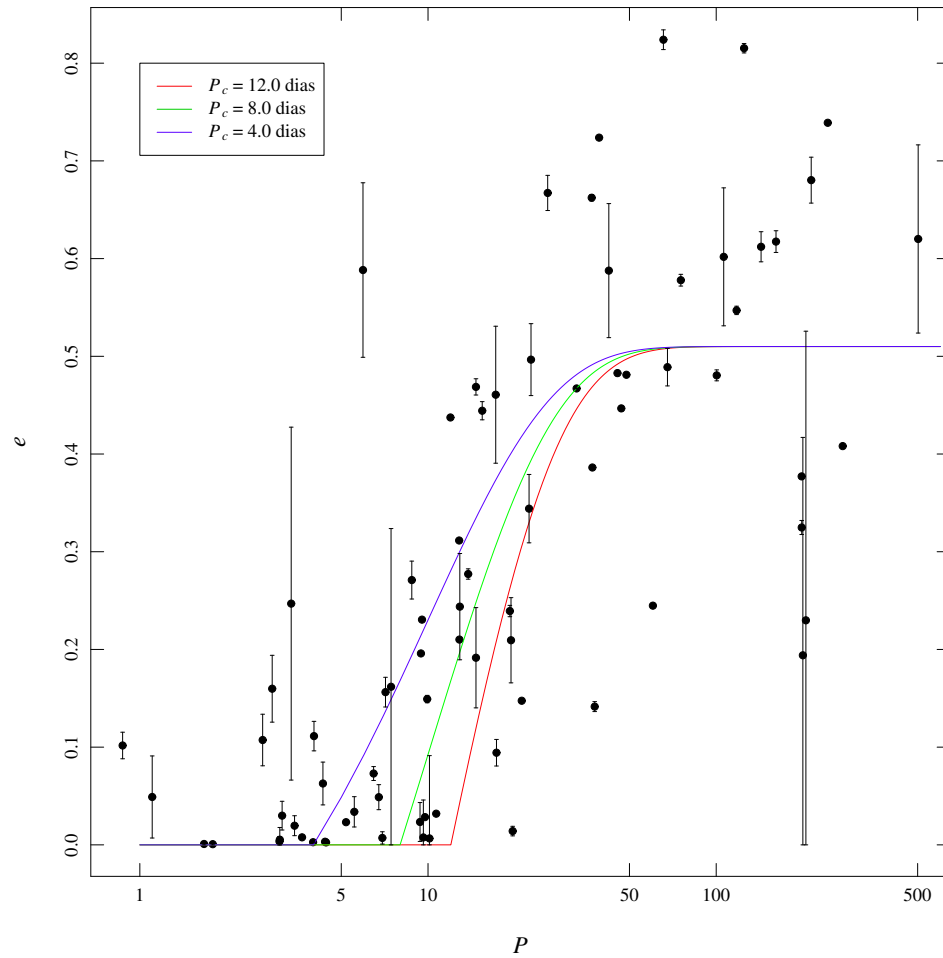


Figura 5.10: Distribuição do período orbital e excentricidade. As curvas assumem valores diferentes para o *cutoff* (P_c), período o qual as órbitas em sua maioria sofrem circularização. O coeficiente de correlação de Spearman é 0,76 e as barras de erro são relativas a um intervalo de confiança de 1σ .

excêntricas e circulares é conduzida pelo termo $e^{\beta(P_c-P)}$ e os coeficientes α , β e γ são, respectivamente, a média de excentricidade para os sistemas com período acima de 50 dias, a inclinação da curva de transição e o quanto rapidamente a curva muda entre os sistemas com excentricidade nula e o período de *cutoff* [39]. O coeficiente α encontrado para a distribuição da Figura 5.10 foi de 0,52, enquanto que β e γ foram determinados visualmente, assumindo os valores de 0,1 e 1,0, respectivamente.

A região superior esquerda da Figura 5.10, caracterizada por um grande valor de excentricidade e um dado período pequeno, não apresenta sistemas binários pois sistemas com essas características teriam suas componentes colidindo no periastro da órbita [41].

Assim como ocorre na distribuição da Figura 5.10, a Figura 5.11 apresenta uma região vazia, pois sistemas com grandes valores de $|e \cos \omega|$ e r_a teriam suas componentes em colisão no periastro [41]. O diagrama da Figura 5.11 assemelha-se qualitativamente ao da Figura 5.10, tornando-se mais vantajoso por conter uma quantidade diretamente pertinente nas previsões teóricas de circularização da órbita, a fração do raio, enquanto o período em si é menos importante [42]. Portanto, pode-se analisar o efeito de circularização da órbita do sistema binário em função de um valor crítico para o raio relativo da componente primária, a partir do qual as órbitas são semicirculares e circulares.

O raio relativo crítico da amostra foi estimado para o valor de 0,164. Ou seja, a partir do raio relativo de 0,164 as órbitas são consideradas semicirculares ou circulares. A referência adotada para a estimativa do raio relativo crítico está em $e < 0,05$ [42]. Observa-se que para frações de raios pequenos são permitidos todos os valores de excentricidade, enquanto que para frações de raios grande, somente são permitidos valores pequenos de $|e \cos \omega|$ [42].

A Tabela 5.3 sintetiza a análise de correlação entre os principais parâmetros de interesse. O coeficiente de Spearman é representado por r_s .

Parâmetros	r_s	valor - p
$r_a + r_b$ contra P	-0,9080	$< 2,2 \times 10^{-16}$
r_a contra $ e \cos \omega $	-0,7277	$5,827 \times 10^{-14}$
P contra e	0,7566	$< 2,2 \times 10^{-16}$

Tabela 5.3: O coeficiente r_s de Spearman para diferentes combinações de parâmetros. Valores positivos quantificam a correlação direta, enquanto que valores negativos quantificam a anticorrelação. Na terceira coluna o *valor - p* relativo a um intervalo de confiança de 95%.

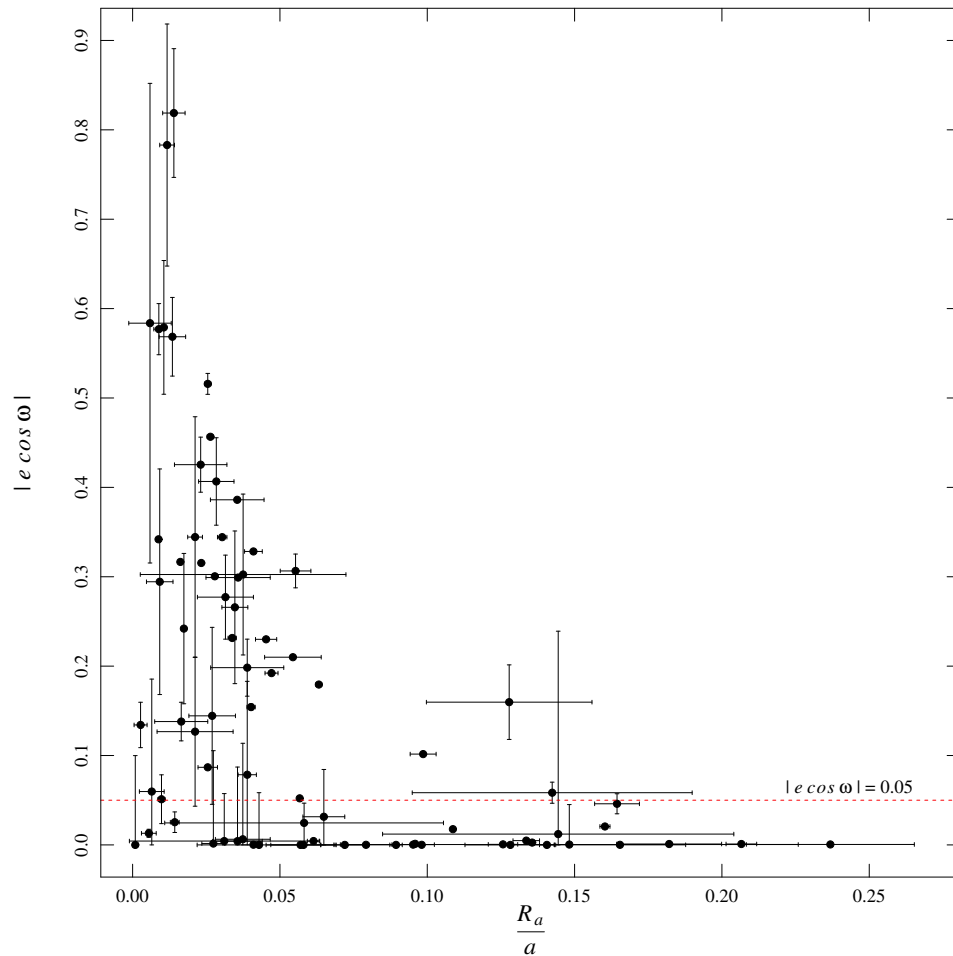


Figura 5.11: Distribuição do módulo de $e \cos \omega$ e fração do raio da componente primária do sistema binário. A reta tracejada na cor vermelha delimita as órbitas semicirculares ($e < 0,05$) das órbitas excêntricas. A extremidade inferior das barras de erro foi truncada, para $|e \cos \omega|$.

5.3 Caracterização estatística da amostra

Dispondo das curvas de luz obtidas pelo Satélite Kepler, as características gerais da amostra selecionada são traçadas de acordo com as possibilidades que o código JKTEBOP proporciona. Os parâmetros dos 78 sistemas investigados estão descritos em gráficos de densidade Kernel e diagramas de caixa, facilitando a caracterização estatística das distribuições dos parâmetros $r_a + r_b$, k , i , J , $\frac{L_a}{L_b}$, e e ω . A análise dos parâmetros P e m_k é realizada com 83 sistemas.

A soma da fração dos raios, definida por $\frac{R_a+R_b}{a}$, é um parâmetro que permite inferir o tamanho da órbita relativa do sistema binário. A Figura 5.12 apresenta a distribuição da soma da fração dos raios, cuja mediana é 0,06. O primeiro e o terceiro quartil assumem os valores de 0,04 e 0,15, respectivamente. Com um enviesamento claro dos 50% maiores valores, pode-se concluir que a amostra representa bem os sistemas binários eclipsantes destacados, pois ocorre uma maior concentração de dados com baixos valores de $\frac{R_a+R_b}{a}$. Os menores valores para esse parâmetro são um indicativo de uma grande separação orbital.

Os sistemas que apresentam $r_a + r_b > 0,30$ são sistemas atípicos, como mostrado na Figura 5.12. Para esse parâmetro existe um sistema atípico que está associado a período curto (1.6706 dias).

