

Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciencias Exactas e da Terra Departamento de Física Teórica e Experimental Programa de Pós-Graduação em Física

## Determinação do Período Orbital de Sistemas Binários Eclipsantes

Yeisson Fabian Martinez Osorio

Orientador: Prof. Dr. José Renan de Medeiros

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-gradução em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE** em **FÍSICA**.

Natal, Agosto de 2009

# Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

"First principles, Clarice. Simplicity. Read Marcus Aurelius. Of each particular thing ask: what is it in itself? What is its nature? What does he do, this man you seek?" (Fracmento de *The Silence of the Lambs* de Tomas Harris)

# Sumário

| Agradecimentos v |      |          |  | viii |
|------------------|------|----------|--|------|
| $\mathbf{R}$     | esum | 10       |  | x    |
|                  | Abs  | tract .  |  | xi   |
| 1                | Intr | roduçã   | 0  | 1    |
| <b>2</b>         | Res  | enha I   | Histórica                                    | 4    |
|                  | 2.1  | As Pr    | imeiras Observações                          | 4    |
|                  | 2.2  | Os Pr    | imeiros Ajustes                              | 5    |
|                  | 2.3  | A Che    | egada da Tecnologia                          | 6    |
|                  | 2.4  | O Pro    | blema da Multiplicade das Soluções           | 7    |
| 3                | Cla  | ssificaç | ção das Estrelas Binárias                    | 8    |
|                  | 3.1  | Classi   | ficação de acordo com a distancia relativa   | 8    |
|                  |      | 3.1.1    | Lóbulos de Roche                             | 9    |
|                  |      | 3.1.2    | Binárias de Não Contato (Detached Binaries)  | 12   |
|                  |      | 3.1.3    | Binárias de Semi-Contato                     | 13   |
|                  |      | 3.1.4    | Binárias de Contato                          | 15   |
|                  | 3.2  | Classi   | ficação de Acordo com os Métodos de Detecção | 16   |
|                  |      | 3.2.1    | Binárias Ópticas e Binárias Físicas          | 16   |
|                  |      | 3.2.2    | Binárias Visuais                             | 17   |
|                  |      | 3.2.3    | Binárias Interferométricas                   | 17   |

|              |                        | 3.2.4   | Binárias Astrométricas   | 17 |
|--------------|------------------------|---------|--|----|
|              |                        | 3.2.5   | Binárias Espectroscópicas  | 18 |
|              |                        | 3.2.6   | Binárias Eclipsantes   | 18 |
| 4            | A A                    | nalise  | Wavelet  | 20 |
|              | 4.1                    | A Tra   | nsformada Wavelet Continua (CWT)   | 21 |
|              | 4.2                    | Seleçã  | o da Wavelet Mãe   | 22 |
|              | 4.3                    | Exem    | plos de Wavelet Mãe  | 24 |
|              |                        | 4.3.1   | Wavelet Gaussiana  | 24 |
|              |                        | 4.3.2   | Wavelet Morlet   | 25 |
|              |                        | 4.3.3   | Wavelet Paul   | 26 |
|              | 4.4                    | O Maj   | pa Wavelet   | 27 |
| <b>5</b>     | <b>Os</b>              | Dados   | Observacionais   | 29 |
|              | 5.1                    | A Mis   | são CoRoT  | 29 |
|              |                        | 5.1.1   | Objetivos Científicos da Missão  | 30 |
|              |                        | 5.1.2   | O Satélite CoRoT   | 33 |
|              | 5.2                    | A Esc   | olha dos Dados   | 34 |
|              |                        | 5.2.1   | O Pre-Tratamento das Curvas de Luz                                       | 34 |
| 6            | Resultados e Discussão |         |  | 39 |
|              | 6.1                    | Obten   | ção do Período Orbital   | 39 |
|              | 6.2                    | Prepa   | ração dos Dados Observacionais   | 42 |
|              | 6.3                    | Result  | ados: Os Períodos Orbitais   | 44 |
|              |                        | 6.3.1   | comparação com outros métodos  | 47 |
|              | 6.4                    | Anális  | e de diagrama de fase: Uma aplicação para CoRo<br>T ${\rm ID}$ 102709642 | 53 |
| 7            | Cor                    | nclusõe | s e Perspectivas   | 55 |
| $\mathbf{A}$ | Rep                    | oresent | ação da CWT no Espaço de Frequências                                     | 58 |

| SUMÁRIO                                     | iii |
|---|-----|
| B Diagramas de Fase das Estrelas Observadas | 60  |
| Descrição Bibliográfica                     | 66  |

# Lista de Figuras

| 3.1 | Representação 2D do potencial de Roche (Superfícies solução da Eq.                    |    |
|-----|---|----|
|     | [3.11])para 4 valores diferentes de massas relativas $q.$ Os contornos são            |    |
|     | o resultado do cruzamento das superfícies equipotenciais e o plano da                 |    |
|     | órbita, as unidades espaciais estão em unidades de separação dos centros              |    |
|     | das estrelas. A linha escura representa o potencial que limita os $l \acute{o} bulos$ |    |
|     | de Roche de cada estrela  | 11 |
| 3.2 | Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase da              |    |
|     | órbita) para um sistema binário de não contato, no caso de um sistema                 |    |
|     | binário eclipsante (ver secção 3.2.6)   | 13 |
| 3.3 | Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase                 |    |
|     | da órbita) para um sistema binário de semi-contato no caso que seja um                |    |
|     | sistema binário eclipsante (ver secção 3.2.6).  | 14 |
| 3.4 | Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase                 |    |
|     | da órbita) para um sistema binário de contato no caso de um sistema                   |    |
|     | binário eclipsante (ver secção 3.2.6)   | 16 |
| 4.1 | Wavelet mãe Gaussiana de ordem 2 (Esquerda) e a sua transformada de                   |    |
|     | Fourier (Direita), note-se que no espaço de frequências a informação esta             |    |
|     | repetida (a função é par) o que faz com que esta não seja uma wavelet                 |    |
|     | progressiva (ler embaixo). Os eixos não são nomeados já que os nomes                  |    |
|     | das variáveis dependem do sinal a ser estudado.                                       | 24 |
|     |   |    |

4.2Wavelet mãe Morlet de ordem 5 (Esquerda) e a sua transformada de Fourier (Direita), a linha contínua representa a parte real da função e a linha pontilhada, a parte imaginária. Os eixos não são nomeados já que os nomes das variáveis dependem do sinal a ser estudado. . . . . . . . 25Wavelet mãe Paul de ordem 1 (Esquerda) e a sua transformada de Fou-4.3rier (Direita), a linha contínua representa a parte real da função e a linha pontilhada, a parte imaginária. Os eixos não são nomeados porque os nomes das variáveis dependem do sinal a ser estudado. Em nosso caso, o eixo horizontal seria o tempo t e o eixo vertical a intensidade relativa dI/I..... 264.4Acima. Sinal artificial mostrando quatro variações diferentes: oscilação (desde 0 a 35 no tempo), variação tipo delta (35 a 70), sinal uniforme (70 a 105) e ruído branco (105 a 140). Meio Três mapas wavelet da sinal feitos com a wavelet Gaussiana, Morlet e Paul respectivamente. Abaixo Relação entre as cores e a intensidade relativa dos coeficientes  $CWT_{LC}(s,t;\Psi)$ ; esta convenção de cores será usada em todos os mapas 285.1As três partes ensambladas do CoRoT (CoRoTcase na base, CoRoTcam 33 e CoRoTel acima). 5.2Exemplo de falso trânsito na curva de luz da estrela CoRoT-ID 102694654. Isto é devido provavelmente a contaminação por um sistema binário de fundo, na figura de acima aparecem as componentes das curvas de luz para cada cor; a cor vermelha, verde (cujo valor de DI/I foi deslocado 0.02 para ajudar na visualização) e azul (deslocado 0.04 em DI/I); e embaixo a curva de luz composta pelas três contribuições. 36 Curva de luz (LC) da estrela CoRoT ID 102629540 (acima) e mapa 6.1wavelet usando como wavelet mãe a componente real da wavelet de Paul 41

| 6.2  | Integral sobre as escalas dos coeficientes do mapa wavelet Paul (Fig. 6.1,                                      |    |
|------|---|----|
|      | abaixo). Os máximos desta estão centrados na metade dos trânsitos $$  | 42 |
| 6.3  | Diagrama cor-magnitude das estrelas da amostra descriminando pelo   |    |
|      | tipo de sistema (contato, semi contato e não contato).  | 44 |
| 6.4  | Diagrama de B-V vs período orbital descriminando pelo tipo de sistema   |    |
|      | (contato, semi contato e não contato).  | 46 |
| 6.5  | Diagramas do período orbital v<br>s Temperatura (esquerda) e B-V (direita) $$                                   |    |
|      | descriminando pelo tipo de sistema (contato, semi contato e não contato).                                       | 47 |
| 6.6  | Detalhes dos diagramas de fase da estrela Co<br>RoT ID 102768841 obtidos  |    |
|      | com o método EEBLS e o método Wavelet   | 48 |
| 6.7  | Detalles dos diagramas de fase da estrela CoRo<br>T ${\rm ID}$ 102715978 obtidos                                |    |
|      | com o método EEBLS e o método Wavelet   | 49 |
| 6.8  | Detalhes dos diagramas de fase da estrela CoRo<br>T $\rm ID$ 102808511 obtidos                                  |    |
|      | com o método ANOVA e o método Wavelet   | 50 |
| 6.9  | Detalhes dos diagramas de fase da estrela Co<br>RoT ID 102788679 obtidos  |    |
|      | com o método ANOVA e o método Wavelet   | 51 |
| 6.10 | Detalhes dos diagramas de fase da estrela Co<br>RoT ID 102750270 obtidos  |    |
|      | com o método ANOVA e o método Wavelet   | 52 |
| 6.11 | Curva de luz da estrela Co<br>Ro<br>T ${\rm ID}$ 102709642 (pontos cinza) e ajuste                              |    |
|      | feito com Phoebe (linha preta, resultado do ajuste na tábela 6.2). O  |    |
|      | período orbital deste sistema é $P_{orb} = 14.307(5)$ dias. As figuras de                                       |    |
|      | embaixo são detalhes nos trânsitos.   | 54 |
| 7.1  | Curva de luz com assinatura de trânsitos (fortes e fracos), mapa wavelet  |    |
|      | Paul(acima) e zoom nas regiões fora dos dois trânsitos principais. Assim  |    |
|      | é possível ver como os trânsitos secundários são ressaltados no mapa. $% \left( {{{\mathbf{x}}_{i}}} \right)$ . | 57 |

# Lista de Tabelas

| 5.1 | Número de estrelas binárias que, se espera, sejam encontrados pelo Co-                |    |
|-----|---|----|
|     | RoT nos 3.4 graus quadrados do campo exo-planet. Tabela tomada de                     |    |
|     | Maceroni & Ribas ([Maceroni & Ribas(2006)])   | 32 |
| 5.2 | Dados da amostra fornecidos pelo CoRoT  | 38 |
| 6.1 | Lista das estrelas com períodos obtidos com o método wavelet (Período                 |    |
|     | WV) e com outros métodos (Período OM). os outros métodos são EE-                      |    |
|     | BLS(E), para sistemas binários de não contato (NC) e de semi con-                     |    |
|     | tato(SC), ou ANOVA (A), Para sistemas binários de contato(C); con-                    |    |
|     | forme é explicado mais adiante.   | 45 |
| 6.2 | Parâmetros do ajuste feito com Phoebe á curva de luz da estrela CoRoT                 |    |
|     | ID 102709642. Os parâmetros são: inclinação $\left(i\right)$ em graus, raio polar da  |    |
|     | estrela primaria relativo ao semi eixo maior $(r_1/a)$ , raio polar da estrela        |    |
|     | secundária relativo ao semi eixo maior $(r_2/a)$ , razão de raios $(r_1/r_2)$ ,       |    |
|     | razão de massas (q-secundária sobre a primaria), razão de temperatura                 |    |
|     | $(T_1/T_2),$ excentricidade da órbita $(e)$ e longitude do periastro $(lon_{per}).$ . | 53 |
| B.1 | Diagramas de fase obtidos a partir das curvas de luz dos sistemas binários            |    |
|     | estudados neste trabalho junto com o valor do correspondente periodo                  |    |
|     | em dias   | 65 |

# Agradecimentos

A curiosidade é a tocha com a qual eu ilumino o meu caminho, mais o fogo nessa tocha é feito das pessoas com quem eu compartilhe todas as experiências (boas e ruins) que fizerem de mim o que eu sou hoje. É impossível agradecer a todas as pessoas que devo em tão pouco espaço.

Agradeço com todo o meu ser á minha mãe, ela é o maior dos meus exemplos e sem a sua guia a minha vida com certeza seria outra. Agradeço a minha família, que mesmo desde a distancia sempre estiveram atentos e dispostos para me colaborar a fazer os meus planos realidade. Agradeço ao Brasil que através da CAPES deu me a oportunidade de continuar pelo caminho da minha escolha. Colômbia, a minha querida pátria (a quem também agradeço), véu me nascer como cientista mais no Brasil eu tive minha puberdade e a minha adolescência, além de me permitir ver a vida em outra língua, tanto no espírito como no corpo. Agradeço ao Prof. José Renan de Medeiros por me permitir compartilhar e fazer parte da sua equipe, pelas oportunidades abertas para o meu futuro que com certeza não seriam sem a sua ajuda. Agradeço a os meus companheiros do grupo de Astrofísica pela colaboração e pela paciência, pois a emoção ao me expressar nunca me permitiu falar devagar. Dentre eles agradeço especialmente a Sumaia Sales, mia mãe brasileira, e a sua família (Adriano, André, Dona Nina, Socorro, Rosi, Lolita ...) porque sem a sua amizade, familiaridade e incondicionalidade a mia vida em Natal não teria sido tão prazenteira; ao Izan Leão pela maneira em que mesmo sem que ele soubesse me ensino acerca da paixão, humildade e o respeito ao conhecimento dos outros que a ciência deve motivar; A Jenny Bravo por a certeza nas suas palavras, seu conselho, sua irmandade e a sua companhia; a Sânzia, Bruno e

#### AGRADECIMENTOS

Liduina pela confidencialidade e o apoio oferecido nos momentos difíceis. Agradeço aos professores do departamento pelas lições, em especial ao professor Ananias Monteiro Mariz pelo amor que inspira para a ciência e o prazer que geram as suas aulas. Agradeço a os funcionários do DFTE pela sua colaboração e o sorriso que usualmente foi a minha bem-vinda ao local de trabalho, e por sempre fazer o possível para que este seja mas confortável. Agradeço a Maria Fernanda por que mesmo que não estiver no final, muito do caminho foi junto a ela. Ela sempre limpo o meu espelho quando sujava com as coisas que eu não quero ser. Agradeço ao Dr. Dan Bruton pela permissão no uso do seu programa StarlightPro e pelo interesse e colaboração neste trabalho. Agradeço novamente a Sânzia Alves e ao Saulo Maciel pela sua paciência na correção do português, mais é claro que todo erro nesta dissertação é a minha responsabilidade. Finalmente não por isto menos importante, agradeço á Natureza por ter o mistério suficiente para que seus véus mostrem a sua formosa silhueta e ao mesmo tempo me permita ficar perto dela como para atrevidamente sonhar com um dia ver sua face nua.

## Determinação do Período Orbital de Sistemas Binários Eclipsantes

### por Yeisson Fabian Martínez Osorio

### Resumo

Neste trabalho é apresentado um novo método para determinação do período orbital  $(P_{orb})$  dos sistemas binários eclipsantes baseado na técnica wavelet. O método é aplicado em 18 sistemas binários eclipsantes detectados pelo satélite CoRoT (Covection, Rotation and planetary Transits). Os períodos obtidos por este método são comparados com os métodos convencionais para a determinação deste período: métodos de ajuste de caixa (EEBLS) para sistemas binários de não contato e de semi contato; e os métodos polinomiais (ANOVA) para sistemas binários de contato. Comparando os diagramas de fase dos diferentes métodos é notável a superiodidade do método wavelet sobre o EEBLS na determinação do  $P_{orb}$ . No caso dos sistemas binários de contato o método mostra resultados melhores na maioria dos casos mas quando o número de dados por ciclo orbital é reduzido o método ANOVA determina melhor estes períodos. Assim, a técnica wavelet mostra-se como uma ótima ferramenta para a análise de dados com a qualidade e precisão fornecidos pelo CoRoT, desde pontos de vista diferentes dos convencionais métodos de Fourier.

### Determination of the Orbital Period of Eclipsing Binary Systems

### by Yeisson Fabian Martínez Osorio

## Abstract

In this work is presented a new method for the determination of the orbital period  $(P_{orb})$  of eclipsing binary systems based on the wavelet technique. This method is applied on 18 eclipsing binary systems detected by the CoRoT (Convection Rotation and planetary transits) satellite. The periods obtained by wavelet were compared with those obtained by the conventional methods: box Fitting (EEBLS) for detached and semi-detached eclipsing binaries; and polynomial methods (ANOVA) for contact binary systems. Comparing the phase diagrams obtained by the different techniques the wavelet method determine better  $P_{orb}$  compared with EEBLS. In the case of contact binary systems the wavelet method shows most of the times better results than the ANOVA method but when the number of data per orbital cicle is small ANOVA gives more accurate results. Thus, the wavelet technique seems to be a great tool for the analysis of data with the quality and precision given by CoRoT and the incoming photometric missions.

# Capítulo 1

# Introdução

Durante o século XX grandes mudanças aconteceram na área da astrofísica estelar. Nas primeiras décadas as observações (tanto fotométricas quanto espectroscópicas) revelaram propriedades das estrelas que só foram compreendidas com os recém descobertos avanços teóricos (principalmente da mecânica quântica, ao mostrar que as linhas espectrais são diferentes para cada elemento químico). Estudos estatísticos mostraram que mais da metade das estrelas observadas no céu são, na realidade, sistemas múltiplos, onde duas ou mais delas interagem gravitacionalmente e permanecem juntas percorrendo orbitas fechadas. É também conhecido que uma pequena porcentagem dos sistemas binários tem órbitas inclinadas em um ângulo que faz com que uma das estrelas passe na frente da outra quando o sistema é visto da Terra (já que o alinhamento é uma questão do acaso). Estas estrelas têm uma importância especial devido a que as propriedades fundamentais das componentes do sistema (massa e raio de cada componente, principalmente) são possíveis de obter realizando estudos fotométricos e espectroscópicos. Assim, os sistemas binários eclipsantes são verdadeiros laboratórios astrofísicos para verificar resultados dos modelos teóricos de estrutura e evolução.

Os avanços em tecnologia computacional e a era espacial permitiram a chegada de dados em quantidade e qualidade nunca antes vistos, o que permite estudos muito mais precisos e completos em todas as áreas da astronomia. Uma destas ferramentas é o satélite CoRoT (COnvection, ROtation and planetary Transits), o primeiro com precisão suficiente para detectar planetas só duas vezes maior do que a Terra orbitando em estrelas diferentes do nosso Sol; os dados fornecidos pelo CoRoT (fluxo da estrela vs. tempo) possibilitam o estudo de muitas outras características como oscilações estelares, rotação, atividade, binaridade, etc.

Devido a natureza fotométrica dos dados do CoRoT, a binaridade só pode ser estudada no caso de sistemas binários eclipsantes e, já que na base de dados do CoRoT há centenas de milhares de curvas de luz, a procura por aquelas que evidenciem binaridade é um processo longo e que precisa de automatização.

Junto com o avanço tecnológico aparecem também ferramentas matemáticas que permitem novas aproximações na resolução de problemas. Uma destas ferramentas é o método wavelet, com o qual é possível fazer a análise de sinais (como as curvas de luz fornecidas pelo CoRoT) desde uma perspectiva diferente a fornecida pelos métodos baseados na análise de Fourier e aqueles baseados na análise multi-polinomial; a análise wavelet conserva informação não só das frequências que há no sinal mas também do local onde estas frequências estão atuando dentro do sinal.

No presente trabalho, períodos orbitais de 18 estrelas observadas pelo CoRoT com curvas de luz típicas de sistemas binários eclipsantes forem calculados através do método wavelet explodindo a descrição local que é realizada pelo método wavelet e os resultados forem comparados com os métodos convencionais para determinar períodos orbitais de sistemas binários eclipsantes.

A organização desta dissertação está feita da seguinte forma: no capítulo 2 há uma revisão histórica do estudo dos sistemas binários eclipsantes, em que o trabalho de Henry Norris Russell e Zedenek Kopal é ressaltado. No capítulo 3 são descritos os dois tipos de classificação dos sistemas binários: o primeiro baseado na influência gravitacional que uma componente do sistema tem sobre a outra e o segundo baseado no método de detecção destes sistemas. No capítulo 4 é feita uma introdução a análise wavelet e em particular a transformada wavelet contínua (CWT). O capítulo 5 é dedicado aos dados fotométricos usados neste trabalho, apresentando a missão CoRoT e mostrando a filtragem feita para a seleção das curvas de luz usadas. O capítulo 6 mostra como o método wavelet foi aplicado para a obtenção dos períodos orbitais dos sistemas binários eclipsantes, os resultados e a comparação feita com os métodos convencionais para a obtenção dos períodos (ANOVA e EEBLS) além da análise do diagrama de fase da estrela CoRoT ID 102709642; No capítulo 7 são propostos possíveis caminhos a seguir para explodir o recurso wavelet nos dados fornecidos pelo CoRoT. Finalmente, aparecem os apêndices e uma descrição bibliográfica dos textos recomendados pelo autor para continuar o estudo dos temas de cada capítulo.

# Capítulo 2

# Resenha Histórica

### 2.1 As Primeiras Observações

As estrelas binárias são estrelas que estão em órbita ao redor uma da outra devido à mútua atração gravitacional. Antigamente, os astrônomos achavam que as binárias visíveis (aquelas que com o telescópio parecem estar em casais) eram só resultado do ponto de observação e não da proximidade real, física, das estrelas no sistema; até que em 1767 John Michel observou que tinham mais binárias visíveis do que a casualidade podia explicar [Michell(1767)] o que significava que, pelo menos, uma fração dessas binárias são estrelas que tem proximidade física e, portanto, interação gravitacional. Em 1821 William Herschel fez o primeiro catálogo de binárias depois de começar estudos sobre elas em 1803 com a estrela Castor na constelação de Gemini [Herschel(1803)]. Hershel já tinha observado os câmbios em Algol e sugerido que as mudanças no brilho da estrela são devido a passagem entre nós e a estrela de um corpo opaco girando em torno desta [Herschel(1864)].

Hoje é sabido que aproximadamente 60% das estrelas na via láctea estão em grupos de duas ou mais delas, grupo conhecidos como sitemas binários ou sistemas múltiplos<sup>1</sup> [Abt(1983)]. Na realidade os sistemas binários podem ser compostos de muitos objetos,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Daqui em diante, ao nos referirmos aos sitemas binários, estes cobrem sistemas duplos e sistemas múltiplos de estrelas, a menos que se indique o contrário.

desde sistemas de protoestrelas rotando uma ao redor da outra até estrelas de neutrons e buracos negros e todas as combinações possíveis.

Menos de 0,3% dos sistemas binários tem o alinhamento favorável para observar eclipses de suas componentes desde a terra [Guinan & Engle(2006)]. As curvas de luz destes sistemas são facilmente identificáveis e muitos parâmetros do sistema podem ser calculados.

#### 2.2 Os Primeiros Ajustes

Na primeira metade do século XX ás observações dos sistemas binários eclipsantes eram feitas mudanças para eliminar efeitos não modelizáveis na época, como excentricidade das órbitas e efeitos de reflexão, depois os dados forem modelados como sistemas binários compostos de estrelas esféricas girando em órbitas circulares sincronizadas com a rotação, isto devido a que assim a resolução dos modelos era possível com o recursos tecnológicos da época.

Os primeiros estudos feitos deste jeito forem realizados por Henry Norris Russell ([Russell(1912a)] e [Russell(1912b)]). O seu primeiro interesse foi o cálculo dos parâmetros estelares das componentes de sistemas binários eclipsantes com o modelo conhecido como o modelo de Russell. Na década de 40 e 50, Zedenek Kopal usou o modelo do potencial de Roche para mostrar que as componentes de um sistema binário próximo são deformadas devido às forças gravitacional e centrífuga em formas não esféricas ([Drechsel & Zejda(2005)]-Prefacio) e, posteriormente, calculou as formas das binárias próximas baseado nas superfícies equipotenciais do potencial de Roche gerando curvas de luz mais realísticas e possíveis de aplicar agora nos casos de sistemas binários de contato onde o modelo de Russell com suas estrelas esféricas não podia fornecer resultados realísticos.

Neste período, a análise foi dividida em duas partes: na primeira, o estudo das mudanças no brilho fora dos eclipses oferece informação acerca de variações geométricas e de temperatura devido a deformações de maré e a efeitos de reflexão, na segunda parte o estudo dos trânsitos nas curvas de luz de sistemas binários oferecem informação acerca da geometria do sistema, assim, antes de estudar os trânsitos, os efeitos fora dos trânsitos são *retirados* num processo chamado retificação, só depois da retificação o ajuste dos trânsitos, ou seja, o cálculo dos parâmetros geométricos do sistema é feito.

Os trabalhos de Russell foram mais dirigidos na procura de um método para determinar os parâmetros astrofísicos a partir das curvas de luz, enquanto que Kopal esteve mais interessado em aspectos menos observacionais e mais teóricos. As duas contribuições forem fundamentais para o desenvolvimento dos métodos atuais para a descrição e a determinação de parâmetros dos sistemas binários eclipsantes.

### 2.3 A Chegada da Tecnologia

Durante as décadas do 60-70 aparecem os chamados modelos físicos (baseados no potencial de Roche) que substituíram os anteriores modelos geométricos, e que foram desenvolvidos depois dos trabalhos de Kopal. Dos modelos físicos que apareceram, dois conseguiram-se adaptar as poderosas ferramentas computacionais que surgiriam e são os mais usados hoje: LIGHT desenvolvido por Graham Hill [Hill & Hutchings(1970)] e o código de Wilson-Devinney (WD code, [Wilson & Devinney(1971)]). Os dois são usados atualmente para ajustar dados de sistemas binários eclipsantes. Wilson fez maiores avanços no código WD e agora ele pode modelar diagramas de velocidade radial [Wilson & Sofia(1976)], considerar polarização do limbo, perfis das linhas espectrais e pulsos de raios-X [Terrell(2001)].

O advento das câmaras CCD trouxe uma melhora muito importante na qualidade e na quantidade de dados fotométricos de sistemas binários eclipsantes, devido a possibilidade de fazer tomadas simultâneas de muitas estrelas e obter dados de excelente qualidade inclusive em condições não ótimas. Além do fato de aumentar a sensibilidade da observação permitindo fazer observações de estrelas mais débeis com a precisão necessária para determinar o tipo de variabilidade fotométrica desta.

Os modelos físicos mostraram que é possível extrair informação do sistema nas

regiões dos diagramas de fase fora dos trânsitos e que nestas regiões há informação além das características da atmosfera da componente primária. Assim, os efeitos de marés e os de aquecimento mútuo ajudam a determinar estimativas dos parâmetros estelares.

### 2.4 O Problema da Multiplicade das Soluções

Os modelos geométricos tinham 8 parâmetros livres: o raio, a luminosidade e o coeficiente do obscurecimento do limbo de cada componente junto com a inclinação da órbita e a época do trânsito primário. O problema é que estes modelos são muito restritos: as órbitas são circulares e as estrelas são esféricas o que faz com que só possa se usar para um número limitado de casos. Considerando todos os efeitos que geram mudanças nas curvas de luz de sistemas binários eclipsantes, e ampliando a gama de possibilidades (ou seja, baseado nos modelos físicos) são necessários 16 parâmetros para construir uma curva de luz sintética (Ver Cap. 9 de [Budding & Demircan(2007)]). Se depois de obter uma curva de luz típica de um sistema binário eclipsante é feita a tentativa de ajustar um modelo físico aos dados observa-se que achar um ajuste bom não é difícil. Se, por exemplo, o primeiro ajuste é feito nas massas das componentes do sistema binário, e depois são ajustados os outros parâmetros, a solução obtida é diferente de se, por exemplo, o primeiro é ajustar a inclinação da órbita. Isto deve-se ao fato de que o número de parâmetros livres (16 neste caso) é muito grande para a quantidade de informação contida na curva de luz, é por isto que para fazer um ajuste correto é necessário reduzir o número de parâmetros livres obtendo informação através de outras fontes como dados espectroscópicos ou obtendo informação acerca das mudanças na velocidade radial das componentes do sistema.

# Capítulo 3

## Classificação das Estrelas Binárias

As estrelas binárias são classificadas principalmente: de acordo com a distância relativa entre as estrelas, o que muda a sua morfologia, e de acordo com o tipo de método para detectá-las.