Na Figura 5.13 observa-se que os valores mais prováveis de k estão entre 0,29 e 0,90. Para um valor de $k > 0,90$ temos uma concentração cada vez escassa de sistemas, até o limite de 1,79, a partir do qual os valores de razão dos raios são atípicos.

A inclinação orbital assume valores simétricos em torno de 90° . Os ângulos de 89° e 91° , por exemplo, não são distinguidos [5]. A Figura 5.14 evidencia que a grande ocorrência de binários eclipsantes acontece próximo a uma inclinação orbital de 90° . O diagrama de caixa para esse parâmetro traz como mediana a inclinação orbital de 88° . A amostra apresenta os valores 50% mais prováveis no intervalo de $85,58^\circ$ e $89,41^\circ$, com uma densidade maior de sistema com inclinação orbital acima de 88° .

A razão de brilho central de superfície, J , Figura 5.15, assume que os valores mais prováveis para a amostra estão entre 0,14 e 0,91, com mediana em 0,55. Esses intervalo

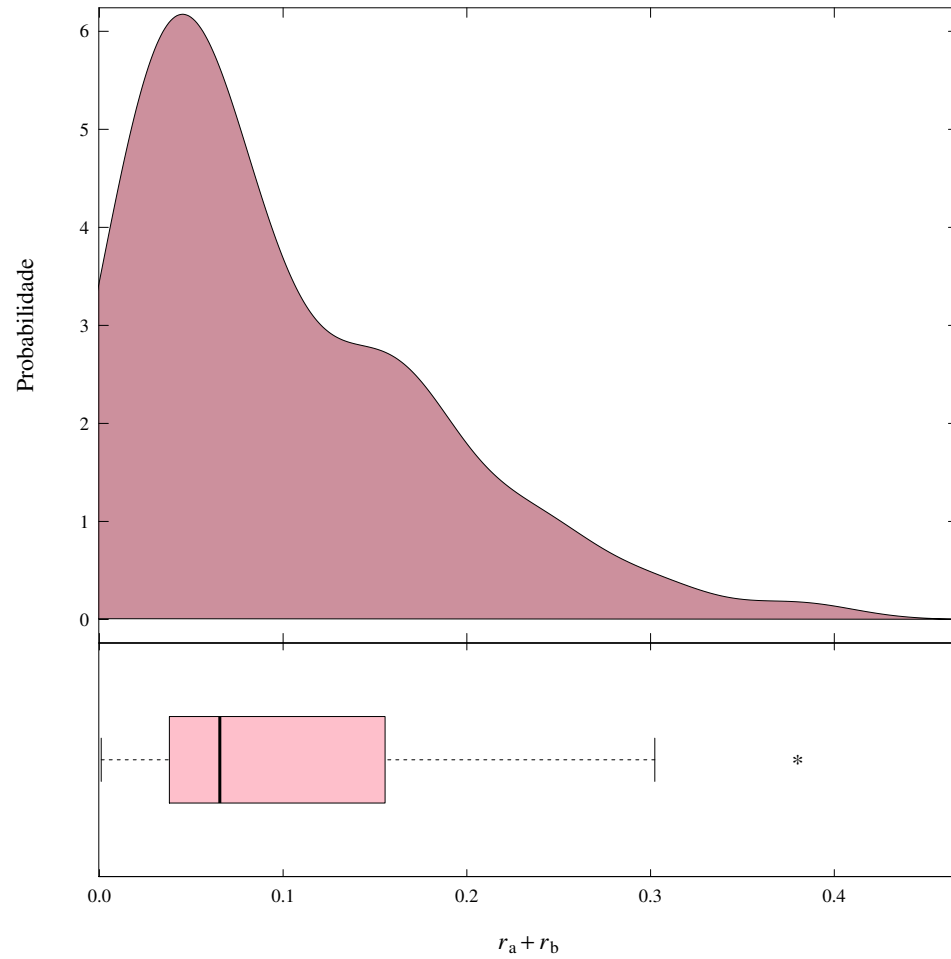


Figura 5.12: A soma da fração dos raios é definida por $r_a + r_b = \frac{R_a + R_b}{a}$, onde a é o semieixo maior da órbita.

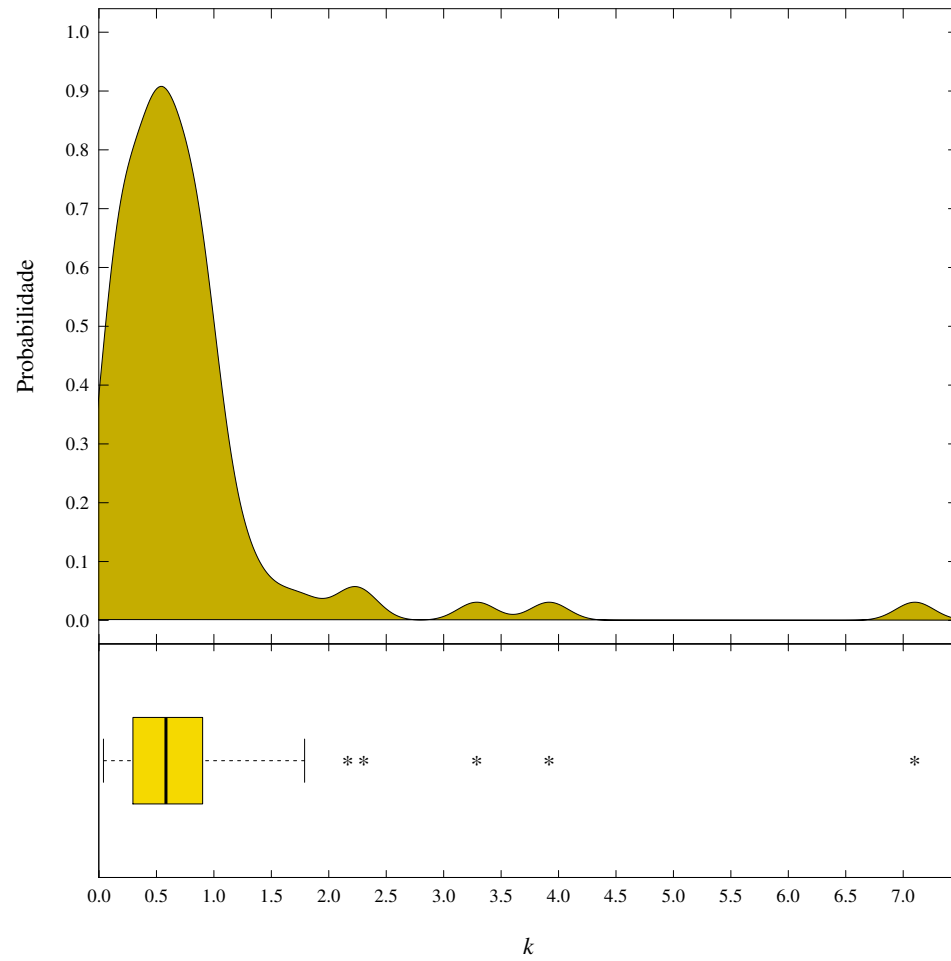


Figura 5.13: A razão dos raios k é definida por $k = \frac{R_b}{R_a}$, isto é, o raio da componente secundária dividido pelo raio da componente primária.

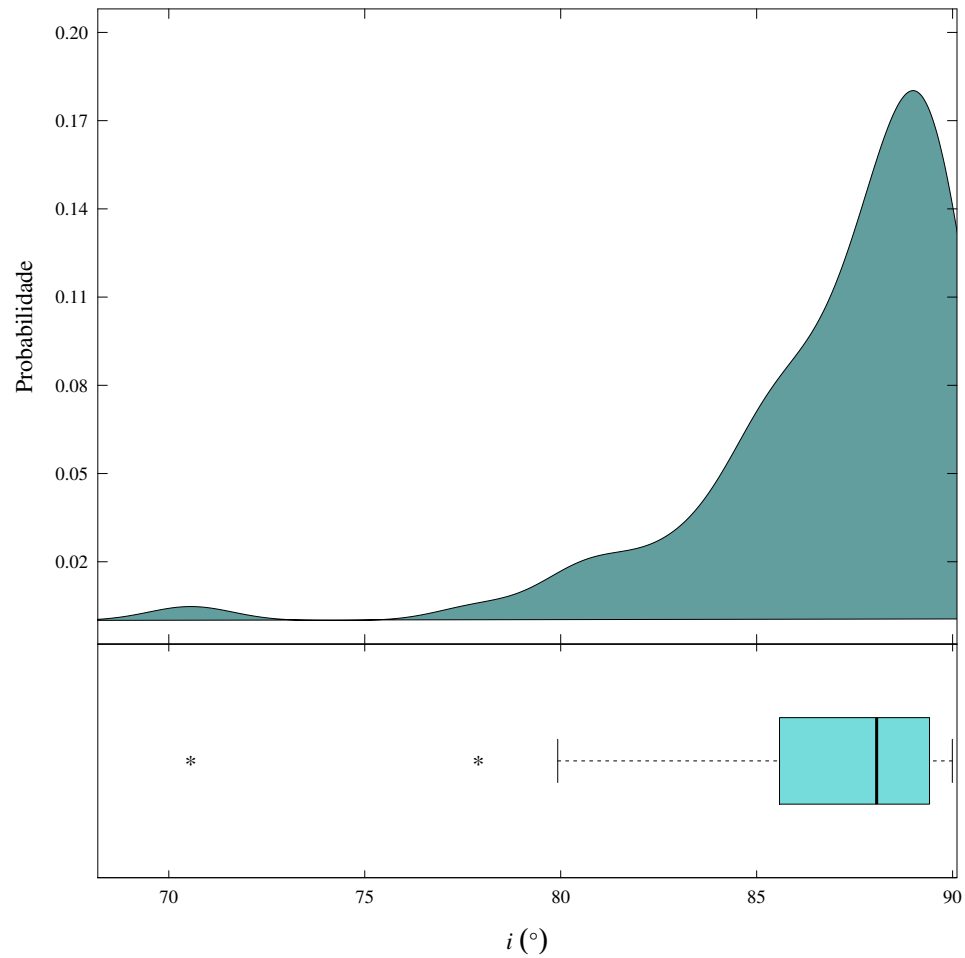


Figura 5.14: A inclinação orbital dos 78 sistemas que compõem a amostra de binários eclipsantes destacados. Há uma grande ocorrência de binários eclipsantes com inclinação orbital entre 85° e 90° . Esse comportamento é esperado pois o eclipse torna-se mais provável quando o sistema binário apresenta inclinação orbital próxima a 90° , independentemente de outros parâmetros.