#### 3.1 Classificação de acordo com a distancia relativa

Dado que a força de gravidade é uma força de longo alcance, uma maior proximidade entre dois corpos não rígidos, como as estrelas, gera uma reconfiguração do campo gravitacional que muda a geometria do sistema provocando deformações na simetria esférica. Devido às mudanças na morfologia das estrelas componentes de um sistema binário, a forma da curva de luz muda também (se temos a sorte de que o plano orbital do sistema esteja na inclinação certa), o que permite fazer uma pre-classificação a partir das assinaturas características nas curvas de luz de sistemas binários eclipsantes. Antes de realizar a classificação de acordo com a distância relativa é importante rever o conceito de *Lóbulo de Roche* já que esta é a principal referência para determinar o tipo de influência que há entre as estrelas de um sistema binário.

#### 3.1.1 Lóbulos de Roche

Assumindo que as estrelas de um sistema binário estão em equilíbrio hidrostático e que as órbitas que percorrem são órbitas circulares e sincronizadas com o *spin* de cada uma das componentes do sistema, portanto com rotação uniforme, é possível mostrar que, uma vez obtido o potencial gravitacional, a morfologia do sistema binário é também determinável. As análises ficam mais simples se realizarmos os nossos cálculos situados no referêncial não inercial que está girando com as estrelas, ou seja, o referencial no qual as estrelas estão imóveis.

A força que sente uma pequena fração de massa m que se encontra sob a influência do sistema é determinada em nosso caso por

$$\vec{F}_{pres} + \vec{F}_{grav} = -m\,\omega^2\,\vec{\rho},\tag{3.1}$$

em que o termo da direita é a força centrípeta produzida pela mudança do marco referencial, que gira com momentum angular  $\omega$  e que se encontra a distancia  $\vec{\rho}$  do eixo de rotação<sup>1</sup>.  $\vec{F}_{pres}$  é a força devido às diferenças de pressão dentro do fluido por unidade de volume, a qual é o negativo do gradiente de pressão, ou seja,

$$\vec{F}_{pres} = -V \,\vec{\nabla}P = -\frac{m}{\rho_m} \vec{\nabla}P \tag{3.2}$$

em que  $\rho_m$  é a densidade de massa dentro do volume V com massa m.

Olhando para os termos

$$\vec{F}_{grav} + m\,\omega^2\,\vec{\rho} \tag{3.3}$$

da Eq. [3.1], dado que tanto a força devido à gravidade,

$$\vec{F}_{grav} = -\frac{G \, m_1 \, m}{r_1^3} \vec{r}_1 - \frac{G \, m_2 \, m}{r_2^3} \vec{r}_2 \tag{3.4}$$

quanto as força centrípeta são conservativas, é possível reescrever-las como o gradiente de um potencial escalar, isto é,

$$-\frac{G m_1 m}{r_1^3} \vec{r_1} - \frac{G m_2 m}{r_2^3} \vec{r_2} + m \,\omega^2 \,\vec{\rho} = -m \,\vec{\nabla}\Psi \tag{3.5}$$

<sup>1</sup>Nesta descrição as coordenadas primadas tem sua origem no centro de massa do sistema e as coordenadas não primadas, no centro da estrela  $m_1$  (escolhida arbitrariamente).

Substituindo as Eqs. [3.2] e [3.5] na Eq. [3.1], temos como consequência,

$$\vec{\nabla}P = -\rho_m \vec{\nabla}\Psi \tag{3.6}$$

e assim mostramos que  $\vec{\nabla}P$  e  $\vec{\nabla}\Psi$  são paralelos, ou seja, as superfícies equipotenciais e as isobáricas coincidem. Aplicando o rotacional a Eq. [3.6] temos

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} P = \vec{\nabla} \times (-\rho_m \vec{\nabla} \Psi) = -\rho_m \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \Psi - \vec{\nabla} \rho_m \times \vec{\nabla} \Psi$$
(3.7)

e, uma vez que o rotacional do gradiente de qualquer função é zero, temos

$$\vec{\nabla}\rho_m \times \vec{\nabla}\Psi = 0 \tag{3.8}$$

o que nos mostra que as superfícies isopícnicas ( $\rho_m = Cte$ ) são coincidentes com as equipotenciais e as isobáricas. Portanto concluímos que ao acharmos a distribuição de alguma delas, temos a distribuição das outras duas, o que nos permite determinar a morfologia da estrela. Logo, achando as superfícies de  $\Psi$  constante temos as formas possíveis das estrelas em um sistema binário simples. Da Eq. [3.5] vem que

$$\Psi = -\frac{G m_1}{r_1} - \frac{G m_2}{r_2} - \frac{1}{2} \omega^2 \rho^2.$$
(3.9)

Da terceira lei de Kepler temos que

$$\omega^2 = \frac{G(m_1 + m_2)}{R^3} \tag{3.10}$$

em que R é a distância entre os centros das estrelas  $m_1$  e  $m_2$ , assim

$$\Psi = -\frac{G m_1}{R} \left( \frac{1}{r_1'} + \frac{q}{r_2'} + \frac{1+q}{2} \rho'^2 \right)$$
(3.11)

sendo  $q = m_2/m_1$  e x' = x/R distancias em unidades relativas a separação dos centros das estrelas R.

Devido à relação de Kepler,  $\Psi$  não depende do período orbital do sistema, mas sim da razão das massas e da distância relativa entre as estrelas, o que permite calculá-lo em termos de valores relativos, e fazer comparações com sistemas de diferentes escalas. A intersecção do plano orbital com as superfícies equipotenciais vistas desde o marco referencial que órbita com o sistema gera as configurações da Fig. 3.1



Figura 3.1: Representação 2D do potencial de Roche (Superfícies solução da Eq. [3.11]) para 4 valores diferentes de massas relativas q. Os contornos são o resultado do cruzamento das superfícies equipotenciais e o plano da órbita, as unidades espaciais estão em unidades de separação dos centros das estrelas. A linha escura representa o potencial que limita os *lóbulos de Roche* de cada estrela.

A primeira classificação de acordo com a separação entre as superfícies das componentes de um sistema binário foi feita por Kopal [Kopal(1955)], que fez seu estudo baseado nas estrelas binárias conhecidas naquela data e considerando aquelas cuja binaridade havia sido confirmada com informação da variabilidade fotométrica. Ele mostra que a proximidade entre as estrelas determina que outros fatores, além da influência gravitacional, irão mudar o processo evolutivo dos elementos do sistema.

#### **3.1.2** Binárias de Não Contato (Detached Binaries)

São sistemas nos quais as estrelas não trocam matéria uma com a outra (desprezando ventos soares), já que cada uma das estrelas do sistema se encontra dentro dos seus lóbulos de Roche, ou seja, a isopícnica da estrela i (i = 1, 2) com  $\rho_{m_i} = 0$  coincide com uma equipotencial  $\Psi = \Psi_{0_i} < \Psi_R$  em que  $\Psi_R$  é o valor do potencial na superfície do lóbulo de Roche. A morfologia de cada estrela do sistema depende, principalmente, do quanto do lóbulo de Roche é preenchido pelas estrelas, ou seja, da proximidade do valor  $\Psi_{0_i}/\Psi_R$  a 1, onde a força de maré é mais importante a medida que o volume dentro do lóbulo de Roche é preenchido pela estrela. A fig. 3.2 mostra a morfologia de um sistema binário de não contato junto a curva de luz no caso de este ser um sistema binário eclipsante (ver sec. 3.2.6)

Entre as estrelas do sistema não existe transferência de massa importante (só através do vento estelar, mas a quantidade de massa transferida por este meio não influencia significativamente a evolução nem a estrutura de nenhuma das estrelas do sistema); entretanto, se as componentes do sistema estão suficientemente próximas (ou seja, os raios das estrelas são comparáveis ao raio da órbita) acontecem efeitos de maré entre as componentes do sistema, e estas interações permitem a transferência de *momentum* angular entre as estrelas e a órbita do sistema, provocando a circularização desta última [Tassoul(1988)]. O alinhamento dos spins dos planetas e da órbita, e a igualdade entre os períodos de rotação e orbitais<sup>2</sup> fazendo com que o sistema esteja no estado de mínima energia, girando como um corpo rígido [Shu & Lubow(1981)].

Normalmente as duas estrelas dos sistemas binários de não contato encontram-se na sequência principal e ainda é possível usar as relações entre raio, massa e luminosidade que existem para estrelas simples, isto mostra que a influência na estrutura das estrelas componentes do sistema binário de não contato não são influenciadas pela presença da sua companheira (somente o aspecto rotacional é modificado devido aos processos de sincronização).

 $<sup>^{2}</sup>$ Um estudo detalhado dos processos de sincronização e circularização foi feito por Leão [Leão(2004)] seguindo os trabalhos de Zahn ([Zahn(1977)] e posteriores).



Figura 3.2: Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase da órbita) para um sistema binário de não contato, no caso de um sistema binário eclipsante (ver secção 3.2.6).

#### 3.1.3 Binárias de Semi-Contato

No caso de estrelas binárias de semi-contato uma das componentes preenche, ou quase preenche, o volume envolvido pelo seu lóbulo de Roche, ou seja, a isopícnica da estrela  $i \operatorname{com} \rho_{m_i} = 0$  coincide com a superfície equipotencial  $\Psi_{0_i} \approx \Psi_R$  e no caso da sua companheira  $\rho_{m_j} = 0$  coincide com  $\Psi_{0_j} < \Psi_R$ . A fig. 3.3 mostra a morfologia de um sistema binário de semi-contato junto a curva de luz no caso de este ser um sistema binário eclipsante (ver sec. 3.2.6)

O paradoxo de Algol tem sua origem nas estrelas binárias deste tipo, em que a componente primária - de maior massa - do sistema ainda está na sequência principal (geralmente, entre os tipos espectrais B8 e A5), enquanto a componente secundária - bem menos massiva, com  $q \approx 0.2 - 0.3$  - tem características próprias de estrelas na região das sub-gigantes [Pustylnik(2005)]. Dado que, quanto menor a massa, maior é o tempo que estrela fica dentro da sequência principal, é evidente que o processo evolutivo nas binárias próximas é diferente quando comparado ao de estrelas simples, já que nas estrelas tipo Algol a estrela mais massiva ainda está na sequência principal enquanto a menos massiva parece ter envelhecido mais rápido, aparecendo agora como uma sub-gigante.

A principal perda de massa da estrela secundária acontece na região do ponto



Figura 3.3: Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase da órbita) para um sistema binário de semi-contato no caso que seja um sistema binário eclipsante (ver secção 3.2.6).

lagrangiano interno  $L_1$  onde se gera a transferência de massa. É uma característica comum a presença de um *disco de acreção* na estrela que recebe a matéria, o qual pode ou não ser permanente se a transferência de massa é ou não constante [Percy(2007)]. A transferência de massa gera também mudanças no período orbital do sistema, mas é necessário ser medida durante anos para que um estudo destas mudanças seja possível.

É devido a este tipo de configuração que se encontram os casos mais variados de sistemas binários, isto principalmente devido ao fato de que existe um fluxo de matéria da estrela que esta com o lóbulo de Roche preenchido para a estrela receptora; na realidade, se nos permitirmos estender o termo sistema binário de semi-contato, o receptor pode ser mais que uma estrela comum: uma anã branca, uma estrela de nêutrons e, inclusive, um buraco negro, sendo possível a formação de discos de acreção. O primeiro candidato observado de um buraco negro vem do sistema Sygnus X-1, no qual uma estrela gigante azulada  $(20 - 40M_{\odot})$  transfere massa á sua companheira de um diâmetro muito menor, em torno de  $10M_{\odot}$ . A massa transferida forma o disco de acreção que esquenta e emite radiação de raios-X.

#### 3.1.4 Binárias de Contato

Nos casos anteriores foram descritos dois grupos de sistemas binários próximos, classificando-os de acordo com a proximidade de suas superfícies aos seus respectivos lóbulos de Roche: os sistemas de *não contato* onde as duas estrelas são menores do que seus limites de Roche; e os sistemas de *semi-contato*, onde uma das estrelas componente do sistema binário preenche todo (ou quase todo) seu lóbulo de Roche, gerando tanto transferência de massa para a sua companheira através do ponto L1 como perda de massa no sistema. Neste terceiro caso, como é de se esperar, as duas estrelas mostram uma ocupação completa dos seus lóbulos de Roche, o que faz com que as suas superfícies estejam em contato através do ponto L1, daí o nome de *binárias de contato*. A fig. 3.4 mostra a morfologia de um sistema binário de contato junto a curva de luz no caso de este ser um sistema binário eclipsante (ver sec. 3.2.6)

Os períodos de rotação destes sistemas são muito curtos (podem ser de até 0,2 dias para binárias de contato com componentes anãs) e é impossível, quando o sistema é eclipsante, determinar o princípio e o fim dos trânsitos. Têm casos nos quais as duas estrelas ultrapassam consideravelmente o lóbulo de Roche do sistema e este termina sendo dois núcleos estelares com um envoltório comum. Nestes casos, a profundidade dos trânsitos das duas estrelas é similar, o que mostra que as duas componentes possuem temperaturas similares, mesmo que haja casos nos quais as duas massas sejam significativamente diferentes, isto pode ocorrer devido a possibilidade de haver transferência de luminosidade entre as diferentes regiões do envelope.

As estrelas tipo W UMa (baseado na estrela AW Ursae Majoris, que na realidade é um sistema binário de contato) são relativamente fáceis de encontrar no céu (uma de cada 500 anãs de tipos espectrais entre A e K é um sistema binário deste tipo) e tem uma relação período-luminosidade-cor que permite ter medidas das magnitudes absolutas com um erro de  $\pm 0, 25$ , o que as converte em referenciais para a determinação de distâncias [Percy(2007), Sec 5.7].



Figura 3.4: Morfologia e diagrama de fase da curva de luz (Fluxo relativo vs Fase da órbita) para um sistema binário de contato no caso de um sistema binário eclipsante (ver secção 3.2.6).