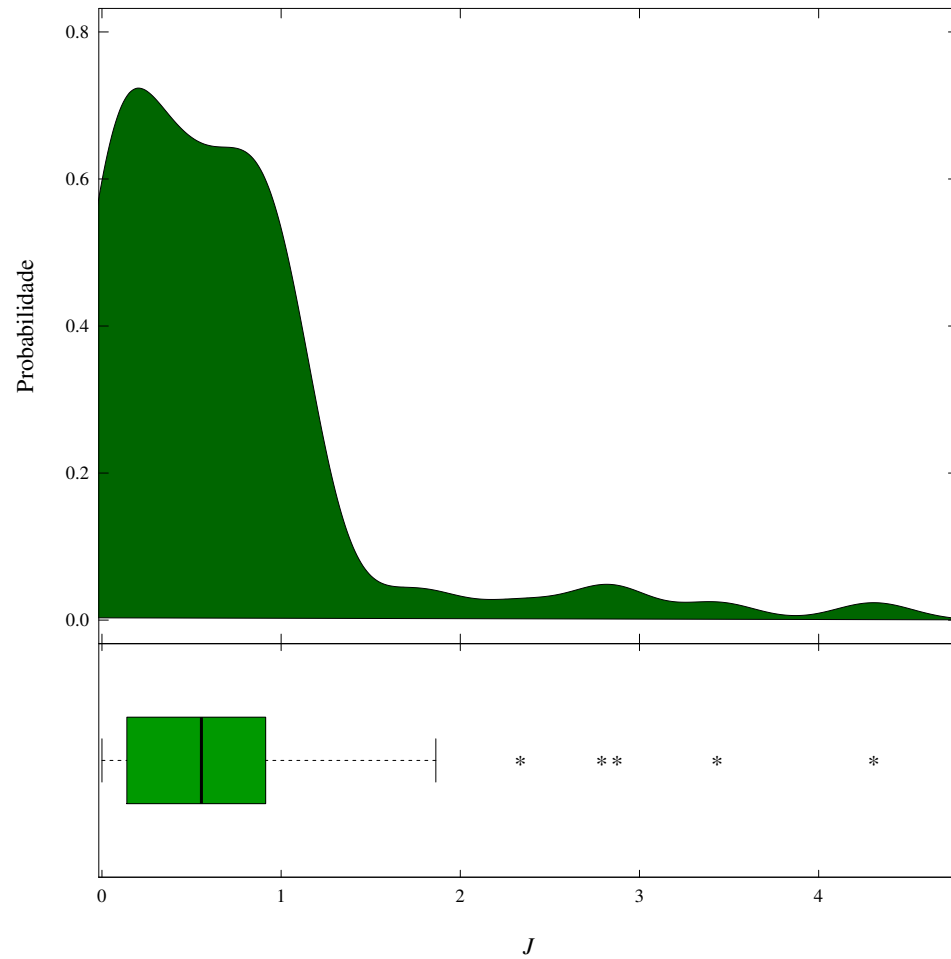


Figura 5.15: A razão de brilho central superficial é definida por $J = \frac{J_b}{J_a}$, ou seja, o brilho central de superfície da componente secundária pelo brilho central de superfície da componente primária.

de valores prováveis menores que 1 evidenciam que as componentes primárias são mais brilhantes no centro de sua superfície. Sistemas atípicos são aqueles que apresentam valores $J > 1,86$.

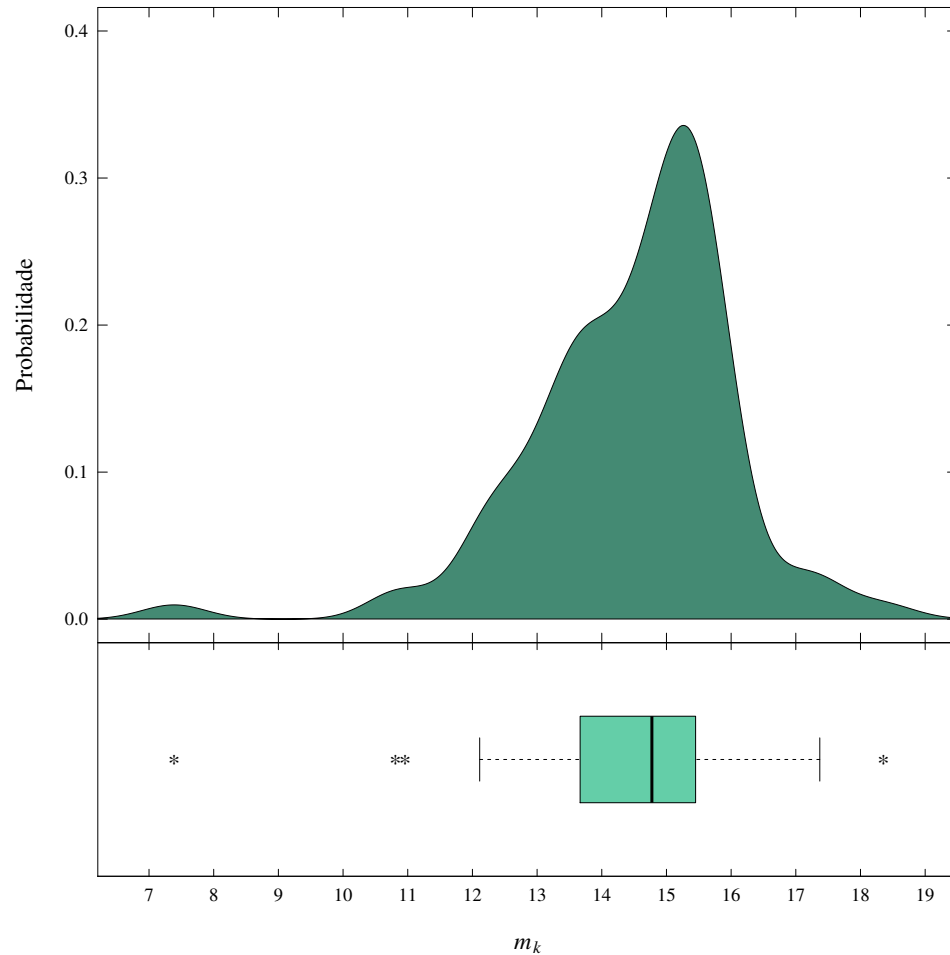


Figura 5.16: Gráficos com o perfil de magnitude da amostra. No diagrama, a mediana assume o valor de 14,8. Os valores mais prováveis de magnitude estão entre 13,67 e 15,51.

A Figura 5.16 trata do parâmetro magnitude Kepler. A magnitude é um parâmetro adimensional que assume o valor de 14,8 para a mediana dos 83 sistemas. O primeiro e o terceiro quartil estão delimitados pelos valores de 13,67 e 15,51, respectivamente. São observados 4 sistemas atípicos.

Os sistemas selecionados apresentam grande dispersão de períodos orbitais, com valores variando de 0,87 até 502,1 dias. O diagrama de caixa da Figura 5.17 tem mediana com valor de 12,85 dias situada dentro do intervalo de valores mais prováveis de 4,8 e 43,91 dias. Os valores mais prováveis da amostra são típicos de sistemas binários eclipsantes destacados,

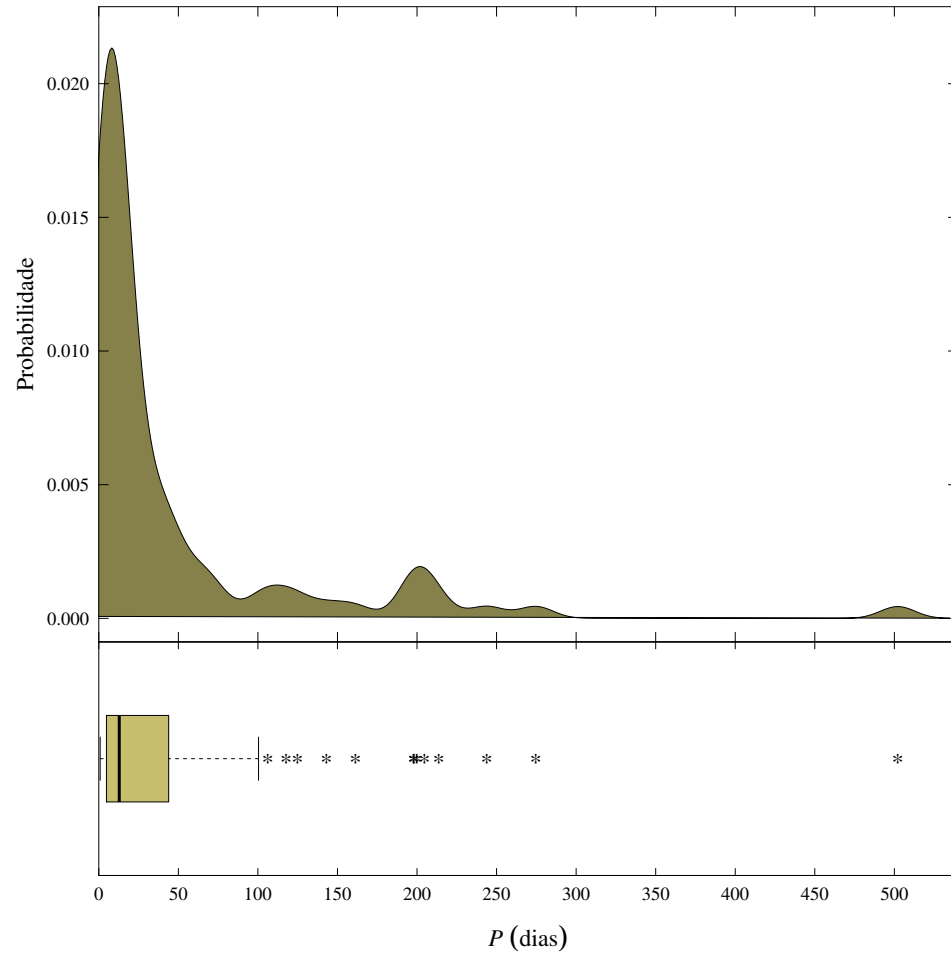


Figura 5.17: Período orbital da amostra de 83 sistemas. O período é um parâmetro de extrema importância pois apresenta covariância com parâmetros orbitais.

bem como os sistemas atípicos com período maior que 100,4 dias.