# 3.2 Classificação de Acordo com os Métodos de Detecção

#### 3.2.1 Binárias Ópticas e Binárias Físicas

Quando duas estrelas observadas no céu aparecem próximas uma da outra, há duas opções: ou elas estão realmente separadas por uma distância curta; ou estão muito longe entre si, mas quando projetadas na esfera celeste ficam perto, ou seja, a terra e as duas estrelas estão quase-alinhadas, o que gera o efeito da proximidade aparente entre as duas estrelas. O caso de estrelas próximas o suficiente para que a interação gravitacional de uma influencie o movimento da outra com respeito às demais estrelas são chamados de *sistemas binários físicos* ou simplesmente *sistemas binários*. No outro caso, onde a distância das duas estrelas não é suficientemente pequena para que a influência gravitacional seja diferenciável da influência das outras estrelas do aglomerado ou da galáxia, o sistema é aparente e são chamadas *Binárias Ópticas*.

#### **3.2.2** Binárias Visuais

São duas ou mais estrelas distinguíveis através do telescópio que mostram movimento orbital relativo uma a outra à medida que se movimentam no céu. Os períodos de estrelas binárias deste tipo podem variar desde anos até séculos. Foi através deste método que foram feitos os primeiros estudos sobre estrelas binárias [Herschel(1803)]. Estrelas com períodos tão grandes implicam estrelas muito distantes uma da outra e, portanto, muito pouco influentes na evolução da companheira.

#### 3.2.3 Binárias Interferométricas

A máxima resolução para observar binárias visuais com grandes telescópios refratores é aproximadamente entre 0,25 e 0,15 arco-segundos [Mullaney(2005)]. Esta técnica se realiza combinando as imagens de diferentes telescópios para aumentar a resolução angular e assim chegar a realizar medidas de binárias com 0,01 arco-segundos. Com este método é possível também calcular o diâmetro de estrelas gigantes vermelhas [A Dictionary of Astronomy(2009)].

#### 3.2.4 Binárias Astrométricas

No caso dos sistemas astrométricos, é possível observar só uma das componentes do sistema, mas o seu movimento com respeito às estrelas de fundo oscila periodicamente evidenciando a presença de um outro corpo interagindo gravitacionalmente; cálculos da posição da estrela visível no sistema astrométrico permite conhecer características do corpo no visível tais como a massa, e deduzir os possíveis motivos para o seu baixo brilho.

#### 3.2.5 Binárias Espectroscópicas

Devido ao efeito Doppler, as linhas espectrais na luz proveniente de uma estrela tem um deslocamento nos picos que é proporcional a sua velocidade radial<sup>3</sup> ( $V_r$ ), assim é possível determinar as mudanças em  $V_r$  e, quando os deslocamentos são periódicos do azul para o vermelho e vice-versa, isto significa que a estrela freia-se e acelera-se periodicamente, o que pode ser explicado pelo movimento orbital do sistema binário.

As estrelas detectadas por este método podem-se dividir em dois grupos: binárias espectroscópicas de linha simples SBI, em que é só visível o espectro de uma das estrelas e, portanto, o único que se observa são as mudanças periódicas na velocidade radial desta<sup>4</sup>; o outro caso é das binárias espectroscópicas de linha dupla SBII, em que já é possível diferenciar os dois espectros provenientes da mesma fonte de luz e as trocas na medida da velocidade radial para cada espectro tem um desfasamento de  $\pi$ .

O requisito indispensável para que um sistema binário possa ser conhecido como espectroscópico é que as diferenças na velocidade radial da estrela durante as diferentes fases do período sejam suficientemente grandes para que os deslocamentos para o vermelho e o azul possam ser medidos, e grandes velocidades implicam tempos curtos e, consequentemente (pela terça lei do Kepler), órbitas pequenas.

#### 3.2.6 Binárias Eclipsantes

A AAVSO (American Association of Variable Stars Observers, http://www.aavso.org) é uma organização internacional que observa, analisa e coleta dados de estrelas variáveis (estrelas que mudam a sua intensidade), estas mudanças são observadas através da *curva de luz* da estrela que é um gráfico brilho-tempo, onde o brilho pode ser expresso em fluxo ou em magnitude. As mudanças no brilho podem ocorrer por fenômenos próprios da estrela tais como mudanças no raio e/ou na temperatura, ou por alterações no fluxo da luz proveniente da estrela, como no caso da ocultação por um outro corpo.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Velocidade relativa entre a terra e a estrela na direção terra-estrela

 $<sup>{}^{4}</sup>$ Este é o processo análogo ao dos sistemas binários astrométricos (seção 3.2.4) mas na versão espectral.

Esse é o caso das binárias eclipsantes onde o ângulo de inclinação entre o eixo da órbita e a linha de visada é o suficientemente perpendicular ( $i \approx 90^{\circ}$ ) como para que uma eclipsasse á outra uma vez a cada ciclo orbital gerando uma diminuição do brilho total do sistema (as duas estrelas usualmente são indistinguíveis através do telescópio). Uma das principais características destas curvas de luz é a periodicidade das mudanças no brilho da estrela porém as formas das curvas de luz mudam consideravelmente dependendo dos raios fracionais das duas estrelas do sistema (ver secção 3.1).

Nos casos das binárias eclipsantes os diagramas de fase (conhecidos também como curvas de luz dobradas - folded light curves) são uma ferramenta mas útil do que a curva de luz para o estudo das periodicidades na estrela, nestes diagramas ciclos múltiplos das curvas de luz são superpostos uns acima dos outros, assim o gráfico fica brilho-fase orbital dando como resultado gráficos como os mostradas nas figuras (3.2), (3.3) e (3.4). Para construir os diagramas de fase a partir da curva de luz é indispensável conhecer o período orbital  $P_{orb}$  do sistema. O presente trabalho mostra uma nova via para a obtenção do  $P_{orb}$  e consequentemente para a construção dos diagramas de fase.

Uma característica importante dos sistemas binários eclipsantes é que quando estes são de curto período as mudanças nas suas velocidades radiais são suficientemente grandes como para que estes sejam também sistemas binários espectroscópicos o que permite-nos ter muita mas informação e uma melhor caracterização do sistema.

# Capítulo 4

# A Analise Wavelet

As wavelets são, a grosso modo, oscilações com amplitudes determinadas por funções de suporte compacto ou quase de suporte compacto (como a função de Gauss). Ao fazer uma convolução entre a wavelet e um sinal, analogamente a trasformada de fourier temos uma medida acerca de quanto da função aparece no sinal, mas neste caso, dado o suporte compacto da wavelet, temos uma medida de quanto da parte do sinal no suporte da wavelet é parecida com esta. Assim, podemos fazer análises *locais* do comportamento do sinal deslocando o suporte da wavelet para todas as regiões do sinal. É possível também fazer compressões e dilatações do suporte da wavelet para estudar fenômenos de maior ou menor escala dentro do sinal, e assim, usando estas duas possibilidades, é possível construir o mapa wavelet.

Esta ferramenta é usada para extrair informação de tipos muito diferentes de dados incluindo sinais de áudio e imagens. Comparando com os métodos de multiresolução, a transformada wavelet pode ser vista como uma *média* das diferenças que há entre as diferentes resoluções [Hubbard(1997), Parte II, Cap 7]. Diferentes grupos de wavelets são às vezes necessários para fazer uma análise completa dos dados. Um conjunto especial de wavelets pode *decompor* o sinal sem perda considerável de informação de maneira tal que o sinal pode-se *recompor* a partir dos coeficientes wavelet.

Tecnicamente, uma wavelet é uma função usada para dividir uma outra função (ou um sinal contínuo) em diferentes componentes de escala. A transformada wavelet é a representação de uma função por wavelets onde a *wavelet mãe* é escalada e deslocada formando o mapa wavelet. A transformada wavelet tem vantagens sobre as transformadas baseadas na transformada de Fourier na hora de representar funções que tem descontinuidades e comportamentos diferentes em diferentes partes do sinal e na recomposição de sinais não periódicos e não estacionários.

As transformadas wavelet estão divididas em dois grupos, transformada wavelet discreta (DWT) e transformada wavelet contínua (CWT). A diferença é que as CWTs operam sobre todas as possíveis escalas e deslocamentos enquanto as DWTs usam um conjunto específico de escala e deslocamentos o que é chamado de *representação de* grade em escala.

Já que no presente trabalho a obtenção dos períodos orbitais dos sistemas binários é feita através da CWT na secção seguinte será feita uma descrição mais detalhada deste tipo de transformada.

### 4.1 A Transformada Wavelet Continua (CWT)

A transformada wavelet contínua é um operador linear que associa à um sinal de energia finita e uma função particular chamada wavelet mãe (que será definida mais adiante), que é escolhida dependendo do tipo de informação que se quer obter do sinal a estudar, com um número real ou complexo, uma vez escolhido o instante e a escala de observação. É possível assim analisar estruturas do sinal que dependem do tempo e da escala, sendo uma ferramenta útil na detecção, caracterização e classificação de sinais com falta de estacionariedade no sinal.

A wavelet mãe  $\Psi(t)$  é a função que gera as funções wavelet filhas  $\Psi_{a,b}(t)$  com as quais o sinal vai ser comparado. Para gerar as  $\Psi_{a,b}(t)$  se realizam na wavelet mãe operações de translação no tempo e de dilatação o que define os parâmetros  $a \in b$  da seguinte forma

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \quad \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \tag{4.1}$$

Seja f(t) uma função do espaço  $L^2(\Re) \in \Psi(t)$  uma wavelet mãe, o coeficiente  $CWT_{a,b}$ 

da transformada wavelet do sinal é o produto escalar de f com a wavelet filha com parâmetros (a, b)

$$CWT_f(a,b;\Psi) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$
(4.2)

A transformada wavelet pode ser formulada no espaço das frequências onde os coeficientes são descritos por (ver apêndice A)

$$CWT_f(a,b;\Psi) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}^{i\nu b} \hat{f}(\nu) \,\hat{\Psi}^*(a\nu) \,\mathrm{d}\nu. \tag{4.3}$$

Esta representação facilita a determinação numérica da transformada wavelet usando boas representações da transformada do sinal f e da wavelet mãe  $\Psi$ .

#### 4.2 Seleção da Wavelet Mãe

A wavelet mãe deve satisfazer uma série de requisitos para que a sua utilização na transformada permita que exista resolução suficiente e capacidade de recuperação do sinal que são as ferramentas para a análise e o processamento de sinais. Por exemplo, para ver fenômenos locais no sinal, a wavelet mãe deve ter suporte compacto, ou pelo menos um decaimento rápido para  $|t| \rightarrow \infty$ .

O parâmetro a nas wavelet filhas é um parâmetro de escala, mas está diretamente relacionado com a periodicidade a estudar e consequentemente com a frequência; é por isto que a condição do suporte compacto é também requerida no espaço de frequências, ou seja, que a transformada de Fourier da wavelet mãe seja uma função de suporte compacto no espaço de frequências ou, como no espaço temporal, que tenha um decaimento rápido na magnitude da transformada quando a frequência cresce indefinidamente. O princípio de incerteza de Heinsenberg faz com que quando o suporte de uma função decresce no espaço temporal, no espaço de frequências fique maior<sup>1</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>O princípio da incerteza na realidade tem as suas bases além da relação posição-momentum da mecânica quântica, elas são consequencia da análise de Fourier. Qualquer método para decodificar informação que utiliza análise em tempo e frequência tem a limitação onde maior certeza no tempo implica maior incerteza na frequência e vice versa.
Além do suporte compacto tanto em tempo quanto em frequência, a wavelet mãe deve satisfazer a condição de admissibilidade

$$C_{\Psi} = \int_{0}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\nu)|^{2}}{|\nu|} \, \mathrm{d}\nu < \infty.$$
(4.4)

Esta condição é indispensável para reconstruir o sinal a partir dos coeficientes wavelet usando

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT_f(a, b, \Psi) \Psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} \, \mathrm{d}a \, \mathrm{d}b \tag{4.5}$$

Dado que  $\Psi_{a,b} \in L^1(\Re)$  e também ao  $L^2(\Re)$ , temos que a transformada de Fourier da wavelet mãe é contínua. Então, da condição de admissibilidade, é deduzida a condição

$$0 = \hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) \, \mathrm{d}t, \qquad (4.6)$$

o que significa que as áreas positivas e negativas são iguais, e pelo fato de serem de decaimento rápido elas devem fazer oscilações para igualar as áreas, ou seja, elas são "ondinhas": wavelets.

Entretanto, as wavelets filhas não precisam ser um conjunto ortogonal de  $L^2(\Re)$ para representar todas a funções em  $L^2(\Re)$  mas sim um conjunto completo. Assim no casos das wavelet mãe (contínuas) mais usadas a informação contida nos mapas wavelet é redundante, ou seja, a mesma informação acerca de uma característica no sinal está contida em diferentes coeficientes. Há métodos para reduzir a transformada em suas componentes base; outros métodos avaliam os coeficientes máximos, estes são conhecidos como wavelet máxima.

Outra propriedade importante das wavelet mãe é a propriedade de afinidade. Transformando o sinal f em um sinal g por

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} f\left(\frac{t-t_0}{a_0}\right) \tag{4.7}$$

a transformada wavelet contínua de gesta relacionada com a transformada wavelet de fassim

$$CWT_g(a,b;\Psi) = CWT_f\left(\frac{a}{a_0}, \frac{b-t_0}{a_0};\Psi\right).$$
(4.8)

Esta propriedade faz com que a transformada wavelet seja útil no reconhecimento de formas o que pode dar uma nova aproximação á determinação de parâmetros do sistema a partir da curva de luz.

## 4.3 Exemplos de Wavelet Mãe

Devido a existência de muitas funções que satisfazem os requerimentos para serem wavelet mãe, a escolha limita-se a informação que se deseja ressaltar no sinal. Para procurar descontinuidades, por exemplo, se deve usar alguma wavelet que tenha como principal característica uma inclinação forte (como a gaussiana de ordem 1). A seguir se descreverão algumas das wavelet contínuas<sup>2</sup> mais usadas.

## 4.3.1 Wavelet Gaussiana



Figura 4.1: Wavelet mãe Gaussiana de ordem 2 (Esquerda) e a sua transformada de Fourier (Direita), note-se que no espaço de frequências a informação esta repetida (a função é par) o que faz com que esta não seja uma wavelet progressiva (ler embaixo). Os eixos não são nomeados já que os nomes das variáveis dependem do sinal a ser estudado.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>o termo *contínuo*, neste contexto, não faz referência a continuidade da wavelet mãe, mas sim ao fato dela ser usada para realizar a transformada wavelet contínua (CWT), para realizar a transformada wavelet discreta (DWT) as wavelet mãe podem ser funções contínuas ou discontínuas. Para mais informação acerca da DWT, ver [Hubbard(1997)].