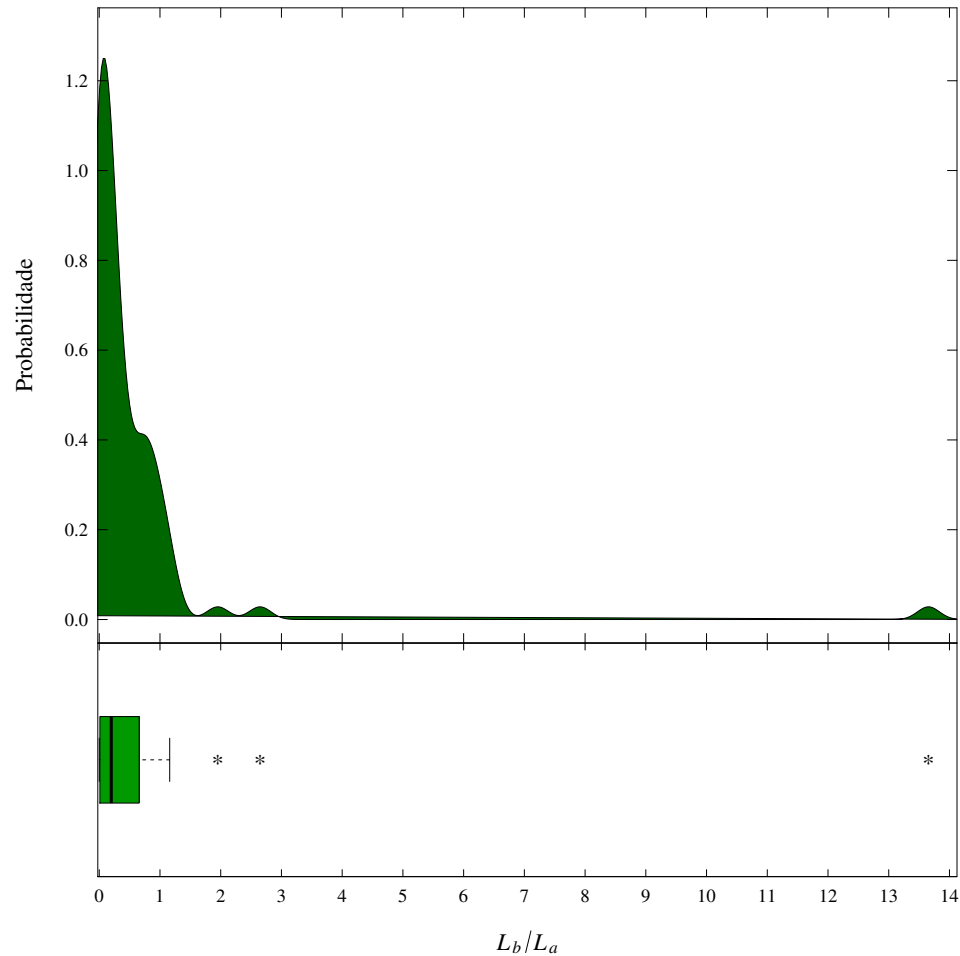


Figura 5.18: A razão de luminosidade é definida por $\frac{L_b}{L_a}$, isto é, a luminosidade da componente secundária pela luminosidade da componente primária. Além de evidenciar que as componentes primárias são mais luminosas que as componentes secundárias, é um parâmetro que se correlaciona muito fortemente com a razão dos raios.

A Figura 5.18 apresenta a densidade Kernel e o diagrama de caixa para o parâmetro razão de luminosidade. O primeiro quartil tem valor dado 0,01, enquanto o terceiro quartil por 0,65. A mediana da distribuição de razão de luminosidade está em 0,19. Ocorre dispersão dos valores para esse parâmetro para medidas acima da mediana.

O diagrama de caixa da Figura 5.19 tem como segundo quartil a excentricidade de 0,23. Os valores 50% mais prováveis estão entre 0,04 e 0,48, sem apresentar sistemas atípicos além do limite de 0,82. A ausência da valores atípicos se dá pela ocorrência de órbitas circulares, semicirculares e excêntricas em sistemas binários eclipsantes destacados.

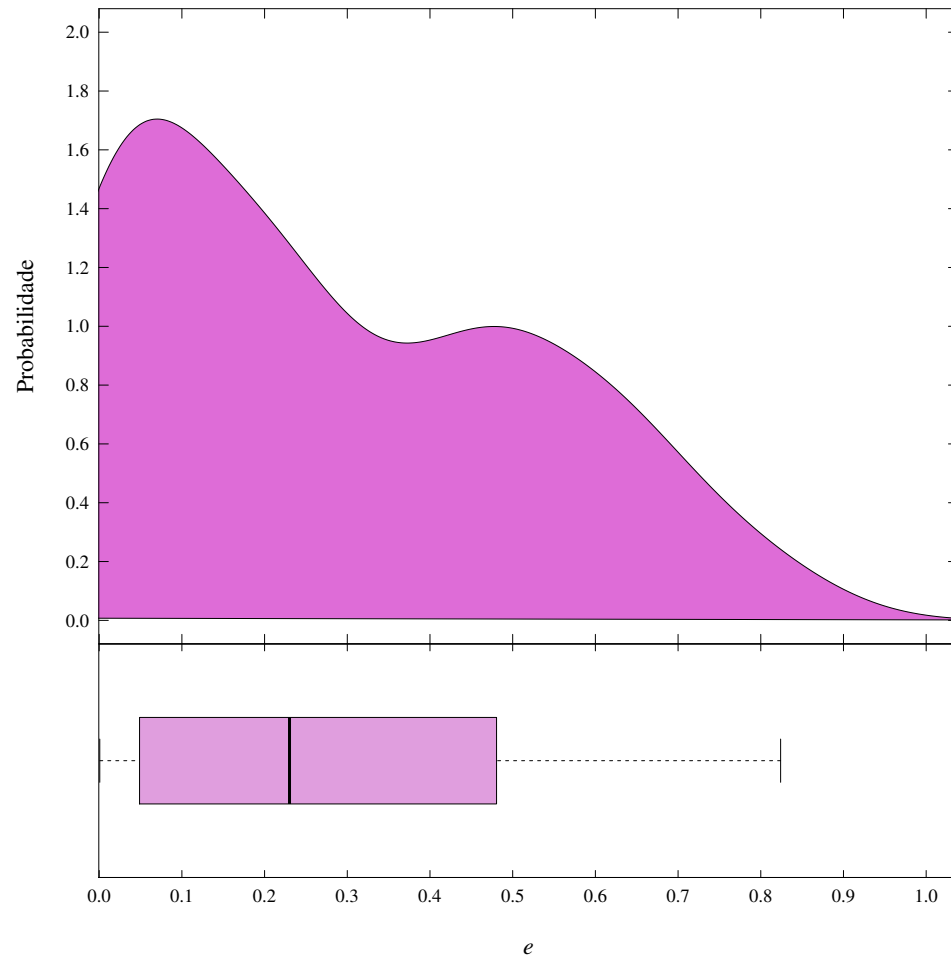


Figura 5.19: Excentricidade da amostra de 78 sistemas assume valores prováveis entre 0,05 e 0,48. A mediana apresenta valor de 0,23.

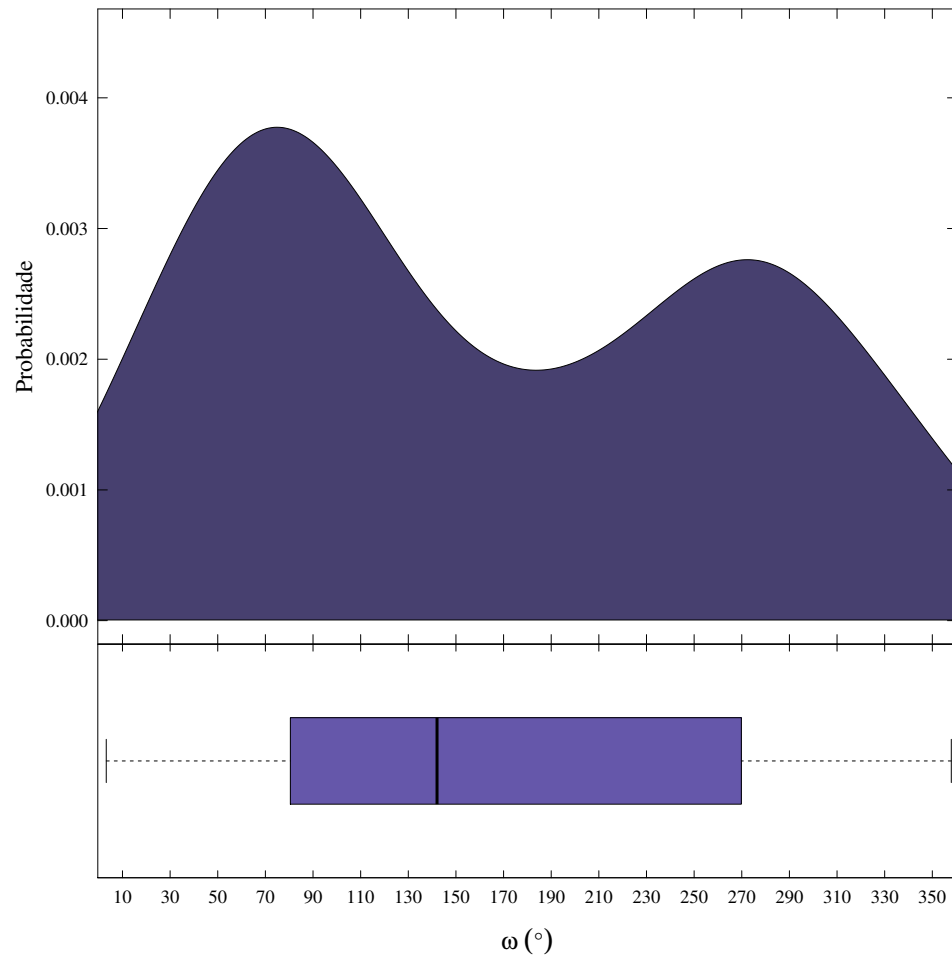


Figura 5.20: A longitude do periastro apresenta bimodalidade e mediana em $142,0661^{\circ}$.

Ilustrado anteriormente na Figura 2.15, a longitude do periastro fornece a orientação da órbita do sistema binário no espaço. A Figura 5.20 mostra que a amplitude interquartílica está entre $80,48^\circ$ e $269,82^\circ$. A mediana da longitude do periastro para a amostra é de $142,06^\circ$, sem sistemas atípicos.

A síntese de todos os diagramas de caixa é dada pela Tabela 5.4. São apresentados os limites do primeiro e terceiro quartil, representando o intervalo dos 50% valores mais prováveis de cada parâmetro na amostra trabalhada.

Parâmetro	25%	Mediana	75%
$r_a + r_b$	0,0381	0,0655	0,1555
k	0,2950	0,5826	0,9019
i	85,5833	88,0619	89,4110
J	1,389	0,5551	0,9138
m_k	13,6651	14,7748	15,4508
P	4,8081	12,8516	43,9163
L_b/L_a	0,0100	0,1980	0,6571
e	0,0488	0,2301	0,4805
ω	80,4810	142,0661	269,8293

Tabela 5.4: O resumo dos diagramas de caixa para os parâmetros. A segunda coluna refere-se ao primeiro quartil, a terceira coluna refere-se a mediana da amostra, enquanto que a quarta coluna refere-se ao terceiro quartil. Para ω e i os valores são dados em graus, os demais parâmetros são adimensionais.

Capítulo 6

Conclusão e Perspectivas

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram analisadas 100 curvas de luz de sistemas binários eclipsantes destacados identificados no âmbito da Missão Kepler, com parâmetros disponibilizados no Catálogo de Sistemas Binários Eclipsantes da Missão Kepler, versões II e III. Entre o total de sistemas selecionados, 17 foram excluídos definitivamente enquanto outros 5 foram excluídos parcialmente da amostra. Desta forma, foram calculadas soluções fotométricas para 78 sistemas que incluem os parâmetros: períodos orbital; razão de brilho central de superfície; razão dos raios; fração dos raios (individuais e somados); inclinação orbital; excentricidade orbital; longitude do periastro; componente tangencial da excentricidade; componente radial da excentricidade; primeira efeméride; magnitude do sistema; e razão de luminosidade. As soluções obtidas pelo método tradicional foram comparadas com as obtidas pelo método de redes neurais, usado na elaboração dos catálogos. Os resultados mostram boa concordância entre os parâmetros período, magnitude Kepler, $e \cos \omega$ e soma da fração dos raios, que apresentaram um baixo desvio quadrático médio entre os resultados obtidos utilizando os dois métodos. Entretanto, ocorre discrepância notável entre os demais parâmetros testados. Analisando o desvio percentual absoluto médio, não houve boa equivalência entre os parâmetros $e \cos \omega$ e $e \sin \omega$. A discrepância entre os resultados pode estar associada à natureza do pré processamento realizado nas curvas de luz usadas em ambos os métodos, bem como limitações ainda a serem investigadas no métodos de redes neurais.

As correlações entre parâmetros analisados neste trabalho são de natureza forte ou muito forte, descartando as correlações de natureza não física que envolvem a inclinação orbital

dos sistemas. Foi realizada uma análise do comportamento da excentricidade em função do período orbital no contexto da teoria de maré, de Zahn (1977), com boa representação dos resultados no comportamento acerca desta. Com base no parâmetro $|e \cos \omega|$ e no raio relativo da componente primária, foi estimado o raio relativo crítico de $\sim 0,16$ para a amostra de sistemas do campo de visão do Satélite Kepler. Tal consistência se deve, principalmente, pela presença de órbitas circulares a partir de valores críticos associados a proximidade das estrelas componentes do sistema, evidenciando efeitos de maré gravitacional mais atuantes.

A anticorrelação entre período e soma da fração dos raios, divulgada por Coughlin (2011) em um trabalho semelhante, foi exposta de maneira alternativa através de um ajuste linear entre os dois parâmetros.

O perfil das distribuições de parâmetros para as estrelas selecionadas para o trabalho é típico de sistemas binários eclipsantes destacados e bem destacados. No geral, as componentes primárias dos sistemas são maiores e mais luminosas que as componentes secundárias, apresentando grande separação orbital que se reflete na dimensão do parâmetro soma da fração dos raios.

6.2 Perspectivas

Como perspectiva imediata, será verificada a existência de erros no método utilizado para então corrigi-lo, tornando possível a continuidade do projeto que visa desenvolver e implementar ferramentas computacionais para obtenção automática de parâmetros orbitais de curvas de luz até o ano de 2024. Além disso, é necessário o emprego de um método que vise reduzir os efeitos adversos que levaram ao não ajuste de parte das curvas de luz da amostra. Tal medida também será importante no tratamento de curvas de luz onde a variação de fluxo luminoso é pequena ou em curvas de luz cuja ocorrência de variações aperiódicas de fluxo, fora dos eclipses, comprometem a estabilidade do código usado para ajuste. As correlações apresentadas aqui poderão ser melhor exploradas para obtenção de parâmetros de entrada mais precisos, em códigos computacionais. Por fim, temos a perspectiva de um estudo comparativo com amostras completas de sistemas binários com estrelas do campo para testar a consistência da amostra analisada e abrangência dos resultados, em particular da caracterização estatística das distribuições dos parâmetros disponíveis.

Apêndice A

Tabelas com os principais parâmetros obtidos nesta Dissertação

As tabelas a seguir apresentam os principais parâmetros obtidos neste trabalho, para os 83 sistemas ajustados pelo código JKTEBOP. A ordem de colunas é: KIC, o número de identificação do catálogo de sistemas binários da Missão Kepler; P , o período orbital dado em dias; T_0 , a data do primeiro eclipse primário dado em dias; m_k , a magnitude Kepler; e , a excentricidade orbital; ω , a longitude do periastro dada em graus; i , a inclinação orbital; r_a+r_b , a soma da fração dos raios; k , razão dos raios; J , a razão de brilho central de superfície; $\frac{L_b}{L_a}$, a razão de luminosidade; e σ , o desvio quadrático médio referente ao melhor ajuste, dado em milimagnitude.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
2440757	1,4337 $\pm 0,0003$	822,76889 $\pm 0,00993$	15,1219 $\pm 0,0001$	0,03 $\pm 0,15$	185 ± 154	66,29 $\pm 5,76$	0,4321 $\pm 0,0699$	0,09 $\pm 0,27$	0,02 $\pm 23,69$	0,0001 $\pm 0,9573$	0,469
2719873	17,27921 $\pm 0,00018$	912,84236 $\pm 0,00046$	15,1607 $\pm 0,0012$	0,09 $\pm 0,07$	269 ± 124	89,24 $\pm 0,26$	0,0381 $\pm 0,0054$	0,39 ± 0	0,07 $\pm 0,03$	0,01 $\pm 0,004$	1,386
2852560	11,96123 $\pm 0,00017$	375,8898 $\pm 0,00069$	15,3049 $\pm 0,0004$	0,437 $\pm 0,003$	41 ± 1	88,08 $\pm 0,04$	0,0787 $\pm 0,0005$	0,92 $\pm 0,15$	1,08 $\pm 0,03$	0,904 $\pm 0,315$	4,214
3102024	13,78308 $\pm 0,00146$	814,82528 $\pm 0,00841$	12,8112 $\pm 0,0189$	0,28 $\pm 0,14$	300 ± 9	88,8 $\pm 0,81$	0,0561 $\pm 0,0178$	0,78 $\pm 1,99$	0,4 $\pm 0,23$	0,227 $\pm 0,399$	6,667
3248019	2,66818 $\pm 0,00005$	260,43997 $\pm 0,00026$	15,3852 $\pm 0,0007$	0,11 $\pm 0,08$	270 ± 90	80,98 $\pm 0,83$	0,221 $\pm 0,0096$	0,72 $\pm 0,27$	0,4 $\pm 0,4$	0,212 $\pm 0,403$	1,755
3342592	17,1776 $\pm 0,00024$	287,0723 $\pm 0,00164$	14,9232 $\pm 0,0001$	0,46 $\pm 0,22$	229 ± 54	89,8 $\pm 3,13$	0,0428 $\pm 0,0399$	0,141 $\pm 0,002$	0 <i>(fixo)</i>	0 <i>(fixo)</i>	0,533
3442054	117,68135 $\pm 0,0005$	382,56924 $\pm 0,00077$	12,1125 $\pm 0,0001$	0,55 $\pm 0,01$	129 ± 16	88,98 $\pm 0,49$	0,0255 $\pm 0,0025$	0,2 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 7,72$	0,004 $\pm 0,203$	0,389
3542573	6,9428 $\pm 0,00004$	814,14481 $\pm 0,00039$	12,1616 $\pm 0,0002$	0,01 $\pm 0,01$	271 ± 97	84,78 $\pm 0,14$	0,1321 $\pm 0,0017$	0,83 $\pm 0,25$	0,91 $\pm 0,16$	0,634 $\pm 0,558$	2,351
3865298	9,53048 $\pm 0,00007$	452,73621 $\pm 0,00034$	14,6906 $\pm 0,0007$	0,2305 $\pm 0,0004$	356 ± 2	88,2 $\pm 0,04$	0,0896 $\pm 0,0004$	0,98 $\pm 0,16$	0,99 $\pm 0,01$	0,939 $\pm 0,316$	4,732
3973504	4,31871 $\pm 0,00016$	809,64603 $\pm 0,001$	15,6962 $\pm 0,0006$	0,06 $\pm 0,05$	270 ± 1	84,93 $\pm 1,56$	0,1222 $\pm 0,0224$	0,54 $\pm 0,54$	0,14 $\pm 0,06$	0,038 $\pm 0,103$	4,627
4054905	274,73782 $\pm 0,0063$	586,66169 $\pm 0,00631$	12,98301 $\pm 0,00006$	0,41 $\pm 0,02$	223 ± 4	89,99 $\pm 0,36$	0,05 $\pm 0,001$	0,4 $\pm 1,15$	1,03 $\pm 0,14$	0,157 $\pm 2,561$	1,762