Esta família de wavelet mãe é construída a partir das derivadas da função de Gauss  $(\exp [-x^2]),$ 

$$\Psi_m(x) = \frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma(m+\frac{1}{2})}} \frac{\mathrm{d}^m}{\mathrm{d}x^m} \left( \mathbf{e}^{-\frac{x^2}{2}} \right).$$
(4.9)

O parâmetro m determina principalmente a ordem da derivada da exponencial. O decaimento desta função é proporcional à raiz da função  $\Gamma$ . A wavelet com m = 2 é conhecida como a wavelet Marr ou wavelet do chapéu mexicano.

A transformada wavelet não faz requerimentos acerca de trabalhar só no espaço real, então é possível procurar wavelets mãe com argumentos complexos. A representação no espaço de fourier das wavelet gaussianas são funções de paridade definida o que significa que mesmo considerando só as escalas positivas a quantidade de informação é desnecessariamente duplicada, motivo pelo qual é mais conveniente usar as wavelets progressivas cujas transformadas de fourier tem o seu suporte incluso nos reais positivos.

### 4.3.2 Wavelet Morlet



Figura 4.2: Wavelet mãe Morlet de ordem 5 (Esquerda) e a sua transformada de Fourier (Direita), a linha contínua representa a parte real da função e a linha pontilhada, a parte imaginária. Os eixos não são nomeados já que os nomes das variáveis dependem do sinal a ser estudado.

Esta é a wavelet progressiva de uso mais corrente e ela é a função harmônica complexa coberta por uma gaussiana,

$$\Psi_m(x) = \pi^{-1/4} \ \mathbf{e}^{-x^2/2} \ \mathbf{e}^{imx} \tag{4.10}$$

Em que o parâmetro m é o número de onda da função harmônica, ou seja, ele determina quantas oscilações há "dentro" da gaussiana. O decaimento exponencial de segundo grau da gaussiana dá uma resolução espacial muito boa, e a transformada de Fourier desta função é uma gaussiana com muito boa resolução em frequências (melhor resolução do que as wavelets gaussianas).

### 4.3.3 Wavelet Paul



Figura 4.3: Wavelet mãe Paul de ordem 1 (Esquerda) e a sua transformada de Fourier (Direita), a linha contínua representa a parte real da função e a linha pontilhada, a parte imaginária. Os eixos não são nomeados porque os nomes das variáveis dependem do sinal a ser estudado. Em nosso caso, o eixo horizontal seria o tempo t e o eixo vertical a intensidade relativa dI/I.

A wavelet mãe Paul é representada analiticamente como

$$\Psi_k(x) = \frac{i^k 2^k k!}{\sqrt{\pi(2\pi)!}} (1 - ix)^{-(k+1)}$$
(4.11)

em que k representa a ordem da função de Paul. A wavelet mãe Paul de ordem 1, usada neste trabalho, esta representada na Fig. 4.3. Esta é também uma wavelet progressiva e decai mais rapidamente que a wavelet Morlet, o que permite uma melhor resolução temporal devido ao seu rápido decaimento, mas, no espaço de Fourier a representação da transformada de Paul não é um pico simétrico, ela tem uma cauda para as altas frequências.

## 4.4 O Mapa Wavelet

Para um dado sinal f a transformada wavelet pode ser escrita como

$$(a,b) \rightarrow |CWT_f(a,b;\Psi)|^2$$

$$(4.12)$$

Que são os valores com os quais é construído o mapa wavelet e pode se interpretar como a distribuição de energia do sinal no espaço tempo-escala. Realizando una transformação conveniente entre escala e período (que é sempre uma relação linear), é possível fazer um mapa tempo-frequência do sinal, o que permite fazer uma melhor comparação com os resultados dados pelo análise de Fourier<sup>3</sup>[Torrence & Compo(1998)].

Os mapas podem ser representados como superfícies no espaço 3D ou como mapas de cores (como é o caso deste trabalho) onde um dos eixos (usualmente o eixo y) representa a escala e o outro (x) representa o tempo, e as cores (ou o eixo z no caso das superfícies 3D) representam a energia do coeficiente  $CWT_f(s,t;\Psi)$  centrado no tempo t e a escala s.

Na fig. 4.4 é possível observar acima, uma sinal artificial onde durante o seu primeiro quarto há um sinusoide, no segundo quarto um sinal como de trânsito, no terceiro uma sinal constante e no último quarto sinal de ruído branco. Embaixo estão três mapas wavelet feitos com as wavelet mãe descritas anteriormente; nesta figura é observada as características de cada wavelet mãe e as mudanças que gera nos mapas, por exemplo a boa resolução em frequências de Morlet e a boa resolução temporal de Paul, e as diferenças entre trânsito e descontinuidade feita pela wavelet mãe Gaussiana.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>estas comparações só podem ser feitas estudando aspectos gerais para cada escala (ou frequência, que são duas formas diferentes de falar do mesmo objeto) dentro do sinal e não de fenômenos locais dentro do mesmo



Figura 4.4: Acima. Sinal artificial mostrando quatro variações diferentes: oscilação (desde 0 a 35 no tempo), variação tipo delta (35 a 70), sinal uniforme (70 a 105) e ruído branco (105 a 140). Meio Três mapas wavelet da sinal feitos com a wavelet Gaussiana, Morlet e Paul respectivamente. Abaixo Relação entre as cores e a intensidade relativa dos coeficientes  $CWT_{LC}(s, t; \Psi)$ ; esta convenção de cores será usada em todos os mapas wavelet deste trabalho.

## Capítulo 5

## **Os Dados Observacionais**

Os dados analisados são curvas de luz obtidas pelo satélite CoRoT (Convection Rotation and Transits). Este é uma missão espacial liderada pela agência espacial francesa (CNES), junto com a agência espacial européia (ESA), e a participação da Áustria, Bélgica, Brasil, Alemanha e Espanha.

## 5.1 A Missão CoRoT

CoRoT foi desenvolvido como um mini-satélite, ou seja, uma missão de tamanho intermediário e baixo custo. A massa total do satélite é de 600Kg, e o custo foi de 80 milhões de euros.

A proposta do CoRoT se deve a que dados fotométricos provenientes de telescópios em terra tem um limite de precisão muito baixo, por exemplo, a partir de telescópios terrestres é quase impossível ter uma boa cobertura temporal durante alguns meses com menos do 10% de interrupções; e devido aos resuldados obtidos pela misão MOST<sup>1</sup>, os objetivos iniciais da misão CoRoT (sismologia estelar) forem extendidos a trânsitos planetários.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://www.astro.ubc.ca/MOST/index.html

### 5.1.1 Objetivos Científicos da Missão

A missão tem dois programas científicos, os dois precisam de observações fotométricas contínuas com uma precisão muito alta. As estrelas estudadas estão perto do centro ou do anti-centro da via láctea.

### Sismologia Estelar

A heliosismologia é a ferramenta usada para testar os modelos feitos sobre o interior do nosso Sol, determinando muitos parâmetros da física solar com uma precisão maior do que 0.1% ate o núcleo, e propor novas visões das dúvidas que ainda temos acerca dele (como o problema dos neutrinos) [A. Baglin(2006)]. Assim, a observação de outras estrelas (com precisão e escalas de tempo superiores às máximas possíveis desde terra), é necessária para estudar diferentes configurações e estruturas e desse modo ter bases observacionais para os modelos de estrutura interna e de evolução estelar. E mesmo que o CoRoT (e nenhum outro telescópio construído até hoje) não consiga realizar uma cartografia dos modelos oscilantes das outras estrelas alem do sol, as curvas de luz obtidas pelo satélite oferece informação acerca dos modos radiais com os quais é possível determinar o raio do núcleo, dimensões das camadas convectivas externas, etc.

#### Planetas Extrasolares

O programa de procura de planetas tem o objetivo de detectar a presença de planetas extrasolares quando eles transitam na frente da sua estrela (visto desde a terra). Adaptando o tempo de integração e as condições focais no satélite (estabelecendo o canal de exoplanetas), e possível observar mudanças de fluxo de até  $7X10^{-4}$  em estrelas com magnitudes entre 12 e 15.5 sendo isto compatível com as mudanças possíveis de luminosidade de uma estrela quando um planeta de dois raios terrestres passa na frente desta; Assim, CoRoT está programado para detectar os primeiros planetas extrasolares de tamanho terrestre.

Para considerar a queda em fluxo como um possível trânsito planetário, as fases

devem ser válidas por pelo menos três trânsitos periódicos (isto aplica-se também aos sistemas binários eclipsantes). Assim, os planetas detectados pelo CoRoT devem ter um período menor de 60 dias. Para fazer esta distinção o canal de exoplanetas coleta dados em três cores o que contribui para diferenciar entre trânsitos (que são eventos acromáticos) e atividade estelar (particularmente eventos devido a variações na temperatura da estrela nas quais há fortes mudanças de cores). Estudos mostram que a informação discriminada pelas cores melhora a detecção de trânsitos em estrelas mais ativas do que o Sol o que permite um incremento das possibilidades de achar planetas por meio do método dos trânsitos.

#### **Os Programas Adicionais**

Os programas adicionais foram feitos para o estudo de áreas específicas nas curvas de luz que mostrarem características diferentes daquelas estudadas no programa principal, tais como atividade estelar (magnetismo superficial), **sistemas binários**, estrelas pulsantes fora da faixa de estabilidade, a procura de objetos tipo cinto de Kuiper, etc.

#### Rotação Estelar

Com o avanço tecnológico e o conhecimento atual dos processos que acontecem nas estrelas e de como eles determinam a sua evolução os modelos atuais já tem a robustez para considerar a rotação neles, dado que todas as estrelas rotam. Os resultados destes modelos devem ser comparados com as observações e uma delas é a rotação superficial o que permite estudar a rotação em geral e outros parâmetros estelares. A determinação do período superficial é obtida pelo CoRoT através da variabilidade pseudo-periódica no brilho que causa a presença de manchas na superfície da estrela. E usando modelos de manchas a diferentes latitudes é possível inclusive realizar estudos de rotação diferencial (Ver por exemplo Lanza et. al. [Lanza(2009)]).

| Tipo Espectral | Número Esperado de EB |
|----------------|-----------------------|
| G0-G4          | 7.2 - 31.1            |
| G5-G9          | 3.2 - 10.5            |
| K0-K4          | 2.9 - 11.9            |
| K5-K9          | 0.35 - 0.8            |
| M0-M5          | 0.09 - 0.17           |

Tabela 5.1: Número de estrelas binárias que, se espera, sejam encontrados pelo CoRoT nos 3.4 graus quadrados do campo exo-planet. Tabela tomada de Maceroni & Ribas ([Maceroni & Ribas(2006)]).

#### O Sub programa de Bináridade

A precisão dos dados fornecidos pelo CoRoT, em conjunto com os obtidos através dos follow-up espectroscópicos permitirão ter informação acerca da configuração do sistema que oferecerá valiosa informação relativa a evolução de marés em sistemas binários próximos. Ao coletar dados durante longos períodos de tempo permitirá o estudo da atividade estelar tais como manchas, flares e ciclos associados a estes, o que proporcionará informação sobre o período rotacional e estudos de rotação diferencial em componentes de tipo tardio nas componentes do sistema [Maceroni & Ribas(2006)].

A sismologia estelar de sistemas binários próximos, apesar de adicionar complexidade, pode fornecer a vantagem de conhecer as massas, raio e o ângulo de inclinação no casos dos sistemas eclipsantes medidos pelo CoRoT o que finalmente permite conhecer a velocidade rotacional das estrelas do sistema.

Outros experimentos anteriores ao CoRoT mostram que ao redor do 0.5-1% das estrelas observadas são sistemas binários eclipsantes, os sistemas com componentes com massas muito grandes ou muito pequenas serão muito úteis para testar os modelos teóricos.



Figura 5.1: As três partes ensambladas do CoRoT (CoRoTcase na base, CoRoTcam e CoRoTel acima).

## 5.1.2 O Satélite CoRoT

O satélite CoRoT é baseado na plataforma recorrente de órbita terrestre baixa PRO-TEUS desenvolvida pelo CNES e a Alcaltel Alenia Space. Este é operado desde o Co-RoT control center em Toluse, na França. Uma rede de estações em terra localizadas em Kiruna (Suécia), Aussaguel (França), Hartebeesthoek (Sud Africa), Kourou (Guyana Francesa), e estações exclusivas para a recepção de dados CoRoT em Alcântara (Maranhão, Brasil) e Vienna (Áustria) faz possível ter contato com o satélite 6 vezes por dia. A quantidade de dados transmitida por dia é ao redor de 1,5 Gbits nos períodos de observação. O CoRoT está composto de:

### • CoRoTel

Telescópio afocal (pupila de 270 mm) composto de dois espelhos parabólicos, uma cobertura cilíndrica para evitar as reflexões provenientes da terra e uma tampa protetora para os períodos de não observação.

### • CoRoTcam

Câmara de campo amplo com um objetivo dióptrico (6 lentes) e a unidade focal com 4 placas CCD de 2048 X 4096. Um dispositivo dispersor chamado Bi-prisma é introduzido na frente das matrizes CCD para a obtenção dos dados fotométricos em três cores do canal Exo.

#### • CoRoTcase

A base do equipamento onde esta localizada toda a eletrónica do processamento de dados (vídeo e unidades de extração e processamento) e as ferramentas de suporte (distribuição de energia, controladores finos de temperatura, unidades de manutenção, calibração e sincronização).

As plataformas PROTEUS só permitem órbitas terrestres baixas e para observar a mesma região do céu continuamente durante meses sem que esta seja ocultada do satélite pelo Sol ou pela Terra, a órbita do satélite é polar com o telescópio apontando em direção perpendicular ao seu plano orbital. Assim, são realizados dois tipos de campanhas: as campanhas longas (LR, Long Runs) de 150 dias e as campanhas curtas (SR, Short Runs) de 20 a 30 dias. Cada período de seis meses tem um LR e um ou dois SR. As regiões observadas foram escolhidas pela densidade de estrelas e pela presença de suficientes estrelas padrão no campo observado. Estas regiões são centradas em  $\delta = 0$  e  $\alpha = 6 h 50 m$  (no inverno) e  $\alpha = 18 h 50 m$  (no verão).

## 5.2 A Escolha dos Dados

### 5.2.1 O Pre-Tratamento das Curvas de Luz

Dada a quantidade de informação que contém as imagens do CoRoT, no satélite é feito um pré-tratamento antes de ser enviada a informação às estações em terra, uma imagem só é enviada para propósitos de calibração mas a fotométria é feita no satélite com máscaras predefinidas.

Os dados estudados neste trabalho são obtidos através do canal Exo do CoRoT cujo campo é caracterizado pela grande densidade de objetos com magnitude superior a 20. Só 10% dos pixels da imagem obtida pelo CCD são utéis.

A análise fotométrica feita no satélite é feita para cada CCD assim:

- Até 5000 estrelas podem ser medidas ao tempo com máscaras cromáticas;
- Até 1000 estrelas com máscaras cromáticas;
- 80 janelas de referência para calibrar o brilho 0.

As máscaras para cada estrela são escolhidas a partir de uma amostra de 256 modelos que cobrem as diferentes formas das estrelas vistas pelas CCD nos campos observados. As máscaras monocromáticas são usadas para estrelas débeis e para estrelas frias e também para referências de fundo.

A forma da mascara é função de:

- a magnitude da estrela,
- a temperatura da estrela (representada **no seu color**),
- a forma da PSF (função de espalhamento do ponto) no CCD,
- a contaminação da estrela a observar pela proximidade de outros corpos brilhantes.

256 modelos das máscaras foram escolhidos devido a que simulações feitas mostraram que este número é suficiente para permitir encaixar com qualquer configuração de estrelas a observar e a presencia de outras visualmente próximas. Foi desenvolvido um software para determinar a programação ótima para cada caso tendo em conta a máscara a utilizar para cada estrela observada o padrão da PSF (que muda devido ao comportamento do satélite), e outros critérios como máscaras diferentes cobrindo os mesmos pixels, etc.



Figura 5.2: Exemplo de falso trânsito na curva de luz da estrela CoRoT-ID 102694654. Isto é devido provavelmente a contaminação por um sistema binário de fundo, na figura de acima aparecem as componentes das curvas de luz para cada cor; a cor vermelha, verde (cujo valor de DI/I foi deslocado 0,02 para ajudar na visualização) e azul (deslocado 0,04 em DI/I); e embaixo a curva de luz composta pelas três contribuições.

Para todas as estrelas do canal Exo os dados fotométricos são tomados a cada 512 segundos mas até 500 estrelas por campanha podem ter dados tomados a cada 32 segundos no caso de suspeitas de trânsitos. As correções posteriores às curvas de luz são feitas em terra.

A partir de este estágio, as curvas de luz são coletadas da base de dados do CoRoT onde há centenas de milhares de curvas de luz. Para os estudos feitos pelo CoRoT Natal Team foi feita a inspeção visual de aproximadamente 5000 curvas de luz das quais foram achados a primeira pré-seleção dos candidatos a curvas de luz de sistemas binários eclipsantes com periodicidade *como de binária* (36 curvas de luz) e a partir dos quais foi feito um outro filtro analisando comparativamente as curvas de luz obtidas e modelos de sistemas binários eclipsantes. No caso das curvas de luz cromáticas foi feito um filtro adicional tendo em conta que tanto trânsitos como eclipses são eventos acromáticos. Por exemplo, na fig. 5.2 é possível observar claramente o suposto trânsito na curva de luz composta (embaixo) mais nas três cores individualmente (acima) verificamos que o trânsito é falso.

Finalmente foram 18 estrelas candidatas a serem sistemas binários eclipsantes. As confirmações definitivas, principalmente para os casos de sistemas binários de contato, são feitas depois de complementar os dados fotométricos com dados de Vr(t) e outros parâmetros espectroscópicos, junto com os quais é possível ter os parâmetros absolutos do sistema, informação muito valiosa para testar os modelos de evolução e estrutura estelar e para determinar distancias as quais estas se encontram.

| CoRoT ID  | Campanha         | $\alpha(^{o})$ | $\delta(^{o})$ | $M_{bol}$ | В      | V      | R      | T(K) |
|-----------|------------------|----------------|----------------|-----------|--------|--------|--------|------|
| 102884662 | IRa01            | 102.04825      | -1.00089       | 15.435    | 17.007 | 15.934 | 15.435 | 4500 |
|           | Dados Cromáticos |                |                |           |        |        |        |      |
| CoRoT ID  | Campanha         | $\alpha(^{o})$ | $\delta(^{o})$ | $M_{bol}$ | В      | V      | R      | T(K) |
| 102622874 | LRa01            | 100.49470      | -0.07746       | 12.288    | 13.012 | 12.492 | 12.288 | 6250 |
| 102638820 | LRa01            | 100.59031      | -1.51604       | 11.888    | 12.389 | 11.969 | 11.888 | 6710 |
| 102647241 | LRa01            | 100.63591      | -0.59356       | 11.867    | 12.396 | 12.007 | 11.867 | 6850 |
| 102662555 | LRa01            | 100.71695      | 1.04864        | 11.968    | 12.556 | 12.137 | 11.968 | 6710 |
| 102673160 | LRa01            | 100.77262      | -0.5778        | 12.695    | 13.586 | 12.941 | 12.695 | 5730 |
| 102709642 | LRa01            | 100.96145      | 0.67965        | 12.218    | 12.872 | 12.399 | 12.218 | 6460 |
| 102715978 | LRa01            | 100.99809      | -1.49286       | 12.924    | 13.735 | 13.130 | 12.924 | 5890 |
| 102726405 | IRa01            | 101.06131      | -1.37603       | 12.638    | 13.245 | 12.759 | 12.638 | 6410 |
| 102726405 | LRa01            | 101.06131      | -1.37603       | 12.638    | 13.245 | 12.759 | 12.638 | 6410 |
| 102738809 | LRa01            | 101.13139      | 0.83213        | 12.291    | 12.852 | 12.446 | 12.291 | 6770 |
| 102750270 | LRa01            | 101.19521      | 0.22179        | 11.600    | 12.083 | 11.733 | 11.600 | 7030 |
| 102752663 | LRa01            | 101.20823      | 0.01468        | 12.521    | 13.985 | 12.998 | 12.521 | 4680 |
| 102768286 | IRa01            | 101.29672      | -1.04903       | 12.321    | 12.900 | 12.467 | 12.321 | 6650 |
| 102768286 | LRa01            | 101.29672      | -1.04903       | 12.321    | 12.900 | 12.467 | 12.321 | 6650 |
| 102768841 | LRa01            | 101.29985      | -1.1951        | 12.054    | 12.854 | 12.268 | 12.054 | 5970 |
| 102788679 | IRa01            | 101.41069      | -0.79265       | 12.908    | 13.927 | 13.201 | 12.908 | 5420 |
| 102788679 | LRa01            | 101.41069      | -0.79265       | 12.908    | 13.927 | 13.201 | 12.908 | 5420 |
| 102808511 | IRa01            | 101.55969      | -2.37561       | 12.888    | 14.456 | 13.369 | 12.888 | 4470 |
| 102833285 | IRa01            | 101.73356      | -1.04999       | 12.863    | 13.382 | 12.974 | 12.863 | 6760 |
| 102873761 | IRa01            | 101.98276      | -1.75084       | 12.567    | 13.077 | 12.684 | 12.567 | 6830 |

Dados Monocromáticos

Tabela 5.2: Dados da amostra fornecidos pelo CoRoT

## Capítulo 6

## Resultados e Discussão

## 6.1 Obtenção do Período Orbital

Os câmbios rápidos na intensidade das curvas de luz são muito bem caracterizados pelo mapa wavelet. Já que o nosso interesse é identificar os trânsitos com precisão, o ideal é usar uma wavelet mãe com boa resolução no tempo; a wavelet Paul tem, além de uma boa resolução temporal na sua parte real, uma forma parecida aos trânsitos nos casos de sistemas binários de não contato e de semi-contato, o que nos permite uma identificação mais clara destes.

Durante a seleção das curvas de luz a determinação do tipo de binaridade do candidato é feita a partir de uma análise visual comparando com as curvas de luz sintéticas obtidas com o programa Starlight Pro, um código de uso livre que gera curvas de luz de diferentes sistemas binários eclipsantes, assumindo órbitas circulares com rotação sincronizada e tendo como parâmetros: razão de massas, inclinação, raios fracionais, temperaturas e coeficientes de obscurecimento de limbo<sup>1</sup>.

Os trânsitos nas curvas de luz nos casos de sistemas binários eclipsantes de não contato e de semi-contato são estruturas tipo delta, o que significa que no espaço de Fou-

 $<sup>^{1}</sup>$ O autor deste código é Dan Bruton, e o mesmo pode ser encontrado em http://www.midnightkite.com/binstar.html As curvas de luz e a morfologia dos sistemas na secção (3.1) forem obtidas com este programa.

rier, o delta vai ser representado por uma função espalhada em diferentes frequências, e dada a relação entre período e escala, o trânsito tem contribuição dos coeficientes a diferentes escalas; e quanto mais parecido a um delta for o trânsito, mais escalas terão coeficientes de energia considerável no tempo do trânsito.

Para a localização dos trânsitos é usado o fato descrito anteriormente, integrando sobre as baixas escalas (escalas menores que 1 dia para o caso dos trânsitos tipo delta em binárias de contato e de semi-contato, e para binárias de contato usando diferentes intervalos de escala dependendo do caso), a metade do trânsito ocorre quando há mais contribuições nas diferentes escalas. Isto se pode compreender melhor com um exemplo; olhando o sinal e o mapa wavelet da Fig. 6.1 que é feito usando como wavelet mãe a parte real da wavelet de paul. As cores representam a intensidade relativa dos coeficientes da transformada wavelet (Eq. 4.3). Temos que para o t localizado na metade dos trânsitos ( $t \approx 13$  e 28,5 dias) há mais coeficientes com intensidades relativas significativas que nas outras regiões o mapa (de fato os máximos locais ao redor deste tempo estão na metade do trânsito). Assim, integrando sobre todas as escalas para cada instante t temos como resultado a Fig. 6.2, onde os máximos estão localizados no centro dos trânsitos, o qual nos permite identificá-los temporalmente e assim determinar o período orbital do sistema.

Para a analise das curvas de luz estudadas neste trabalho é usada a parte real dos coeficientes da transformada Paul, pois é esta parte da wavelet mãe a que tem a forma de trânsito. A parte imaginaria da transformada Paul nos permite identificar as inclinações dentro do sinal e assim possivelmente caracterizar as entradas e saídas dos trânsitos. Futuros estudos mostrarão como usar esta informação para obter parâmetros como obscurecimento do limbo e outros parâmetros que afetam as entradas e saídas dos trânsitos.

O método convencional para determinar o período orbital de sistemas binários de não contato e de semi-contato é o método de *ajuste de caixa* (box fiting), onde uma função caixa centrada em t e largura a (com valor -1 em  $[t - \frac{a}{2}, t + \frac{a}{2}]$  e 0 no resto) tenta-se ajustar á sinal para diferentes valores de a em diferentes tempos. Para que o



Figura 6.1: Curva de luz (LC) da estrela CoRoT ID 102629540 (acima) e mapa wavelet usando como wavelet mãe a componente real da wavelet de Paul (abaixo).

box fitting possa achar os trânsitos, a curva de luz deve não ter outras contribuições importantes, pois se a profundidade dos picos muda o box fitting pode não identificar o trânsito.

Nos casos de sistemas binários de contato, as curvas de luz não têm trânsitos tipo caixa razão pela qual o método não é efetivo na busca de períodos orbitais nestes sistemas, os métodos baseados no analise de Fourier ou os métodos estatísticos são os que comumente são usados na determinação dos períodos para estes sistemas. Neste estudo, é realizada uma comparação entre o método Wavelet e os métodos convencionais para a obtenção destes períodos, finalmente o melhor candidato para a obtenção dos períodos orbitais de sistemas de contato foi o método ANOVA (ANalysis Of VAriance), o qual oferece os melhores resultados em termos de dispersão de pontos no diagrama de fase.

Ao identificar os trânsitos procuramos o período diferenciando os trânsitos primários dos secundários e determinando o intervalo de tempo entre dois trânsitos primários consecutivos e assim obter o período orbital do sistema. Assim o fator determinante



Figura 6.2: Integral sobre as escalas dos coeficientes do mapa wavelet Paul (Fig. 6.1, abaixo). Os máximos desta estão centrados na metade dos trânsitos.

na obtenção dos períodos é o centro do trânsito é a presencia de outros elementos na curva de luz não deve ser eliminada do sistema para determinar o período orbital o que permite um estudo comparativo dos diferentes elementos que aparecem na curva de luz.

## 6.2 Preparação dos Dados Observacionais

Usando o código escrito em IDL *coroect* desarrolhado por Leão [Leão(2004)] com o objetivo de preparar as curvas de luz para o seu posterior análise, aos dados originais forem tiradas as tendências lineares, as descontinuidades e no caso das LC com  $T_{exp} = 32s$  reduzido o número de pontos. Dada a variedade na morfologia das curvas de luz obtidas pelo CoRoT, A classificação destas foi feita a partir de uma seleção dos candidatos a binárias em um grupo do ao redor de 3500 curvas de luz.

Apos de achar as épocas dos trânsitos com o método descrito anteriormente o período de cada sistema e o seu diagrama de fase são obtidos, com o qual é possível classificar o sistema em sistema binário próximo de não contato, semi-contato ou contato dependendo da forma do diagrama de fase, esta é também a última etapa da filtragem (pois não só a uniformidade na periodicidade do sinal é importante mais também a morfologia do diagrama de fase deve satisfazer características como, por exemplo, que os mínimos -trânsitos- devem durar menos do que os máximos). Para determinar a que tipo de sistema a curva de luz pode ser associada são feitas comparações com os de curva de luz sintéticas obtidas a partir da modelização de sistemas binários eclipsantes com o programa StarlightPro (descrito anteriormente), e com curvas de luz achadas na literatura  $^2$ .

Como a classificação dos sistemas binários eclipsantes foi baseada na morfologia da curva de luz (ver secção 3.1). Especialmente nos casos de sistemas binários de contato de período curto (como por exemplo, as estrelas CoRoT 102788679 e CoRoT 102808511) é importante confirmar a binaridade com dados espectroscópicos pois é possível que as mudanças no brilho da estrela estejam relacionadas com uma estrela simples com oscilações ou pulsações muito uniformes. Devido á falta de mais informação (dados espectroscópicos, por exemplo) não é possível determinar os parâmetros físicos, pois acontece que valores muito diferentes destes parâmetros têm a mesma curva de luz como solução quando as medidas do fluxo são feitas em fluxo relativo (ver sec. 2), pois os sistemas binários sofrem de invariância em mudanças de escala; por exemplo, dada curva de luz de um sistema binário eclipsante ao multiplicar as massas de cada componente por uma constante, o diagrama de fase de uma curva de luz do fluxo relativo não muda, isto acontece também com mudanças de proporção das distancias, raios, e outros parâmetros.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ver por exemplo a página em internet da Associação Americana de Observadores de Estrelas variáveis http://www.aavso.org/



## 6.3 Resultados: Os Períodos Orbitais

Figura 6.3: Diagrama cor-magnitude das estrelas da amostra descriminando pelo tipo de sistema (contato, semi contato e não contato).