Tabela A.1: Resultados da modelagem: melhor ajuste para 2σ de incerteza.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
4069213	5, 19426 $\pm 0, 00003$	809, 82557 $\pm 0, 00033$	12, 73474 $\pm 0, 00007$	0, 023 $\pm 0, 004$	207 ± 19	86, 33 $\pm 0, 17$	0, 1911 $\pm 0, 002$	0, 1916 $\pm 0, 0003$	0, 202 $\pm 0, 002$	0, 00713 $\pm 0, 00008$	0, 746
4076952	9, 76113 $\pm 0, 00016$	856, 03038 $\pm 0, 00064$	13, 7729 $\pm 0, 0003$	0, 028 $\pm 0, 001$	52 ± 2	88, 75 $\pm 0, 09$	0, 1602 $\pm 0, 0005$	0, 4726 $\pm 0, 0008$	1, 044 $\pm 0, 004$	0, 233 $\pm 0, 001$	2, 602
4659255	198, 01551 $\pm 0, 00357$	234, 15008 $\pm 0, 00354$	15, 5474 $\pm 0, 0003$	0, 32 $\pm 0, 23$	101 ± 12	89, 61 $\pm 1, 38$	0, 01 $\pm 0, 0058$	0, 56 $\pm 0, 54$	2, 34 $\pm 3, 44$	0, 748 $\pm 2, 698$	0, 948
4851464	5, 54825 $\pm 0, 00002$	810, 10652 $\pm 0, 00033$	15, 75 $\pm 0, 0001$	0, 03 $\pm 0, 03$	82 ± 11	86, 69 $\pm 0, 15$	0, 1598 $\pm 0, 0054$	0, 1954 $\pm 0, 0006$	0, 099 $\pm 0, 004$	0, 0036 $\pm 0, 0001$	1, 238
5024450	3, 0518 $\pm 0, 00021$	633, 19763 $\pm 0, 00115$	15, 06 $\pm 0, 0004$	0, 003 $\pm 0, 015$	272 ± 125	77, 9 $\pm 1, 51$	0, 2486 $\pm 0, 0213$	0, 5 $\pm 0, 35$	0, 79 $\pm 0, 28$	0, 199 $\pm 0, 512$	1, 365
5091614	21, 14258 $\pm 0, 00019$	814, 95081 $\pm 0, 00055$	14, 0838 $\pm 0, 0007$	0, 15 $\pm 0, 1$	12 ± 149	87, 56 $\pm 0, 28$	0, 0524 $\pm 0, 0029$	0, 94 $\pm 0, 52$	0, 57 $\pm 0, 33$	0, 481 $\pm 0, 441$	0, 642
5115178	12, 85163 $\pm 0, 00006$	813, 97788 $\pm 0, 00044$	15, 20499 $\pm 0, 00005$	0, 2101 $\pm 0, 0001$	178 ± 1	84, 88 $\pm 0, 16$	0, 1036 $\pm 0, 002$	0, 9 $\pm 0, 4$	0, 87 $\pm 0, 06$	0, 705 $\pm 0, 694$	0, 537
5217733	161, 2511 $\pm 0, 01705$	834, 11399 $\pm 0, 01263$	7, 3883 $\pm 0, 0095$	0, 62 $\pm 0, 02$	147 ± 5	89, 99 $\pm 0, 05$	0, 0331 $\pm 0, 0009$	0, 3 $\pm 0, 03$	0, 51 $\pm 0, 16$	0, 045 $\pm 0, 008$	2, 971
5284133	8, 78458 $\pm 0, 00004$	811, 08815 $\pm 0, 00046$	12, 4442 $\pm 0, 0001$	0, 27 $\pm 0, 02$	49 ± 7	86, 1 $\pm 0, 81$	0, 1129 $\pm 0, 0074$	0, 78 $\pm 0, 13$	0, 46 $\pm 0, 11$	0, 276 $\pm 0, 106$	2, 1
5392897	42, 39951 $\pm 0, 00319$	202, 44712 $\pm 0, 00159$	15, 7518 $\pm 0, 0076$	0, 59 $\pm 0, 1$	226 ± 11	89, 61 $\pm 0, 2$	0, 0412 $\pm 0, 0073$	0, 45 $\pm 0, 03$	0, 73 $\pm 0, 37$	0, 142 $\pm 0, 073$	1, 095
5534965	243, 82118 $\pm 0, 00039$	403, 31719 $\pm 0, 00041$	13, 29766 $\pm 0, 00002$	0, 739 $\pm 0, 003$	88 ± 1	87, 23 $\pm 0, 83$	0, 0197 $\pm 0, 0022$	0, 38 $\pm 0, 06$	4, 31 ± 5	0, 602 $\pm 0, 776$	0, 225

Tabela A.2: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
5786154	197,91894 $\pm 0,00121$	121,28034 $\pm 0,00179$	13,5341 (<i>fixo</i>)	0,3771 $\pm 0,0007$	204,9 $\pm 0,2$	88,68 $\pm 0,03$	0,0718 $\pm 0,0001$	7,1 $\pm 0,02$	0,279 $\pm 0,001$	13,655 $\pm 0,013$	1,084
5866104	36,97692 $\pm 0,00077$	21,07693 $\pm 0,00072$	17,0689 $\pm 0,0005$	0,66 $\pm 0,01$	63 ± 1	88,45 $\pm 0,03$	0,0435 $\pm 0,0007$	0,56 $\pm 0,02$	2,79 $\pm 0,15$	0,835 $\pm 0,092$	2,983
6307062	75,37915 $\pm 0,00138$	920,89615 $\pm 0,00087$	14,8699 $\pm 0,0025$	0,58 $\pm 0,05$	3 ± 179	89,65 $\pm 0,18$	0,0173 $\pm 0,0032$	0,93 $\pm 0,17$	0,35 $\pm 0,19$	0,284 $\pm 0,176$	2,958
6545018	3,99177 $\pm 0,00003$	811,38068 $\pm 0,00046$	13,7414 $\pm 0,0001$	0,003 $\pm 0,001$	10 ± 178	87,18 $\pm 0,07$	0,2141 $\pm 0,0009$	0,579 $\pm 0,001$	0,881 $\pm 0,003$	0,291 $\pm 0,001$	3,225
6889235	5,18821 $\pm 0,00076$	766,68372 $\pm 0,00286$	10,95951 $\pm 0,00007$	0,01 $\pm 0,07$	99 ± 75	76,4 $\pm 2,38$	0,2693 $\pm 0,0354$	0,0367 $\pm 0,0009$	0,75 $\pm 0,15$	0,0010 $\pm 0,0001$	0,110
7033748	4,392703 $\pm 0,000007$	812,18856 $\pm 0,00008$	13,6722 $\pm 0,0001$	0,003 $\pm 0,001$	91 ± 1	83,4 $\pm 0,03$	0,3022 $\pm 0,0001$	1,15 $\pm 0,04$	0,8543 $\pm 0,0009$	1,123 $\pm 0,072$	1,785
7128918	7,11863 $\pm 0,00027$	813,44364 $\pm 0,00061$	15,7569 $\pm 0,0003$	0,16 $\pm 0,04$	88,4 $\pm 0,4$	85,58 $\pm 0,05$	0,1109 $\pm 0,0014$	0,81 $\pm 0,05$	1,86 $\pm 0,41$	1,16 $\pm 0,204$	2,062
7200102	14,66626 $\pm 0,00038$	447,55457 $\pm 0,00045$	15,2004 $\pm 0,0013$	0,47 $\pm 0,02$	120 ± 2	88,53 $\pm 0,16$	0,0564 $\pm 0,0018$	0,67 $\pm 0,1$	0,73 $\pm 0,16$	0,329 $\pm 0,196$	8,887
7357531	502,11462 $\pm 0,0142$	230,03326 $\pm 0,02145$	14,69509 $\pm 0,00005$	0,62 $\pm 0,28$	90 ± 13	89,97 (<i>fixo</i>)	0,001 $\pm 0,001$	0,08 $\pm 0,01$	1 $\pm 2,71$	0,007 $\pm 0,015$	0,342
7877824	9,44972 $\pm 0,00068$	816,38521 $\pm 0,00055$	15,6574 $\pm 0,001$	0,197 $\pm 0,002$	11 ± 4	89,37 $\pm 0,19$	0,0979 $\pm 0,0008$	1,08 $\pm 0,1$	0,77 $\pm 0,02$	0,89 $\pm 0,137$	5,659
7975727	22,41907 $\pm 0,00059$	912,60213 $\pm 0,00084$	14,47916 $\pm 0,00005$	0,34 $\pm 0,08$	321 ± 22	88,56 $\pm 0,33$	0,0386 $\pm 0,005$	0,11 $\pm 0,01$	0,02 $\pm 0,03$	0,0003 $\pm 0,0003$	0,264

Tabela A.3: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
8044608	106,17584 $\pm 0,00026$	871,69757 $\pm 0,00046$	13,744 $\pm 0,0004$	0,6 $\pm 0,07$	344 ± 3	89,44 $\pm 0,09$	0,0152 $\pm 0,0009$	0,43 $\pm 0,01$	0,14 $\pm 0,08$	0,024 $\pm 0,014$	0,982
8104030	46,83517 $\pm 0,02677$	522,50388 $\pm 0,01487$	15,3129 $\pm 0,0001$	0,45 $\pm 0,06$	49 ± 16	89,73 $\pm 0,38$	0,0098 $\pm 0,005$	0,07 $\pm 0,01$	0,46 $\pm 26,1$	0,002 $\pm 0,812$	0,495
8145789	1,67061 $\pm 0,00005$	816,91507 $\pm 0,0006$	15,3125 $\pm 0,0001$	0,001 $\pm 0,003$	55 ± 166	70,56 $\pm 0,82$	0,3801 $\pm 0,0112$	0,61 $\pm 0,28$	0,74 $\pm 0,14$	0,272 $\pm 0,386$	0,777
8155584	26,01675 $\pm 0,00537$	510,25113 $\pm 0,19171$	15,0321 $\pm 0,0007$	0,67 $\pm 0,04$	328 ± 9	85,69 $\pm 1,36$	0,0667 $\pm 0,0172$	3,92 $\pm 4,57$	0,002 $\pm 0,002$	0,055 $\pm 0,265$	1,367
8242681	4,02063 $\pm 0,00024$	953,84857 $\pm 0,00182$	15,4667 $\pm 0,00029$	0,11 $\pm 0,03$	294 ± 8	82,78 $\pm 0,57$	0,1889 $\pm 0,0092$	0,15 $\pm 0,0004$	0,29 $\pm 0,03$	0,0063 ± 0	1,619
8301013	4,42804 $\pm 0,00001$	815,08916 $\pm 0,0001$	13,298 $\pm 0,0002$	0,002 $\pm 0,001$	301 ± 19	88,28 $\pm 0,06$	0,1734 $\pm 0,0002$	0,81 $\pm 0,01$	0,889 $\pm 0,003$	0,58 $\pm 0,015$	2,276
8312222	12,82341 $\pm 0,00015$	815,81023 $\pm 0,0002$	15,6261 $\pm 0,0002$	0,315 $\pm 0,004$	80,5 $\pm 0,1$	86,98 $\pm 0,02$	0,0846 $\pm 0,0003$	0,49 $\pm 0,02$	3,43 $\pm 0,1$	0,816 $\pm 0,092$	1,19
8314801	37,18326 $\pm 0,00019$	446,42963 $\pm 0,00028$	13,84033 $\pm 0,00006$	0,386 $\pm 0,003$	181 ± 6	89,64 $\pm 0,03$	0,053 $\pm 0,0001$	0,49 $\pm 0,78$	1,14 $\pm 0,14$	0,273 $\pm 1,657$	0,621
8345358	9,38068 $\pm 0,00034$	854,86715 $\pm 0,00135$	15,4349 $\pm 0,0004$	0,02 $\pm 0,13$	90 ± 92	85,58 $\pm 0,78$	0,0973 $\pm 0,0099$	0,68 $\pm 0,46$	0,36 $\pm 0,29$	0,161 $\pm 0,295$	2,571
8458207	3,53011 $\pm 0,00007$	268,9215 $\pm 0,00103$	13,9193 $\pm 0,0051$	0,17 $\pm 0,26$	235 ± 56	87,93 $\pm 3,07$	0,142 $\pm 0,0736$	0,2546 $\pm 0,003$	0,07 $\pm 0,11$	0,004 $\pm 0,006$	2,948
8610483	48,79916 $\pm 0,00039$	306,59697 $\pm 0,00438$	15,0535 $\pm 0,0002$	0,481 $\pm 0,004$	49 ± 1	88,92 $\pm 0,04$	0,0393 $\pm 0,0003$	0,69 $\pm 0,03$	0,86 $\pm 0,03$	0,392 $\pm 0,054$	1,84