Os períodos obtidos estão descritos na tabela (6.1) e os diagramas de fase de cada um destes sistemas está na tabela (B.1) do apêndice B. O diagrama cor magnitude das estrelas da amostra descriminando se o sistema é de contato, semi contato ou não contato esta na fig (6.3).

O índice de cor (B - V) é comparado com o Período orbital nas estrelas estudadas neste trabalho e o resultado é mostrado na fig. (6.4). Não é possível realizar um estudo estatístico confiável com um número tão pequeno de dados, mais na fig. (6.4) e possível observar que sistemas com períodos *curtos* (< 1 dia) são sistemas de contato e sistemas com períodos *longos* (10 > dias) são de não contato o qual concorda com o exposto em [Guinan & Engle(2006)].

A fig. (6.5) mostra a distribuição dos diferentes tipos de sistemas binários nos períodos obtidos. No intervalo de 0 a 10 dias aparecem os três tipos de sistemas distribuídos sem tendência aparente, mas o que deveria acontecer é uma redução do

| CoRoT ID  | Período WV (d) | Período OM (d) | Tipo de Sistema |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|
| 102622874 | 4.15(3)        | 4.158(1) A     | С               |
| 102638820 | 6.32(1)        | 6.328(1) A     | С               |
| 102647241 | 39.78(1)       | 40(1) E        | NC              |
| 102662555 | 2.11(2)        | 2.115(3) A     | С               |
| 102673160 | 28.918(4)      | 28.9(4) E      | NC              |
| 102709642 | 14.307(5)      | 14.30(4) E     | NC              |
| 102715978 | 2.977(3)       | $2.977(2) \to$ | NC              |
| 102726405 | 2.542(2)       | $2.54(1) \to $ | $\mathbf{SC}$   |
| 102738809 | 2.035(2)       | 2.035(1) E     | $\mathbf{SC}$   |
| 102750270 | 0.8967(2)      | 0.8969(4) A    | С               |
| 102752663 | 1.43(1)        | 1.428(1) E     | NC              |
| 102768286 | 2.467(5)       | 2.467(1) A     | С               |
| 102768841 | 54.14(5)       | 54.18 E        | NC              |
| 102788679 | 0.2439(5)      | 0.24395(5) A   | С               |
| 102808511 | 0.2397(3)      | 0.23968(2) A   | С               |
| 102833285 | 2.051(5)       | 2.051(2) A     | С               |
| 102873761 | 2.91(2)        | 2.920(7) A     | С               |
| 102884662 | 3.849(5)       | 3.85(3) E      | SC              |

Tabela 6.1: Lista das estrelas com períodos obtidos com o método wavelet (Período WV) e com outros métodos (Período OM). os outros métodos são EEBLS(E), para sistemas binários de não contato (NC) e de semi contato(SC), ou ANOVA (A), Para sistemas binários de contato(C); conforme é explicado mais adiante.



Figura 6.4: Diagrama de B-V vs período orbital descriminando pelo tipo de sistema (contato, semi contato e não contato).

número de sistemas binários de contato com o aumento do período orbital e um aumento do número de sistemas binários de não contato com o período orbital. Isto na ausência do bias do ângulo de inclinação, pois quanto mais cheios estiverem os lóbulos de Roche das estrelas do sistema, mais os ângulos de inclinação i nos quais é possível observar os trânsitos ou ocultações (mesmo parciais) são menores, portanto, a probabilidade de achar sistemas binários eclipsantes de contato é maior do que a probabilidade de achar sistemas binários eclipsantes de semi-contato e esta, por sua vez, é maior do que a probabilidade de achar sistemas binários eclipsantes de não contato considerando somente o ângulo de inclinação i, sem ter em conta as populações relativas, ou outros fatores. O CoRoT fornecerá muitos mais sistemas binários eclipsantes, mas é necessário realizar a automatização da seleção das curvas de luz destes sistemas.



Figura 6.5: Diagramas do período orbital vs Temperatura (esquerda) e B-V (direita) descriminando pelo tipo de sistema (contato, semi contato e não contato).

## 6.3.1 comparação com outros métodos

Na determinação dos períodos orbitais dos sistemas eclipsantes (trânsitos planetários ou binárias eclipsantes) foi também determinado o período orbital da amostra com dois diferentes métodos: EEBLS e ANOVA. O método EEBLS (Edge Enhanced Box-fitting Least Squares) pertence à família dos algoritmos de ajuste de caixa que tem tido muito sucesso na busca de trânsitos periódicos de exoplanetas. O método EEBLS considera também efeitos de borda para determinar a possibilidade de ter um trânsito (ou um eclipse) periódico na curva de luz. O método é pouco efetivo para achar períodos de candidatos a sistemas binários de contato (devido à ausência de trânsitos tipo caixa na curva de luz), razão pela qual foi usado o método ANOVA (ANalisys Of VAriance) nestes casos. A implementação destes métodos foi feita usando o programa PERANSO<sup>3</sup> (PERiod ANalysis SOftware) o qual tem uma grande variedade de métodos para o

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Este software foi desenvolvido por Tonny Vanmunster (CBA Belgium Observatory). No website http://www.peranso.com/ há documentação e links para baixar a versão de prova do software.

estudo de periodicidade em sinais (todos testados para o propósito deste estudo).



### EEBLS

Figura 6.6: Detalhes dos diagramas de fase da estrela CoRoT ID 102768841 obtidos com o método EEBLS e o método Wavelet.

Ao comparar os diagramas de fase dos períodos achados com este método temos que os valores encontrados com a análise wavelet determinam melhor o período do sistema, mesmo nos casos da curva de luz ter elementos diferentes aos trânsitos (pulsação, spots, etc.).

O caso com maior diferença entre o período achado pelo método EEBLS e o método wavelet é da estrela CoRoT ID 102768841, cujos diagramas de fase e detalhes destes nos trânsitos são mostrados na fig. (6.6). Para o caso de EEBLS o período com o qual é feito o diagrama de fase é 54,184406 dias e o período determinado pelo método wavelet para fazer o diagrama de fase foi de 54,140774 dias. O período obtido pelo método EEBLS foi determinado usando uma resolução de 5000 pontos no intervalo de 1/56 a 1/52 na região de frequências  $1/dias^4$ , o que significa que ao redor do valor

 $<sup>^4</sup>$ Isto é feito desta maneira devido ao software através do qual foi usado o método EEBLS, PE-RANSO descrito na seção 6.3.1.



54,18 o intervalo de tempo entre um ponto de avaliação e outro é de  $8 \times 10^{-4}$  dias. Na figura (6.6) é notável a melhora na determinação do período com o método wavelet.

Figura 6.7: Detalles dos diagramas de fase da estrela CoRoT ID 102715978 obtidos com o método EEBLS e o método Wavelet.

O caso com menor diferença entre o período achado pelo método EEBLS e wavelet é da estrela CoRoT ID 102715978; os diagramas de fase e com detalhe nos trânsitos estão na fig. (6.7). Os períodos determinados para construir os diagramas de fase pelos métodos EEBLS e Wavelet são 2,977140 e 2,977259 dias, respectivamente. Neste caso é possível também observar que há menor dispersão dos dados no ajuste feito pelo método wavelet, principalmente no primeiro trânsito onde a profundidade é maior. O período escolhido para realizar o diagrama de fase é fundamental, pois, nos casos nos quais muitos trânsitos vão ser superpostos (como neste caso) a duração e/ou a forma do trânsito pode ter ligeiras variações o que leva a erros na determinação de parâmetros, como o coeficiente de obscurecimento do limbo e a duração do trânsito, que esta relacionado com raios relativos e nos casos de sistemas com órbitas não circulares está relacionado com a longitude do periastro.

#### ANOVA

Neste caso os resultados são comparáveis aos obtidos com o método descrito neste trabalho. Os erros, usualmente, são maiores com o método Wavelet, mas os diagramas de fase feitos com o método Wavelet mostram uma menor dispersão na maioria dos casos.

O caso da estrela CoRoT ID 102808511 mostra novamente como o método Wavelet gera menor dispersão no diagrama de fase, os períodos determinados pelos métodos ANOVA e Wavelet para construir os diagramas de fases (fig. 6.8) são 0,239683 e 0,239689 dias, respectivamente. Para esta estrela os dados forem tomados a cada 32 segundos (Alarm mode) e durante o tratamento não foi feita a diminuição de pontos, devido à brevidade do período. Assim foi possível determinar melhor o período com o método Wavelet do que com o método ANOVA. A estrela da amostra com o período



Figura 6.8: Detalhes dos diagramas de fase da estrela CoRoT ID 102808511 obtidos com o método ANOVA e o método Wavelet.

mais próximo é a CoRoT ID 102788679 cujos diagramas de fase detalhados nos trânsitos são mostrados na fig. 6.9. Os períodos usados para construir os diagramas de fase forem 0,243940 (ANOVA) e 0,243949 (Wavelet) dias. As duas curvas de luz têm formas muito similares, a diferença principal é que neste caso os dados forem tomados a cada 512 segundos (Normal mode). Assim, por cada ciclo, há 40 dados aproximadamente, e no caso anterior (CoRoT ID 102808511) há 648 dados por ciclo. Por isso, a determinação do período para construir o diagrama de fase pelo método Wavelet não é tão boa quanto pelo método ANOVA para este caso. Vale a pena então observar o que acontece com a estrela seguinte com período mais curto na amostra: CoRoT ID 102750270.



Figura 6.9: Detalhes dos diagramas de fase da estrela CoRoT ID 102788679 obtidos com o método ANOVA e o método Wavelet.

Os períodos com os quais forem feitos os diagramas de fase da fig. (6.10) para CoRoT ID 102750270 são 0,896861 dias usando o método ANOVA e 0,896700 dias usando o método Wavelet. A curva de luz estudada para esta estrela foi feita no modo normal (normal mode), ou seja, os dados forem tomados a cada 512 segundos assim cada ciclo tem ao redor de 150 dados. É possível observar como o período escolhido pelo método Wavelet gera diagramas com menor dispersão dos pontos que com o método ANOVA.

Os resultados obtidos com estes métodos e com o método wavelet são comparados na tabela (6.1). Ela mostra na primeira coluna o ID da estrela designado pelo CoRoT, na segunda o período achado com o método descrito neste trabalho, e na terceira coluna o período achado com um dos outros métodos dependendo do tipo de sistema



Figura 6.10: Detalhes dos diagramas de fase da estrela CoRoT ID 102750270 obtidos com o método ANOVA e o método Wavelet.

(de contato -ANOVA-, semi contato ou de contato -EEBLS-).

Os diagramas de fase das curvas de luz estão na tabela B.1. Os exemplos mostram as diferenças nos diagramas de fase encontrados através dos métodos WV e OM, em que é possível ver como o período determinado com os métodos EEBLS e ANOVA dá um valor do período tal que a dispersão dos dados no diagrama fase é maior do que com o método Wavelet.

## 6.4 Análise de diagrama de fase: Uma aplicação para CoRoT ID 102709642

O ajuste das curvas de luz é uma tarefa necessária mais a curva de luz sozinha não oferece toda a informação que é possível extrair destes sistemas. Por exemplo o ajuste feito ao diagrama de fase da curva de luz da estrela CoRoT ID 102709642 com o programa Phoebe (PHysics Of Eclipsing BinariEs-[Prša & Zwitter(2005)]), que realiza ajustes baseados no Código WD [Wilson & Devinney(1971)], permite determinar os parâmetros dados na tábela 6.2.

Curvas de luz junto com curvas de velocidade radial e dados espectroscópicos de sistemas binários eclipsantes, oferecem informação suficientes para determinar com precisão parâmetros absolutos das estrelas componentes do sistema o que permite usar-las para testar modelos no só de evolução e estrutura estelar mais também modelos cosmológicos, pois as distancias as quais estes sistemas se encontram é um dos resultados da analise destes.

| Parâmetro     | Valor                     | Parâmetro     | Valor                   |
|---------------|---------------------------|---------------|-------------------------|
| i             | $85.785407 \pm 0.001025$  | $q = m_2/m_1$ | $0.858266 \pm 0.000272$ |
| $r_1/a$       | $0.0489449 \pm 0.0000194$ | $T_{1}/T_{2}$ | $1.250743 \pm 0.000342$ |
| $r_2/a$       | $0.0424756 \pm 0.0000153$ | e             | $0.011247 \pm 0.000099$ |
| $r_{1}/r_{2}$ | $1.1523062 \pm 0.000619$  | $lon_{per}$   | $294.4755 \pm 0.2133$   |

Tabela 6.2: Parâmetros do ajuste feito com Phoebe á curva de luz da estrela CoRoT ID 102709642. Os parâmetros são: inclinação (i) em graus, raio polar da estrela primaria relativo ao semi eixo maior  $(r_1/a)$ , raio polar da estrela secundária relativo ao semi eixo maior  $(r_2/a)$ , razão de raios  $(r_1/r_2)$ , razão de massas (q-secundária sobre a primaria), razão de temperatura  $(T_1/T_2)$ , excentricidade da órbita (e) e longitude do periastro  $(lon_{per})$ .



Figura 6.11: Curva de luz da estrela CoRoT ID 102709642 (pontos cinza) e ajuste feito com Phoebe (linha preta, resultado do ajuste na tábela 6.2). O período orbital deste sistema é  $P_{orb} = 14.307(5)$  dias. As figuras de embaixo são detalhes nos trânsitos.

## Capítulo 7

## Conclusões e Perspectivas

A análise wavelet tem sido usada na astronomia com sucesso e no estudo das estrelas variáveis é usada para caracterizar o tipo de variabilidade nestas estrelas ([Szatmary *et al.*(1994)Szatmary, Vinko, & Gal]). Usando este método é possível obter períodos orbitais de sistemas binários eclipsantes para os casos de não contato e de semi contato de maior precisão do que com os métodos convencionais (EEBLS). Para o caso dos sistemas de contato, os resultados mostram uma dispersão menor nos diagramas de fase obtidos com o método Wavelet mesmo que os trânsitos das curvas de luz não sejam tipo delta os máximos locais no mapa wavelet (com wavelet mãe a parte real da função Paul. sec. 4.3.3) estão localizados na metade dos trânsitos o que permite também usá-lo para determinar o  $P_{orb}$  nestes sistemas.