Tabela A.4: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
8678664	15,42032 $\pm 0,01506$	287,71467 $\pm 0,02273$	15,5924 $\pm 0,0004$	0,44 $\pm 0,02$	197 ± 8	85,6 $\pm 1,71$	0,0733 $\pm 0,0248$	2,17 $\pm 1,67$	0 (<i>fixo</i>)	0 (<i>fixo</i>)	2,984
8784288	3,65514 $\pm 0,00001$	812,11706 $\pm 0,00019$	13,658 $\pm 0,0003$	0,008 $\pm 0,005$	269 ± 1	88,71 $\pm 0,05$	0,176 $\pm 0,0004$	0,79 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$	0,429 $\pm 0,004$	2,9
8879915	3,44262 $\pm 0,00002$	810,72991 $\pm 0,00043$	15,1811 $\pm 0,0011$	0,02 $\pm 0,02$	270 ± 92	89,1 $\pm 0,41$	0,1617 $\pm 0,0018$	0,81 $\pm 0,03$	0,45 $\pm 0,08$	0,379 $\pm 0,009$	11,998
9028474	124,94256 $\pm 0,00041$	552,49835 $\pm 0,00176$	12,3423 $\pm 0,0019$	0,82 $\pm 0,1$	164 ± 17	88,74 $\pm 0,87$	0,0178 $\pm 0,0034$	0,53 $\pm 0,16$	0,71 $\pm 1,09$	0,197 $\pm 0,459$	1,145
9032900	67,7393 $\pm 0,00316$	759,96544 $\pm 0,00449$	13,675 (<i>fixo</i>)	0,49 $\pm 0,05$	91 ± 9	89,9 $\pm 2,22$	0,0379 $\pm 0,0087$	0,07 $\pm 0,02$	0,01 $\pm 150,58$	0,00003 $\pm 0,85182$	0,306
9110346	1,79053 $\pm 0,00002$	477,20213 $\pm 0,00034$	16,3909 $\pm 0,0018$	0,0007 $\pm 0,0040$	153 ± 85	86,06 $\pm 0,15$	0,2392 $\pm 0,0011$	0,9 $\pm 0,08$	0,85 $\pm 0,01$	0,657 $\pm 0,119$	7,994
9346655	0,871592 $\pm 0,000008$	630,69148 $\pm 0,00061$	14,2873 $\pm 0,0026$	0,1 $\pm 0,03$	270,6 $\pm 0,6$	79,92 $\pm 0,44$	0,3023 $\pm 0,0062$	0,46 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 0,01$	0,037 $\pm 0,003$	9,211
9656397	204,74093 $\pm 0,00364$	921,21622 $\pm 0,00536$	13,8424 $\pm 0,0162$	0,23 $\pm 0,36$	93 ± 88	89,84 $\pm 0,18$	0,0113 $\pm 0,0047$	1,04 $\pm 4,61$	1,09 $\pm 0,56$	1,158 $\pm 1,02$	2,46
9715939	12,89295 $\pm 0,00015$	812,04488 $\pm 0,00233$	12,8929 $\pm 0,0001$	0,24 $\pm 0,13$	216 ± 27	85,56 $\pm 0,76$	0,0899 $\pm 0,0103$	1,31 $\pm 1,43$	0,0005 $\pm 0,0018$	0,001 $\pm 0,003$	0,491
9719636	3,35156 $\pm 0,00029$	193,37811 $\pm 0,00222$	17,2785 $\pm 0,0023$	0,25 $\pm 0,36$	87 ± 6	83,74 $\pm 6,25$	0,1764 $\pm 0,0724$	0,22 $\pm 0,02$	0,08 $\pm 4,54$	0,004 $\pm 0,248$	4,445
9777062	19,23002 $\pm 0,00007$	824,86323 $\pm 0,00022$	12,2421 $\pm 0,0004$	0,24 $\pm 0,06$	50 ± 9	88,05 $\pm 0,43$	0,0644 $\pm 0,006$	0,6 $\pm 0,08$	0,21 $\pm 0,27$	0,075 $\pm 0,163$	1,416

Tabela A.5: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
10026457	9,93418 $\pm 0,00092$	768,68009 $\pm 0,00197$	15,3901 $\pm 0,0001$	0,15 $\pm 0,01$	47 ± 1	83,07 $\pm 0,14$	0,1565 $\pm 0,0031$	0,59 $\pm 0,04$	2,88 $\pm 0,35$	0,983 $\pm 0,207$	1,052
10268903	1,10393 $\pm 0,00004$	42,35632 $\pm 0,00036$	17,3708 $\pm 0,0026$	0,05 $\pm 0,07$	89 ± 2	80,35 $\pm 2,18$	0,2433 $\pm 0,0278$	0,34 $\pm 0,09$	0,54 $\pm 0,35$	0,061 $\pm 0,047$	6,794
10292238	143,11928 $\pm 0,00083$	838,83564 $\pm 0,00094$	15,0058 $\pm 0,0034$	0,61 $\pm 0,04$	342 ± 157	89,5 $\pm 0,58$	0,0166 $\pm 0,0082$	1,79 $\pm 0,67$	0,83 $\pm 0,56$	2,648 $\pm 1,391$	2,297
10352603	32,77898 $\pm 0,00023$	913,89126 $\pm 0,00038$	14,5196 $\pm 0,0001$	0,4767 $\pm 0,004$	137 ± 1	89,59 $\pm 0,04$	0,0629 $\pm 0,0001$	1,07 $\pm 0,1$	0,97 $\pm 0,01$	1,108 $\pm 0,187$	0,969
10352938	6,47403 $\pm 0,00135$	938,84458 $\pm 0,00465$	14,3432 $\pm 0,0002$	0,072 $\pm 0,01$	37 ± 8	87,97 $\pm 5,79$	0,1527 $\pm 0,0518$	0,07 $\pm 0,004$	1,65 $\pm 0,18$	0,0075 $\pm 0,0003$	1,105
10384962	2,87954 $\pm 0,00071$	930,83032 $\pm 0,00224$	14,3657 $\pm 0,0035$	0,16 $\pm 0,08$	358 ± 178	84,47 $\pm 2,78$	0,1555 $\pm 0,0357$	0,22 $\pm 0,04$	0,29 $\pm 0,31$	0,012 $\pm 0,015$	6,28
10420279	45,43327 $\pm 0,00063$	945,3097 $\pm 0,00059$	14,7748 $\pm 0,0001$	0,48 $\pm 0,01$	49 ± 1	89,95 $\pm 0,05$	0,0309 $\pm 0,0001$	0,9 $\pm 0,07$	0,92 $\pm 0,02$	0,751 $\pm 0,117$	1,458
10487119	6,74934 $\pm 0,0003$	972,06672 $\pm 0,00063$	15,7545 $\pm 0,0003$	0,05 $\pm 0,02$	270,0 $\pm 0,2$	84,58 $\pm 0,39$	0,1302 $\pm 0,0051$	1,28 $\pm 0,41$	0,58 $\pm 0,1$	0,943 $\pm 0,4$	2,289
10491544	22,77023 $\pm 0,01194$	482,06693 $\pm 0,01052$	13,4365 $\pm 0,0002$	0,5 $\pm 0,09$	52 ± 9	87,66 $\pm 0,3$	0,0633 $\pm 0,006$	0,14 $\pm 0,01$	1,11 $\pm 0,67$	0,023 $\pm 0,014$	0,659
10514770	1,8724 $\pm 0,00005$	810,31059 $\pm 0,00288$	15,2898 $\pm 0,0001$	0,003 $\pm 0,120$	82 ± 165	68,61 $\pm 3,77$	0,3823 $\pm 0,0589$	0,37 $\pm 0,49$	0,29 $\pm 0,45$	0,041 $\pm 0,548$	0,689
10677186	100,40145 $\pm 0,00069$	416,88586 $\pm 0,00088$	15,0179 $\pm 0,0001$	0,48 $\pm 0,01$	60 ± 11	89,41 $\pm 0,16$	0,0211 $\pm 0,0011$	0,212 $\pm 0,002$	0,08 $\pm 0,47$	0,003 $\pm 0,021$	0,444

Tabela A.6: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
10711913	19,40818 $\pm 0,00046$	853,48575 $\pm 0,0008$	15,5202 $\pm 0,0006$	0,21 $\pm 0,07$	112 ± 25	87,21 $\pm 0,31$	0,0635 $\pm 0,0033$	0,63 $\pm 0,17$	0,45 $\pm 0,43$	0,174 $\pm 0,208$	1,653
10909274	39,23813 $\pm 0,00002$	462,55673 $\pm 0,00007$	12,154 $\pm 0,0001$	0,724 $\pm 0,001$	129,1 $\pm 0,2$	89,35 $\pm 0,03$	0,0493 $\pm 0,0001$	0,87 $\pm 0,09$	1 $\pm 0,01$	0,743 $\pm 0,186$	0,886
10960995	3,11706 $\pm 0,00014$	920,19154 $\pm 0,00079$	14,4977 $\pm 0,0019$	0,03 $\pm 0,04$	269 ± 89	85,3 $\pm 0,6$	0,1687 $\pm 0,0069$	0,77 $\pm 0,2$	0,58 $\pm 0,21$	0,366 $\pm 0,223$	7,311
10987439	10,67459 $\pm 0,00126$	523,17059 $\pm 0,00229$	10,8097 $\pm 0,0004$	0,03 $\pm 0,05$	351 ± 116	85,95 ± 1	0,0835 $\pm 0,0105$	0,29 $\pm 0,08$	0,08 $\pm 0,01$	0,046 $\pm 0,029$	0,585
11232745	9,63417 $\pm 0,00033$	274,76075 $\pm 0,00203$	15,9724 $\pm 0,0016$	0,01 $\pm 0,41$	90 ± 124	87,08 $\pm 0,73$	0,0627 $\pm 0,0093$	0,46 $\pm 4,11$	0,65 $\pm 2,1$	0,132 $\pm 0,479$	2,412
11235323	19,66818 $\pm 0,00046$	820,9191 $\pm 0,00311$	13,4928 $\pm 0,0016$	0,01 $\pm 0,01$	89 ± 2	87,59 $\pm 0,12$	0,1355 $\pm 0,0016$	2,31 $\pm 0,02$	0,39 $\pm 0,01$	1,952 $\pm 0,025$	20,972
11249624	65,58354 $\pm 0,00038$	510,56908 $\pm 0,00105$	15,7469 $\pm 0,0008$	0,82 $\pm 0,07$	6 ± 173	88,23 $\pm 1,45$	0,0215 $\pm 0,0057$	0,54 $\pm 0,03$	0,17 $\pm 0,11$	0,047 $\pm 0,032$	0,977
11656840	7,44247 $\pm 0,00228$	810,04119 $\pm 0,00656$	15,2701 $\pm 0,0002$	0,16 $\pm 0,16$	268 ± 12	89,85 $\pm 1,38$	0,0355 $\pm 0,0075$	0,14 $\pm 0,12$	0,01 $\pm 0,03$	0,0001 $\pm 0,0028$	2,038
11761199	213,62058 $\pm 0,01422$	568,89091 $\pm 0,01008$	15,6205 $\pm 0,0002$	0,68 $\pm 0,04$	86 ± 2	89,79 <i>(fixo)</i>	0,0127 $\pm 0,0015$	0,29 $\pm 0,01$	0,01 $\pm 0,02$	0,001 $\pm 0,002$	0,994
11805075	199,83881 $\pm 0,1785$	824,87721 $\pm 0,15533$	14,7402 $\pm 0,0007$	0,19 $\pm 0,26$	314 ± 159	89,89 $\pm 0,23$	0,0033 $\pm 0,0025$	0,23 $\pm 0,76$	0,003 $\pm 10,145$	0,0001 $\pm 2,2104$	0,404
11858979	3,0597 $\pm 0,00108$	939,41924 $\pm 0,0058$	14,0771 $\pm 0,0001$	0,01 $\pm 0,21$	94 ± 120	81,95 $\pm 5,89$	0,154 $\pm 0,0916$	0,04 $\pm 0,32$	0,35 $\pm 246,78$	0,001 $\pm 46,881$	0,231

Tabela A.7: Continuação.

KIC	P (dias)	T_0 (BJD-2454833)	m_k	e	ω ($^\circ$)	i ($^\circ$)	$r_a + r_b$	k	J	$\frac{L_b}{L_a}$	σ (mmag)
11966557	60, 29746 $\pm 0, 0013$	222, 15253 $\pm 0, 00109$	15, 6859 $\pm 0, 0075$	0, 24 $\pm 0, 24$	304 ± 113	89, 65 $\pm 0, 48$	0, 0265 $\pm 0, 0139$	0, 61 $\pm 0, 05$	0, 57 $\pm 0, 3$	0, 203 $\pm 0, 106$	2, 235
12106934	5, 94743 $\pm 0, 00829$	44, 3235 $\pm 0, 0219$	18, 3553 $\pm 0, 0039$	0, 59 $\pm 0, 24$	268 ± 3	81, 23 $\pm 4, 33$	0, 2499 $\pm 0, 0941$	3, 29 $\pm 6, 49$	0, 002 $\pm 0, 038$	0, 028 $\pm 0, 532$	6, 253
12306808	37, 87857 $\pm 0, 00044$	819, 94146 $\pm 0, 00039$	13, 26509 $\pm 0, 00003$	0, 14 $\pm 0, 04$	52 ± 9	88, 66 $\pm 0, 17$	0, 0468 $\pm 0, 0034$	0, 83 $\pm 0, 27$	1, 08 $\pm 0, 56$	0, 723 $\pm 0, 548$	0, 432
12351927	10, 11617 $\pm 0, 00031$	817, 76416 $\pm 0, 00137$	15, 5195 $\pm 0, 0005$	0, 01 $\pm 0, 15$	162 ± 138	87, 64 $\pm 0, 81$	0, 0545 $\pm 0, 0102$	0, 46 $\pm 0, 42$	0, 09 $\pm 0, 19$	0, 019 $\pm 0, 042$	2, 743
12365000	1, 26225 $\pm 0, 00289$	714, 32433 $\pm 0, 00816$	13, 5757 $\pm 0, 0062$	0, 02 $\pm 0, 17$	76 ± 135	75, 2 $\pm 9, 06$	0, 3085 $\pm 0, 1306$	0, 14 $\pm 0, 71$	0, 16 $\pm 21, 25$	0, 003 $\pm 11, 916$	2, 231
12470041	14, 66752 $\pm 0, 00067$	931, 21712 $\pm 0, 00371$	14, 6675 $(fixo)$	0, 19 $\pm 0, 21$	229 ± 47	87, 45 $\pm 1, 14$	0, 054 $\pm 0, 0218$	1, 55 $\pm 4, 87$	0 $(fixo)$	0 $(fixo)$	5, 414

Tabela A.8: Continuação.

Bibliografia

- [1] CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An introduction to modern astrophysics and cosmology*. [S.l.: s.n.], 2006.
- [2] PERCY, J. R. *Understanding variable stars*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- [3] PRŠA, A. et al. Artificial intelligence approach to the determination of physical properties of eclipsing binaries. i. the ebai project. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 687, n. 1, p. 542, 2008.
- [4] BATTEN, A. H. *Binary and Multiple Systems of Stars*. [S.l.]: Pergamon Press, 1973.
- [5] KALLRATH, J.; MILONE, E. F. *Eclipsing binary stars: modeling and analysis*. [S.l.]: Springer, 2009.
- [6] BÖHM-VITENSE, E. *Introduction to stellar astrophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1989.
- [7] STERKEN, C.; JASCHEK, C. *Light curves of variable stars: a pictorial atlas*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- [8] SOUTHWORTH, J.; MAXTED, P.; SMALLEY, B. Eclipsing binaries in open clusters–i. v615 per and v618 per in h persei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 349, n. 2, p. 547–559, 2004.
- [9] SOUTHWORTH, J.; MAXTED, P.; SMALLEY, B. Eclipsing binaries in open clusters–ii. v453 cyg in ngc 6871. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 351, n. 4, p. 1277–1289, 2004.
- [10] SOUTHWORTH, J. et al. Accurate fundamental parameters of eclipsing binary stars. *The International Astronomical Union*, n. 224, p. 548–561, 2004.
- [11] ETZEL, P. B. A simple synthesis method for solving the element of well-detached eclipsing systems. *Photometric and Spectroscopic Binary Systems*, p. 111–120, 1981.
- [12] LEVENBERG, K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least-squares. *Quart. Appl. Math.*, v. 2, p. 164–168, 1944.
- [13] MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, v. 11, p. 431–441, 1963.

- [14] PRESS, W. H. *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. [S.l.]: Cambridge university press, 2007.
- [15] SING, D. K. Stellar limb-darkening coefficients for corot and kepler. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 510, p. A21, 2010.
- [16] KURUCZ, R. L. Atlas: A computer program for calculating model stellar atmospheres. *SAO Special Report*, v. 309, 1970.
- [17] SOUTHWORTH, J. Eclipsing binary stars: the royal road to stellar astrophysics. In: *Orbital Couples: Pas de Deux in the Solar System and the Milky Way*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1, p. 51–58.
- [18] FRAQUELLI, D.; THOMPSON, S. *Kepler Archive Manual (KDMC-10008-005)*. [S.l.: s.n.], 2014.
- [19] PERRYMAN, M. *The exoplanet handbook*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- [20] KOCH, D. G. et al. Kepler mission design, realized photometric performance, and early science. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 713, n. 2, p. L79, 2010.
- [21] NASA. *KEPLER K2: Science Center*. Disponível em: <<https://keplerscience.arc.nasa.gov/objectives.html>>.
- [22] PRŠA, A. et al. Kepler eclipsing binary stars. i. catalog and principal characterization of 1879 eclipsing binaries in the first data release. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 141, n. 3, p. 83, 2011.
- [23] SLAWSON, R. W. et al. Kepler eclipsing binary stars. ii. 2165 eclipsing binaries in the second data release. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 142, n. 5, p. 160, 2011.
- [24] KIRK, B. et al. Kepler eclipsing binary stars. vii. the catalog of eclipsing binaries found in the entire kepler data set. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 151, n. 3, p. 68, 2016.
- [25] PRŠA, A.; ZWITTER, T. A computational guide to physics of eclipsing binaries. i. demonstrations and perspectives. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 628, n. 1, p. 426, 2005.
- [26] ROWEIS, S. T.; SAUL, L. K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 290, n. 5500, p. 2323–2326, 2000.
- [27] ARMSTRONG, D. J. et al. A catalogue of temperatures for kepler eclipsing binary stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 437, n. 4, p. 3473–3481, 2014.
- [28] EVERETT, M. E.; HOWELL, S. B.; KINEMUCHI, K. A ubv photometric survey of the kepler field. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 124, n. 914, p. 316, 2012.

- [29] GREISS, S. et al. Initial data release of the kepler-int survey. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 144, n. 1, p. 24, 2012.
- [30] SKRUTSKIE, M. et al. The two micron all sky survey (2mass). *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 131, n. 2, p. 1163, 2006.
- [31] BROWN, T. M. et al. Kepler input catalog: photometric calibration and stellar classification. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 142, n. 4, p. 112, 2011.
- [32] SCHOLZ, F. W.; STEPHENS, M. A. K-sample anderson-darling tests. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor Francis Group, v. 82, n. 399, p. 918–924, 1987.
- [33] CHRISTIANSEN, J. et al. Kepler data characteristics handbook. *KSCI-19040*, 2013.
- [34] CHAMBERS, J. M.; HASTIE, T. J. *Statistical models in S*. [S.l.]: CRC Press, Inc., 1991.
- [35] SEAGER, S.; MALLEN-ORNELAS, G. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 585, n. 2, p. 1038, 2003.
- [36] HAUKE, J.; KOSSOWSKI, T. Comparison of values of pearson’s and spearman’s correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, v. 30, n. 2, p. 87–93, 2011.
- [37] COUGHLIN, J. L. et al. Low-mass eclipsing binaries in the initial kepler data release. *The Astronomical Journal*, v. 141, n. 3, p. 78, 2011.
- [38] DUQUENOY, A.; MAYOR, M. *Binaries as Tracers of Stellar Formation*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992.
- [39] MEIBOM, S.; MATHIEU, R. D. A robust measure of tidal circularization in coeval binary populations: the solar-type spectroscopic binary population in the open cluster m35. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 620, n. 2, p. 970, 2005.
- [40] ZAHN, J.-P. Tidal friction in close binary stars. *Astronomy and Astrophysics*, v. 57, p. 383–394, 1977.
- [41] GIURICIN, G.; MARDIROSSIAN, F.; MEZZETTI, M. Orbital circularization in early-type detached close binaries. *Astronomy and Astrophysics*, v. 134, p. 365–367, 1984.
- [42] NORTH, P.; ZAHN, J.-P. Circularization in b-type eclipsing binaries in the magellanic clouds. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 405, n. 2, p. 677–684, 2003.