A redundância na informação fornecida pelo mapa wavelet oferece uma ferramenta para a determinação de trânsitos *fracos*. Um exemplo pode ser visto na fig 7.1 na qual é possível distinguir claramente os trânsitos secundários das outras contribuições no mapa wavelet (fora dos trânsitos principais) onde os coeficientes associados a estes são 70% mais fortes do que os outros coeficientes nestas regiões.

Métodos como EEBLS e ANOVA são desenhados para achar periodicidades em sinais com relativamente poucos dados e possivelmente não permite tomar vantagem de dados como os fornecidos pelo CoRoT, onde o método Wavelet mostra resultados mais precisos na determinação da periodicidade neste tipo de sinais. É importante ressaltar que mesmo que o período determinado pelo método Wavelet para construir os diagramas de fase fosse mais preciso, os erros nas medidas do período no caso dos sistemas binários de contato aparecem usualmente uma ordem de magnitude maior com o método Wavelet do que com o método ANOVA; e no caso dos períodos determinados pelo método EEBLS os erros são menores com o método Wavelet, mais mesmo assim a comparação dos diagramas de fase mostra que é necessário redefinir a análise dos erros nas medidas o que devera ser feito após de estudos mais detalhados dos mapas wavelet das curvas de luz.

A caracterização da forma do mapa wavelet dos diagramas de fase pode oferecer uma nova aproximação para a determinação de características físicas do sistema binário onde assinaturas do mapa estarão relacionados com raios relativos, excentricidade, diferenças na luminosidade (raio e/ou temperatura), etc.

Uma vez determinados os parâmetros do sistema e das suas componentes, maior precisão nestes leva a análises O-C mais detalhados o que permite observar possíveis mudanças nos parâmetros orbitais do sistema que pode indicar a presença de mais corpos (planetas, por exemplo) interagindo gravitacionalmente com as estrelas do sistema, entre outras coisas.





## Apêndice A

# Representação dos Coeficientes da Transformada Wavelet no Espaço de Frequências

Partindo da definição da transformada de Fourier<sup>1</sup>

$$\hat{f}(\nu) = \int \mathbf{e}^{-i\nu t} f(t) \, \mathrm{d}t \tag{A.1}$$

e tomando  $f=\Psi_{a,b}(t)$ a partir da Eq.(4.1) temos que

$$\hat{\Psi}_{a,b}(\nu) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \mathbf{e}^{-i\nu t} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \, \mathrm{d}t. \tag{A.2}$$

Fazendo o cambio de variável  $\omega = (t-b)/a$ 

$$\hat{\Psi}_{a,b}(\nu) = \frac{a}{\sqrt{a}} \int \mathbf{e}^{-i\nu(a\omega+b)} \Psi(\omega) \, \mathrm{d}\omega.$$
(A.3)

e organizando temos

$$\hat{\Psi}_{a,b}(\nu) = \sqrt{a} \ \mathbf{e}^{-ib\nu} \int \mathbf{e}^{-ia\nu\omega} \Psi(\omega) \ \mathrm{d}\omega = \sqrt{a} \ \mathbf{e}^{-ib\nu} \hat{\Psi}(a\nu) \tag{A.4}$$

ou seja,

$$\hat{\Psi}_{a,b}(\nu) = \sqrt{a} \ \mathbf{C}^{-ib\nu} \hat{\Psi}(a\nu). \tag{A.5}$$

<sup>1</sup>tudas as integrales nesta secção vão são aplicadas no intervalo  $(-\infty, \infty)$  na variável respectiva, o limites serão omitidos para simplificar a leitura das equações
Agora, partindo da representação de uma função f(t) em  $L^2(\Re)$  em termos da sua transformada de Fourier

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \mathbf{e}^{it\nu} \hat{f}(\nu) \, \mathrm{d}\nu \tag{A.6}$$

e a definição de produto interno dada na (Eq. 4.2), reemplazamos e temos

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int \int \hat{f}(\nu) \hat{\Psi}^*_{a,b}(\nu') \int \mathbf{e}^{it(\nu-\nu')} \,\mathrm{d}t \,\mathrm{d}\nu \,\mathrm{d}\nu', \tag{A.7}$$

a integral em t é a função delta  $\delta(\nu-\nu')$ ou seja

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int \int \hat{f}(\nu) \hat{\Psi}^*_{a,b}(\nu') \delta(\nu - \nu') \, \mathrm{d}\nu \, \mathrm{d}\nu' = \frac{1}{2\pi} \int \hat{f}(\nu) \hat{\Psi}^*_{a,b}(\nu) \, \mathrm{d}\nu, \quad (A.8)$$

e dado que  $\nu$  é uma variável muda, temos que a última integral é a representação do produto interno dada pela (Eq. 4.2) para a transformada de Fourier das funções f e  $\Psi_{a,b}$ , ou seja

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{2\pi} \langle \hat{f}, \hat{\Psi}_{a,b} \rangle$$
 (A.9)

esta relação é valida para quaquier função em  $L^2(\Re)$  e é conhecida como *Identidade de Plancherel*. Assim usamos a (Eq. A.5) e temos que

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{2\pi} \langle \hat{f}, \hat{\Psi}_{a,b} \rangle = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int \mathbf{C}^{i\nu b} \hat{f}(\nu) \,\hat{\Psi}^*(a\nu) \,\mathrm{d}\nu. \tag{A.10}$$

o que mostra a equivalência entre as relações (4.2) e (4.3) para os coeficientes da CWT.

## Apêndice B

## Diagramas de Fase das Estrelas Observadas

Os diagramas de fase obtidos a partir das curvas de luz oferecidas pelo CoRoT e os periodos determinados através do método wavelet são mostrados a continuação.



continua na pagina seguente



continua na pagina seguente



Tabela B.1 – continuação da página precedente

continua na pagina seguente



continua na pagina seguente



continua na pagina seguente



Tabela B.1: Diagramas de fase obtidos a partir das curvas de luz dos sistemas binários estudados neste trabalho junto com o valor do correspondente periodo em dias.

## Descrição Bibliográfica

A continuação estão descritos as referências mais destacadas em cada tópico, si bem não são todas as referências elas podem oferecer uma idéia mais aprofundada do exposto neste trabalho.

#### Capitulo 2

- [Herschel(1864)] 1864 William Herschel Outlines of Astronomy. No capítulo XVI faz referência a estrelas variáveis e mostra uma lista das estrelas deste tipo ate esse momento conhecidas, descreveu as mudanças em brilho da estrela Algol e explica que pode ser devido a um trânsito (sem usar o termo "trânsito" que foi cunhado mais adiante). O livro em geral é uma bela resenha dos avances da época e da grande visão do autor.
- [Drechsel & Zejda(2005)] 2005 Drechsel, H. & Zejda, M.(editores) Zdenek Kopal's Binary Star Legacy. Este é um compendio de artigos reunidos em honra do astrônomo Zdenek Kopal e apresentados na conferencia internacional do mesmo nome realizada em 2004 na Rep. Checa. O livro começa com anedotas e historias da vida de Kopal, continua com uma descrição física dos sistemas binários e termina com os modelos numéricos e as formulações matemáticas para comparar as observações com a teoria.

#### Capitulo 3

- [Kopal(1955)] 1955 Zdenek Kopal The Classification of Close Binary Systems. Este trabalho é o primeiro no qual se faz a classificação das estrelas binárias de acordo com a separação entre as superfícies das duas estrelas. Com os dados obtidos ate esse momento, Kopal apóia os argumentos oferecidos neste trabalho permitindo que esta classificação seja utilizada ainda hoje. As gráficas e as tabelas neste trabalho permitem uma clara compreensão das conclusões feitas por ele. Um belo resumo e comentários sobre o artigo e a historia de Kopal com as binárias está em [Pustylnik(2005)].
- [Budding & Demircan(2007)] 2007 Budding, E. & Demircan, O. Introduction to Astronomical Photometry. Fotométria estelar, o livro oferece uma cobertura completa dos fundamentos, métodos e tratamentos dos dados fotométricos, descreve os diferentes tipos de variabilidades que há no brilho das estrelas e mostra os diferentes métodos com os quais são estudados estes fenômenos.

#### Capitulo 4

- [Hubbard(1997)] 1997 Barbara Hubbard The World According to Wavelets. Uma introdução para o tema geral de wavelet e analise de sinais, é uma muito boa primeira aproximação ao tema wavelet, vem com muitos exemplos gráficos e notas historias.
- [Torrence & Compo(1998)] 1998 Torrence, C. and Compo, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Uma boa guia para compreender os detalhes na aplicação da transformada wavelet continua, devido a que trata o tema enfocado na aplicação da CWT e não na sua validade matemática. No artigo é explicado como aplicarem a CWT a dados de El Niño SST e a informação obtida a partir deste estudo.

#### Capitulo 5

 [A. Baglin(2006)] 2006 A. Baglin & J. Lochard (editores) The CoRoT Mission, Pre-Launch Status. Uma Descrição minuciosa de tudo o concernente a missão CoRoT: Instrumentos, dados, grupos de trabalho, etc. É a melhor referência para quem quiser conhecer mais do CoRoT pois é feita pelos mesmos criadores da missão.

### **Referências Bibliográficas**

- [A. Baglin(2006)] A. Baglin, J. L. (Ed.) (2006). The CoRoT Mission, Pre-Launch Status. ESA, Agencia Espacial Europeia.
- [A Dictionary of Astronomy(2009)] A Dictionary of Astronomy (2009). speckle interferometry. Http://www.encyclopedia.com.
- [Abt(1983)] Abt, H. A. (1983). Normal and abnormal binary frequencies. ARA&A, 21, 343–372.
- [Budding & Demircan(2007)] Budding, E. & Demircan, O. (2007). Introduction to astronomical photometry. Cambridge University Press.
- [Drechsel & Zejda(2005)] Drechsel, H. & Zejda, M. (Eds.) (2005). Zdenek Kopal's Binary Star Legacy. Edited by H. Drechsel, Dr. Reimes Observatory, Bamberg, Germany; M. Zejda, N. Copernicus Observatory and Planetarium Brno, Czech Republik Reprinted from Astrophysics and Space Science, Vol. 296, Nos. 1-4, 2005 Springer, Dordrecht. Czech Republik: Springer.
- [Guinan & Engle(2006)] Guinan, E. F. & Engle, S. G. (2006). The Brave New World of Binary Star Studies. Ap&SS, 304, 5–11.
- [Herschel(1864)] Herschel, J. F. W. S. (1864). Outlines of astronomy. Londres: Longman, Roberts & Green.
- [Herschel(1803)] Herschel, W. (1803). Account of the Changes That Have Happened, during the Last Twenty-Five Years, in the Relative Situation of Double-Stars;

With an Investigation of the Cause to Which They Are Owing. Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 93, 339–382.

- [Hill & Hutchings(1970)] Hill, G. & Hutchings, J. B. (1970). The Synthesis of Close-Binary Light Curves. I. The Reflection Effect and Distortion in Algol. ApJ, 162, 265-+.
- [Hubbard(1997)] Hubbard, B. (1997). The world according to wavelets. A. K. Peters Ltd.
- [Kopal(1955)] Kopal, Z. (1955). The classification of close binary systems. Annales d'Astrophysique, 18, 379-+.
- [Lanza(2009)] Lanza, e. a., A. F. (2009). Magnetic activity in the photosphere of CoRoT-Exo-2a. Active longitudes and short-term spot cycle in a young Sun-like star. A&Ap, 493, 193–200.
- [Leão(2004)] Leão, I. d. C. (2004). Sincronização por Marés Gravitacionais em Sistemas Binários Próximos com Componentes de Tipo Tardio. Dissertação de Mestrado-DFTE-UFRN.
- [Maceroni & Ribas(2006)] Maceroni, C. & Ribas, I. (2006). The Impact of CoRoT on Close Binary Research. Ap&SS, 304, 383–386.
- [Michell(1767)] Michell, J. (1767). An Inquiry into the Probable Parallax, and Magnitude of the Fixed Stars, from the Quantity of Light Which They Afford us, and the Particular Circumstances of Their Situation, by the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. Royal Society of London Philosophical Transactions Series 1, 57, 234–264.
- [Mullaney(2005)] Mullaney, J. (2005). Double & Multiple Stars, and How to Observe Them. Springer-Verlag London.
- [Percy(2007)] Percy, J. R. (2007). Understanding variable stars. Cambridge University Press.

- [Prša & Zwitter(2005)] Prša, A. & Zwitter, T. (2005). A Computational Guide to Physics of Eclipsing Binaries. I. Demonstrations and Perspectives. ApJ, 628, 426–438.
- [Pustylnik(2005)] Pustylnik, I. B. (2005). Resolving the Algol Paradox and Kopal's Classification of Close Binaries with Evolutionary Implications. *ApSS*, 296, 69–78.
- [Russell(1912a)] Russell, H. N. (1912a). On the Determination of the Orbital Elements of Eclipsing Variable Stars. I. ApJ, 35, 315-+.
- [Russell(1912b)] Russell, H. N. (1912b). On the Determination of the Orbital Elements of Eclipsing Variable Stars. II. ApJ, 36, 54-+.
- [Shu & Lubow(1981)] Shu, F. H. & Lubow, S. H. (1981). Mass, angular momentum, and energy transfer in close binary stars. ARAA, 19, 277–293.
- [Szatmary et al.(1994)Szatmary, Vinko, & Gal] Szatmary, K., Vinko, J., & Gal, J. (1994). Application of wavelet analysis in variable star research. I. Properties of the wavelet map of simulated variable star light curves. A&A Suppl, 108, 377–394.
- [Tassoul(1988)] Tassoul, J.-L. (1988). On orbital circularization in detached close binaries. ApJL, 324, L71–L73.
- [Terrell(2001)] Terrell, D. (2001). Eclipsing Binary Stars: Past, Present, and Future. Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO), 30, 1-+.
- [Torrence & Compo(1998)] Torrence, C. & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 61–78.
- [Wilson & Devinney(1971)] Wilson, R. E. & Devinney, E. J. (1971). Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni. ApJ, 166, 605– +.

- [Wilson & Sofia(1976)] Wilson, R. E. & Sofia, S. (1976). Effects of tidal distortion on binary-star velocity curves and ellipsoidal variation. ApJ, 203, 182–186.
- [Zahn(1977)] Zahn, J.-P. (1977). Tidal friction in close binary stars. A&A, 57, 383–394.

# Livros Grátis

(<u>http://www.livrosgratis.com.br</u>)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo