

**Levantamento Fotométrico nas Bandas J, H e K de
Estrelas Variáveis na Região Central de Cygnus OB2**

Julia Maria Torres Roquette

2013



Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Instituto de Ciências Exatas - ICEx
Programa de Pós Graduação em Física

**Levantamento Fotométrico nas Bandas J, H e K de Estrelas Variáveis na
Região Central de Cygnus OB2**

Julia Maria Torres Roquette

Orientador: Prof. Dr. Luiz Paulo Ribeiro Vaz

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Medeiros Guimarães (UFSJ)

Dissertação apresentada ao departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção de Título de Mestre em Física

Área de Concentração: Astrofísica.

*“We are all in the gutter,
but some of us are
looking at the stars.”
(Oscar Wilde)*

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à minha mãe, por me criar à sua semelhança e me ensinar virtudes sem as quais a minha carreira acadêmica nunca seria possível. À minha irmã Flávia, por ser a minha melhor amiga. À Sônia, por ter ouvido pacientemente as minhas primeiras ideias científicas, enquanto lavava roupa. Ao restante da minha família, por sempre me apoiarem e se orgulharem de mim.

Agradeço ao Professor Luiz Paulo pela orientação, por ter me aceitado como sua pupila, por acreditar na minha capacidade de fazer um bom trabalho, por tudo o que me ensinou e pelo bom exemplo como pesquisador que é.

Agradeço ao Marcelo Pará por ter dividido o projeto Cygnus OB2 comigo e me ensinado a dar os primeiros passos como astrofísica, pela sempre boa vontade em ouvir minhas ideias e pela orientação no trabalho que segue.

Agradeço ao Bo Reipurth por fornecer o material observacional utilizado no presente trabalho.

Agradeço à Marina e sua “tia” Letícia Myrrha, responsáveis por me fazer chegar ao laboratório de Astrofísica pela primeira vez.

Agradeço ao Henrique Limborço Cobra por ser meu fiel escudeiro, pela companhia nas madrugadas de estudo afora, por nossas aventuras fazendo a ronda no ICEx e, principalmente, por sempre me arrancar gargalhadas e sorrisos até nos dias mais difíceis.

Agradeço a toda a Família como um todo e a cada um individualmente: Ao Mário Sérgio, pelo exemplo como professor e, principalmente, por sua amizade e companheirismo; À Marrie e ao Thiago pelo carinho especial pela caçula; ao Custela por sempre nos elucidar com as fantásticas ideias da cachola; À Rosa e ao Guga, por terem me aturado morando com eles nesses últimos meses de mestrado.

Agradeço à Daylin pelo entendimento que estudar a migração internacional e o comportamento reprodutivo da mulher cubana residente nos EUA é tão importante quanto entender por que estrelas jovens variam em brilho.

Agradeço ao Saulo e a Bárbara Rosa por me aceitarem em sua turma e pelos bons amigos

que se tornaram. À Clarissa, por mesmo tão longe sempre torcer por mim; À Bárbara Diniz pelas ideias que dividiu comigo e por sua capacidade de refutar logicamente até os raciocínios mais sólidos; Ao Tanus, por gostar de ler tudo que escrevo; Ao Marco Túlio pelo valor e apoio dado às minhas ideias mais mirabolantes; Ao Gaugusto pelas conversas tão sinceras; À Lígia, pelos abraços que sempre fazem o mundo parecer melhor.

Agradeço a todos os colegas do laboratório de astrofísica, pelas horas de descontração na sala de café do laboratório. Em especial ao Francisco, por sempre tentar me ajudar com meus infindáveis problemas de computador e à Alana por seu movimento de rotação em torno do próprio eixo.

Aos colegas da sala de mestrado por enriquecerem meu vocabulário com expressões típicas de todo canto do país.

Agradeço aos professores da física, com quem tive oportunidade de aprender, especialmente aos professores Emmanuel, Ronald Dickman e, novamente, Mário Sérgio, por ministrarem os melhores cursos de física que tive a oportunidade de assistir.

À “turma” da pós graduação, pelas sexta feiras de Maletta, Bordello e Obra e pelas noites de cantoria (especialmente à Regi, pelo seu talento especial no ukulele). E, finalmente, a todas as pessoas do Departamento que acompanharam de perto a minha rotina nos últimos anos.

Agradeço ao CNPq, CAPES e FAPEMIG, pelo auxílio financeiro durante quase toda a graduação e mestrado.

Resumo

Cygnus OB2 é uma associação de estrelas OB localizada no Braço Espiral Local, a qual contém alguns dos objetos mais massivos e brilhantes conhecidos na Galáxia. A partir de estudos sobre suas estrelas mais massivas, sabe-se que a associação é uma rica região de formação estelar localizada atrás de uma nuvem de poeira causadora de alta extinção (com valores chegando a $10 - 20M_V$), com idade de 3 milhões de anos, o que a torna um alvo muito adequado para estudos de formação e evolução estelar.

Realizamos um levantamento de variabilidade fotométrica em infravermelho monitorando a associação através de exposições curtas em J, H e K utilizando a *Wide Field Camera* (WFCAM), atualmente instalada no *United Kingdom Infrared Telescope* (UKIRT), por 112 noites cobrindo um intervalo de 217 dias. Foi coberta uma área total de $52',96 \times 52',96$ a partir do centro da associação.

Os dados da região central da associação, correspondentes a $\frac{1}{16}$ da área observada, foram organizados em um catálogo de curvas de luz. Baseando-se em características das curvas de luz, objetos que apresentavam variabilidade fotométrica correlacionada nas três bandas foram selecionados. Uma classificação provisória do tipo de variabilidade foi feita utilizando os resultados da aplicação de técnicas para o tratamento de séries temporais discretas como a análise do espectro de Fourier, gráficos de correlação cruzada e desvio entre filtros, dispersão em fase e ajuste por mínimos quadrados. No caso de variabilidade periódica, períodos e amplitudes foram obtidas a partir de tais técnicas.

Palavras-chave: Cygnus OB2, estrelas jovens, região de formação estelar, análise de série temporal, variabilidade fotométrica

Abstract

Cygnus OB2 is an OB association located in the direction of the Local Spiral Arm, harbouring some of the most massive and luminous stars in the Galaxy. Studying its high mass population, we learned that it is a rich star forming region, localized behind a dust cloud which is responsible for the high extinction measured in that area of the sky ($10 - 20 M_V$). Its estimated age of 3Myr makes it an appropriate target for studying young stars.

We performed a photometric variability survey in this region using near infrared filters (JHK), with the Wide Field Camera (WFCAM) of the United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT), during 112 nights, unevenly spaced in a period of 217 days. A total area of $52',96 \times 52',96$ was covered with Cygnus OB2 in its center.

The central region of the observed area (1/16 of the total data) was organized as a light curve catalogue. According to light curve characteristics objects with high filter correlation were selected. Provisional classification was applied according to variability type, using known techniques for discrete time series analysis like Fourier decomposition, graphic cross correlation and deviation between filters, phase dispersion and least square fitting. We present here the implementation and use of such techniques. In case of periodic variability we performed period and amplitude measurements.

Keywords: Cygnus OB2, young stars, star forming region, time-series analysis, photometric variability

Sumário

Resumo	I
Abstract	II
Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas	XI
1 Introdução	1
1.1 Breve Compêndio Histórico	2
1.2 Por que estudar estrelas jovens?	3
1.3 A associação Cygnus OB2	5
1.4 Objetivos	7
2 A Formação Estelar e a Variabilidade Fotométrica	8
2.1 Formação Estelar	8
2.2 Estrelas T Tauri	11
2.2.1 Variabilidade Fotométrica em Estrelas tipo T Tauri	11
2.3 Uma coletânea Taxonômica para Estrelas Jovens	15
2.3.1 Mecanismos Físicos da Variabilidade Fotométrica	16
2.3.2 Variabilidade Extrínseca	17
I-Eclipsantes	17
II-Rotação:	18
2.3.3 Variabilidade Intrínseca	19
III- Pulsação:	19
IV- Eruptivas:	19
2.4 Observações Pertinentes à Aplicação da Taxonomia	20
3 O Material Observacional	21
3.1 Aquisição de Dados	21

3.2	Organização do Catálogo	23
3.2.1	UKP83	25
3.2.2	Objetos fragmentados	28
3.3	Estrelas Constantes	29
3.3.1	Curvas médias	30
3.3.2	Fotometria Diferencial	33
4	As Ferramentas para Análise da Variabilidade Fotométrica	36
4.1	A Curva de Luz	37
4.1.1	A Medida Fotométrica	40
4.2	Análise de Fourier	41
4.2.1	Periodograma Clássico	41
	Frequência de Nyquist	42
	<i>Aliasing</i>	43
4.2.2	Periodograma Normalizado de Lomb	45
	Probabilidade de Falso Alarme	46
	<i>Aliasing</i> e Frequência de Nyquist	47
4.2.3	Dispersão em fase	49
4.3	Correlação Cruzada entre Filtros	51
4.4	Modelo Senoidal	55
5	Catálogo Provisório de Variáveis em CygOB2	59
5.1	Constantes	60
5.2	Variáveis Senoidais	61
5.2.1	Curvas de luz com Período Determinado:	62
	Tipo I:	62
5.2.2	Curva de Luz com Período Ambíguo	67
	Vazamento Espectral I: Alias	67
	Vazamento Espectral II: Formação de <i>Alias</i> em Torno de 1,0d	70
	Filtro Sem Períodos	72
	Batimento	74
5.2.3	Multiperiodicidade	79
5.3	Miscelânea	84
5.3.1	Tipo <i>Flare</i>	84
5.3.2	Tipo Eclipse	86
5.3.3	Outras	93

<i>SUMÁRIO</i>	V
6 Conclusões e Perspectivas	97
A Apêndice: Variáveis tipo Mancha com período determinado	99
B Apêndice: Comparação com a Literatura	105
Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

1.1	Trajeto evolutivo de uma estrela de $1M_{\odot}$ no diagrama HR teórico.	1
2.1	Diagrama esquemático de uma ETTF.	13
2.2	Diagrama esquemático de uma ETTC.	14
3.1	Detalhes do plano focal da WFCAM.	22
3.2	Curva de transmissão do sistemas fotométrico utilizado no UKIRT.	22
3.3	Esquema de leitura da WFCAM.	23
3.4	Descrição das tabelas de dados fotométricos e astronômicos.	25
3.5	Passos seguidos pelo ukp83 para estruturação do catálogo base.	26
3.6	Passos seguidos pelo ukp83 para as demais noites.	27
3.7	Dois objetos com coordenadas coincidentes, considerados como fragmentado .	28
3.8	Curvas médias de desvio padrão e geométrico.	31
3.9	Correlação entre os objetos constantes em cada curva.	32
3.10	Curva de luz do objeto #15574	33
4.1	Curva de luz do objeto #17145.	37
4.2	Curva de luz do objeto #6257.	38
4.3	Curva de luz do objeto #4206.	38
4.4	Curva de luz do objeto #8019.	38
4.5	Curva de luz do objeto #1529	39
4.6	Diferença entre o fenômeno físico e o que é medido.	40
4.7	Formação de picos em um periodograma teórico para sinais com um e mais períodos.	42
4.8	Ilustração do efeito de <i>aliasing</i>	44
4.9	Histograma do intervalo de tempo entre medidas sucessivas	45
4.10	Periodograma Normalizado de Lomb para o objeto #4206.	48
4.11	Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4206 com período <i>alias</i>	49
4.12	Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4206 com o período correto. . .	50

4.13	Curva de luz dobrada em fase para o objeto #8019.	50
4.14	Curvas de CCF e DCF para o objeto #6257.	53
4.15	Curvas de CCF e DCF para o objeto #17145.	53
4.16	Curvas de CCF e DCF para o objeto #4206.	54
4.17	Curvas de CCF e DCF para o objeto #8019.	54
4.18	Curvas de CCF e DCF para o objeto #1529.	55
4.19	Curva de luz sintética para o objeto #8019.	56
4.20	Curva de luz sintética para o objeto #1529	57
5.1	Curva de luz do objeto #13465.	60
5.2	Curvas de CCF e DCF para o objeto #13465	61
5.3	Periodograma para o objeto #13465.	61
5.4	Curva de luz composta do objeto #4272.	62
5.5	Curva de luz composta do objeto #11317.	63
5.6	Curvas de CCF e DCF para o objeto #4272.	63
5.7	Curvas de CCF e DCF para o objeto #11317.	64
5.8	Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #4272 para cada um dos filtros medidos.	65
5.9	Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #11317 para cada um dos filtros medidos.	65
5.10	Curvas de luz dobradas em fase para os objetos #4272 e #11317.	66
5.11	Curva de luz sintética para o objeto #4272.	67
5.12	Curva de luz sintética para o objeto #11317.	67
5.13	Curva de luz do objeto #2639.	68
5.14	Curvas de CCF e DCF para o objeto #2639.	68
5.15	Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #2639 para cada um dos filtros medidos.	69
5.16	Estrela #2639 no filtro K.	69
5.17	Curva de luz dobrada em fase para o objeto #2639.	70
5.18	Curva de luz do objeto #13446.	71
5.19	Curvas de CCF e DCF para o objeto #13446.	71
5.20	Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #13446 para cada um dos filtros medidos.	72
5.21	Curva de luz do objeto #4666.	72
5.22	Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #2488 para cada um dos filtros medidos.	73

5.23 Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4666 para cada um dos filtros medidos.	73
5.24 Curva de luz do objeto #2488.	74
5.25 Curvas de CCF e DCF para o objeto #2488.	75
5.26 Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #2488 para cada um dos filtros medidos.	75
5.27 Curva de luz dobrada em fase para o objeto #2488.	76
5.28 Curva de luz sintética para o objeto #2488.	77
5.29 Curva de luz do objeto #2488.	77
5.30 Periodograma Normalizado de Lomb do objeto #17326 para cada um dos filtros medidos.	78
5.31 Curvas de CCF e DCF para o objeto #17326.	78
5.32 Curva de luz dobrada em fase para o objeto #17326.	79
5.33 Curva de luz sintética monoperiódica para o objeto #17326.	80
5.34 Curva de luz sintética multiperiódica para o objeto #17326.	80
5.35 Periodogramas Normalizados de Lomb para curvas sintéticas mono e multiperiódica para o objeto #17326.	81
5.36 Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz do objeto #1529.	82
5.37 Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz sintética do objeto #1529.	83
5.38 Curvas de luz dos objetos tipo <i>flare</i>	84
5.39 Curvas de luz dos objetos tipo <i>flare</i>	85
5.40 Curvas de CCF e DCF para o objeto #10194.	85
5.41 Estrelas tipo <i>flare</i> encontradas no presente estudo.	86
5.43 Estrelas tipo eclipse encontradas no presente estudo.	86
5.42 Curvas de luz dos objetos tipo eclipse.	87
5.44 Curva de correlação cruzada entre filtros para o objeto #13732.	88
5.45 Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz do objeto #13732.	89
5.46 Curvas de luz dobradas em fase para o objeto #13732.	89
5.47 Curvas de luz dobradas em fase para o objeto #13732.	90
5.48 Curva de luz dobrada em fase para os objetos tipo eclipse #7342.	90
5.49 Curva de luz dobrada em fase para o objeto tipo eclipse #1478.	91
5.50 Curva de luz dobrada em fase para o objeto tipo eclipse #14754.	91
5.51 Curvas de luz do objeto #11829.	92
5.52 Curva de CCF e DCF para o objeto #11829.	92
5.53 Curvas de luz do objeto #15069.	93

5.54	Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.	93
5.55	Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.	94
5.56	Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.	94
5.57	Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.	95
5.58	Curva de luz do objeto #2407.	95
5.59	Curva de CCF e DCF do objeto #2407.	96

Lista de Tabelas

3.1	Datas das observações de CygOB2.	23
3.2	Noites excluídas da amostra por má qualidade.	28
3.3	Dados fotométricos para os objetos considerados como constantes.	33
3.4	Dados da fotometria diferencial para os 10 objetos selecionados como constantes.	34
4.1	Níveis de probabilidade de falso alarme para o LNP.	47
4.2	Dispersões em fase para curva de luz em fase do objeto #4206.	49
4.3	Resultados do ajuste por mínimos quadrados para o objeto #8019.	56
4.4	Resultados do ajuste por mínimos quadrados para o objeto #1529.	57
5.1	Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #4272 e #11317.	63
5.2	Ajuste de curva senoidal aos objetos #4272 e #11317.	65
5.3	Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #2639.	69
5.4	Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #13446.	70
5.5	Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #4666.	74
5.6	Dados fotométricos e astrométricos do objeto #2488.	76
5.7	Resultados do ajuste por mínimos quadrados para o objeto #2488.	77
5.8	Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #2488 e #17326.	79
5.9	Resultados do ajuste por mínimos quadrados para o objeto #17326.	82
5.10	Parâmetros das 3 estrelas tipo <i>flare</i> identificadas no estudo.	84
5.11	Dados astrométricos e fotométricos para estrelas tipo eclipse.	86
A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	99
A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	100
A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	101

A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	102
A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	103
A.1	Dados fotométricos e astrométricos de estrelas candidatas a classificação man- cha tipo I.	104
B.1	Objetos em comum com o catálogo de Henderson et al. (2011).	106

Capítulo 1

Introdução

Toda estrela apresenta variabilidade fotométrica em algum momento de sua vida. Como é impossível para nós acompanhar uma estrela por todo o seu trajeto evolutivo através do diagrama Hertzsprung-Russel (Diagrama HR), ficamos limitados a observar diferentes estrelas em diferentes estágios evolutivos e correlacioná-los. Tendo em vista as limitações observacionais, classificamos como variáveis as estrelas que apresentam variação de brilho em escalas mensuráveis pelo homem. Essa variação pode ser irregular, periódica ou semi-periódica. A Figura 1.1 apresenta o diagrama HR teórico para uma estrela com $1M_{\odot}$.

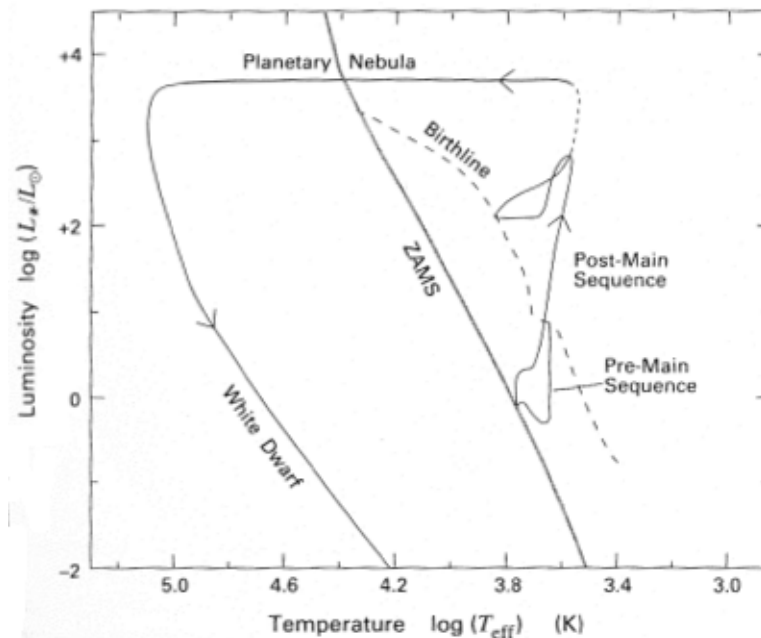


Figura 1.1: Trajeto evolutivo para uma estrela de $1M_{\odot}$ no diagrama HR teórico (linha com flechas). A linha cinza representa a sequência principal pra idade zero (*Zero Age Main Sequence*, *ZAMS*), enquanto a linha tracejada representa a curva de nascimento (*birthline*). Figura extraída de Stahler & Palla (2005)

O diagrama HR é uma representação gráfica da luminosidade de uma estrela em função

de sua temperatura efetiva. As propriedades físicas de uma estrela estão relacionadas com sua posição nesse diagrama, a qual varia com o tempo através de um caminho evolutivo. As estrelas que tem como principal fonte de energia a fusão de hidrogênio em hélio encontram-se em uma faixa do diagrama denominada Sequência Principal (SP).

O alvo do presente trabalho é a associação de estrelas jovens Cygnus OB2 (CygOB2), uma rica região de formação estelar, com estrelas em uma fase evolutiva denominada Pré Sequência Principal (PSP) que no diagrama HR ocorre entre a curva de nascimento e a SP. Motivações para estudar estrelas jovens são apresentadas na Seção 1.2, motivações para estudar CygOB2 são apresentadas na Seção 1.3. Os objetivos do presente trabalho serão apresentados na Seção 1.4.

1.1 Breve Compêndio Histórico

O estudo de estrelas variáveis começa em 1596, pouco depois da invenção do telescópio, quando David Fabricius notou que a estrela Mira (*Omicron Ceti*) surgia e desaparecia do céu ao decorrer de um ano. A famosa Algol (*β Persei*), por sua vez, foi reconhecida como variável por Gemiani Montanari em 1667. Em uma carta à *Royal Society of London*, Goodricke (1783) descreveu suas observações de Algol, as quais levaram ao cálculo de um período de dois dias e vinte e uma horas e à conjectura de que a variação de brilho da estrela era causada por um objeto em revolução em torno da mesma.

O primeiro catálogo de estrelas variáveis foi publicado por Pigott & Englefield (1786) e continha apenas doze variáveis confirmadas (das quais quatro eram *novae*) e 39 suspeitas de serem variáveis. Muito antes disso cerca de 130 *novae* já eram conhecidas, em sua maioria pelo povo chinês, sendo que apenas 12 eram conhecidas no ocidente. Um artigo histórico interessante sobre o assunto foi publicado por Ho & Ho (1962), onde ele traduz 581 registros de cometas e supernovas extraídos de catálogos estelares medievais chineses entre os anos 532 a.C. e 1600 A.D.¹.

Até o advento da fotografia, praticamente todo o descobrimento de estrelas variáveis eram feitos por acaso. Um observador familiarizado com uma constelação notava a presença de uma nova estrela (ou a ausência de uma velha), tal ocorrência era noticiada e eventualmente (como no caso de Algol) o objeto era estudado individualmente. No final do Século XIX, chapas fotográficas começaram ser utilizados em observatórios (e os primeiros sistemas de

¹Existem indícios de que a variabilidade de objetos não-*novae* como Algol e Mira era conhecida desde muito tempo antes das datas tradicionalmente atribuídas. Evidências disso são encontradas em histórias mitológicas de diversos povos. A estrela Algol recebe nomes como "Demônio Vermelho", "Cabeça do Demônio", "Lilith", entre outros os quais carregam uma denotação maligna, fazendo referência ao caráter peculiar da estrela; na mitologia hindu, era conhecida literalmente como "A inconstante" (Wilk 1996).

calibração de magnitude instrumental foram desenvolvidos). Através delas, luz pode ser integrada durante muitas horas, tornando visíveis objetos muito fracos para serem vistos a olho nu; além disso, milhares de objetos podem ser registrados permanentemente de uma só vez, tornando muito mais eficiente o processo de busca por estrelas variáveis. Diversas técnicas voltadas para essa busca foram introduzidas e o estudo sistemático de tais objetos foi difundido².

Uma classe de objetos variáveis de especial interesse é a das binárias eclipsantes, já que elas podem ser utilizadas como “régua e balança” em determinações precisas de raios e massas, parâmetros que são fundamentais na vinculação de modelos teóricos de formação e evolução estelar. Porém, tais objetos são difíceis de se localizar e quando o assunto é estrelas jovens, apenas 27 estrelas possuem tais parâmetros determinados com erros de até 2% (Mathieu et al. 2007; Gennaro et al. 2012).

Desde o início dos anos 1920, estrelas PSP já eram reconhecidas como uma classe de estrelas variáveis comumente referidas como variáveis irregulares da Nebulosa de Orion (Hoffmeister et al. 1985). Pela natureza incompreendida dessas estrelas, buscas intensas por novos exemplares foram empreendidas. Estudos espectroscópicos desses objetos começaram na década de 1940 *e.g.*, Joy (1945), e com eles a estrela T Tauri foi identificada como o protótipo espectral de uma classe especial dentre as estrelas PSP. A constatação de que esses objetos encontravam-se próximos a nuvens moleculares levou à primeira tentativa de explicar suas peculiaridades, assumindo a hipótese de que eles estariam acretando material interestelar. Periodicidade é difícil de se estabelecer em estrelas tipo T Tauri devido a complexidade de tais objetos (Herbst & Wittenmyer 1996). Hoffmeister et al. (1985), em seu capítulo sobre estrelas tipo T Tauri, comenta que variações periódicas não confirmadas eram relatadas na literatura desde os anos 1950, apesar disso, somente nos anos 1990 os primeiros estudos confirmando a existência de variabilidade fotométrica periódica em ETTs foram finalizados, *e.g.*, Herbst & Wittenmyer (1996) e Bouvier et al. (1995).

1.2 Por que estudar estrelas jovens?

Estrelas jovens são muito ativas fotometricamente. Essa atividade inclui manchas quentes e frias, erupções, extinção por material circunstelar e efeitos de temperatura na cromosfera e coroa da estrela. Processos magnéticos envolvendo o material em queda na estrela, por exemplo, provocam o aparecimento de manchas quentes em sua superfície. Quando essas manchas perduram por vários ciclos, é possível utilizar a variabilidade causada por elas para

²Uma interessante revisão de tais técnicas pode ser encontrada em Hoffleit (1986).

determinar o período de rotação da estrela. Com uma análise apropriada, monitoramento de objetos com manchas podem levar à medidas de períodos de rotação com precisão de até 1% (Herbst et al. 2007).

Mapeamento de períodos de rotação em regiões de formação estelar são importantes para selecionar alvos que, estudados individualmente, podem ajudar a solucionar o problema do momento angular na formação estelar. De forma simplificada: o momento angular dos núcleos densos das nuvens moleculares (de onde se formam estrelas de baixa massa) está 5–6 ordens de magnitude acima do momento angular de estrelas do tipo do Sol com idade zero (Herbst et al. 2007) – o que funciona como condição de contorno para modelos de evolução estelar, exigindo que esses incluam mecanismos de transferência de momento angular.

Alguns monitoramentos fotométricos de aglomerados abertos e regiões de formação estelar foram realizados visando acompanhar a evolução da taxa de rotação de estrelas pouco massivas. Entre eles destacamos o *The Monitor Project* (Irwin et al. 2007, 2006; Aigrain et al. 2007), que visa estudar rotação e trânsito de planetas em estrelas pouco massivas entre a linha de nascimento e a idade zero na SP (1 a 200 milhões de ano), e os estudos de distribuição de períodos para estrelas da Nebulosa de Orion (1 milhão de anos) (Herbst et al. 2002), NGC 2264 (3 milhões de anos) (Affer et al. 2013) e IC 348 (1,3 – 3 milhões de anos) (Cohen et al. 2004). A Nebulosa de Orion e NGC 2264, que são as regiões cujas amostras de períodos têm maior significado estatístico, apresentam distribuição bimodal de períodos para estrelas do tipo do Sol com picos em torno 2d e 8d, para a primeira, e 1d e 4d para a segunda; A redução da moda³ entre os períodos por um fator 2, uma vez que a idade aumentou aproximadamente no mesmo fator, é um indicativo da conservação de momento angular entre as duas idades e que o problema do momento angular é resolvido antes da fase T Tauri dessas estrelas (Herbst et al. 2007).

Alguns dos modelos vigentes para a formação estelar, para explicar evidências observacionais, incluem um fenômeno denominado trancamento de disco: em certo estágio evolutivo, a estrela equilibra a quantidade de momento angular adquirido via acreção do disco com a quantidade de momento angular perdida por ventos, ou cedido ao disco por outros meios e a estrela fica estabilizada em uma determinada taxa de rotação. O sucesso atual de tais modelos é acertar na previsão de que em regiões de formação estelar muito jovens, estrelas se tornam visíveis com períodos em torno de 2d e 8d (Herbst et al. 2007).

Levantamentos fotométricos em regiões de formação estelar podem ajudar a testar tais modelos e melhorar o nosso entendimento da evolução do momento angular.

³Moda, em estatística, é o valor mais comum dentro de um conjunto de dados.

1.3 A associação Cygnus OB2

CygOB2 – vide Reipurth & Schneider (2008) para uma revisão completa sobre a região e o entorno – é uma associação de estrelas OB muito massiva localizada na direção do Braço Espiral Local, a qual contém alguns dos objetos mais massivos e brilhantes conhecidos na Galáxia. Foi descoberta por Münch & Morgan (1953), que reportaram uma possível aglomeração de estrelas azuis gigantes. Seguindo esse primeiro estudo, Johnson & Morgan (1954) identificaram 11 estrelas OB dentre as quais uma é um sistema quádruplo. No mesmo ano, Morgan et al. (1954) combinaram fotometria e uma técnica que chamaram de “dispersão extremamente baixa” (*Extremely Low Dispersion*) para detectar e classificar 7 novos possíveis membros de acordo com seus tipos espectrais, todos entre O e B. Johnson & Morgan (1954) ressaltaram a alta absorção interestelar na direção (Entre 6 e $7M_V$ segundo eles) e propuseram uma distância de 1,5 kpc para a associação.

Schulte (1956a,b, 1958) combinou fotometria fotoelétrica e espectroscopia para confirmar os já propostos membros e detectar objetos mais fracos, aumentando o número de estrelas da associação para 31 e confirmando um membro do tipo espectral A0.

O primeiro estudo considerando a morfologia da associação foi feito por Reddish et al. (1966), que sugeriram um formato elipsoidal de 29×17 pc e identificaram, através de diagramas cor-cor, mais de 3000 membros (dos quais ~ 300 eram do tipo OB) e ressaltaram que CygOB2 era muito massiva e extensa para ser classificada como aglomerado aberto e muito compacta para uma associação.

Na década de 70, com o surgimento dos primeiros detectores em infra-vermelho, Voelcker & Elsässer (1973) utilizaram essa banda para estudar a emissão circunstellar de 80 das estrelas OB do catálogo de Reddish et al. (1966) e constataram que a alta extinção na direção da associação era devido a sua localização em meio a uma densa nuvem de poeira, e não devido a existência de material circunstellar nesses objetos como acreditava-se até então.

Com o advento do CCD (Charge Coupled Device) houve um sensível aumento na facilidade de se obter medidas de regiões extensas do céu, com a eliminação de passos intermediários (como a digitalização de placas fotográficas), o que facilitou o processo de obtenção de magnitudes para várias estrelas simultaneamente e permitiu a realização de estudos comparativos mais precisos. Torres-Dodgen et al. (1991) usaram fotometria Strömgren e infra-vermelho no estudo de 80 objetos. Eles sugeriram uma idade mínima de 3 milhões de anos devido a presença de uma estrela do tipo espectral O3 e uma distância $d=1,7 \pm 0,2$ kpc para a associação. Massey & Thompson (1991) realizaram o primeiro estudo sumário da região usando fotometria CCD UBV de 799 estrelas e obtendo tipo espectral das 79 mais massivas e brilhantes, chegaram a um valor de distância de $d=1,74 \pm 0,08$ kpc e inclinação da

função de massa inicial $\Gamma = -1,0 \pm 0,1$ ⁴.

No fim dos anos 90 diversos *All Sky Surveys* (Levantamentos de céu inteiro) foram iniciados, Knödlseeder (2000) usou dados do então recém completo 2MASS (*Two Micron All-Sky Survey*) na realização do estudo mais conclusivo sobre CygOB2 até aquela época. Levando em conta a suposta alta extinção na direção da associação, ele argumentou que seu formato foi mal-compreendido por Reddish et al. e propôs uma geometria esfericamente simétrica de diâmetro $\sim 2^\circ$ e densidade central $\rho_0 = 40\text{-}150 M_\odot \text{pc}^{-3}$. No mesmo trabalho, Knödlseeder recenseou 8600 ± 1300 membros com tipo espectral anterior a F3V e 2600 ± 400 membros OB dos quais 120 ± 20 foram confirmados como tipo O. Finalmente, ele propôs que considerando a enorme massa ($(4\text{-}10) \times 10^4 M_\odot$), densidade e tamanho, CygOB2 deveria ser reclassificada como um aglomerado globular jovem como aqueles observados na Grande Nuvem de Magalhães, sendo o primeiro dessa classe encontrado na Galáxia. Posteriormente, Knödlseeder et al. (2002) reclassificaram CygOB2 como um superaglomerado similar àqueles observados no centro da Galáxia. Afim de confirmar tal classificação, Comerón et al. (2002) realizaram um levantamento espectroscópico de baixa resolução nas bandas H e K visando sumarizar as estrelas OB previstas e identificaram, assim, 77 candidatas à classificação de estrela OB. Destas, 31 já eram conhecidas e 14 foram posteriormente confirmadas por Hanson (2003).

Conforme sumarizado aqui, a maioria das observações e estudos concernindo a região focaliza apenas sua população de alta massa. Porém, o conhecimento e caracterização da população de massas intermediária e baixa são requeridos para a completa compreensão de qualquer associação estelar, incluindo CygOB2. Quando o assunto é a caracterização por variabilidade fotométrica, a carência de estudos desse tipo nessa região é ainda maior.

Pigulski & Kołaczowski (1998) realizaram o primeiro levantamento de variabilidade da região englobando somente os objetos tipo OB. Apenas muito recentemente o primeiro estudo em maior escala foi finalizado e Henderson et al. (2011) publicaram um levantamento de variabilidade nas bandas (R e I) de uma região de $\sim 0,5^\circ$ a partir do centro de CygOB2. Eles apresentaram 121 estrelas variáveis, das quais 27 eram candidatas a classificação de binárias eclipsantes, 52 candidatas a variáveis pulsantes e 20 possíveis estrelas Ae/Be de Herbig.

⁴Função de Massa Inicial (*Initial Mass Function*, IMF) é uma função empírica que descreve a distribuição de massas iniciais para uma população de estrelas. De forma simplificada a IMF pode ser pensada como uma função de probabilidade $\phi(m)$ de uma estrela ser formada com massa entre m e $m+dm$; essa função de probabilidade pode ser descrita como uma lei de potência $\phi(m) = Am^\gamma$, onde $\gamma = \Gamma - 1$ é a inclinação da IMF.

1.4 Objetivos

Propusemos a realização de um levantamento de variabilidade fotométrica em infravermelho próximo da população de massas baixa e intermediária de CygOB2; estudo este que é sem precedentes no que diz respeito a CygOB2 tanto pela banda escolhida (JHK) quanto pela extensão ($0,75 \text{ graus}^2$). Além disso, o mapeamento de variabilidade de uma região de formação estelar com idade de 3 milhões de anos pode servir para seleção de alvos para um futuro estudo de períodos de rotação como aqueles citados na Seção 1.2.

Essa dissertação de mestrado é fruto da primeira fase deste levantamento e está organizada da seguinte forma:

Capítulo 2: Apresentamos uma breve revisão da formação estelar, fundamental para compreensão dos fenômenos físicos com que estamos lidando. Revisamos também a taxonomia para classificação de estrelas variáveis jovens existente na literatura.

Capítulo 3: Descrevemos os dados utilizados no estudo, assim como os procedimentos para organização destes em forma de catálogo.

Capítulo 4: Descrevemos as técnicas para a análise de séries temporais empregadas na análise dos dados.

Capítulo 5: Apresentamos exemplos de objetos selecionados no catálogo como passíveis de classificação e os critérios de seleção.

Capítulo 6: Conclusões e perspectivas.

O estudo de estrelas variáveis fica limitado se tivermos em mãos apenas medidas de variação de brilho. Um estudo mais profundo requer outras informações como o tipo espectral, classe de luminosidade e composição química as quais a fotometria sozinha não é capaz de fornecer. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho não é fornecer classificação definitiva para as estrelas variáveis de CygOB2, mas sim encontrar quais são as estrelas variáveis da associação merecedoras de um estudo futuro mais profundo.

Capítulo 2

A Formação Estelar e a Variabilidade Fotométrica

Antes de mais nada devemos nos perguntar com que tipo de objeto iremos lidar. Torres-Dodgen et al. (1991) estudaram a população OB de CygOB2 e estimaram uma idade de ~ 3 milhões anos para a associação, assim não esperamos encontrar nenhuma *novae* ou estrela pós sequência principal, à exceção de objetos não pertencentes à associação projetados na mesma imagem. Além disso, comparamos qualitativamente os dados fotométricos em JHKL' do trabalho deles com os do presente trabalho. As estrelas OB por eles descritas tinham magnitudes (J,H,K) desde (4,39, 3,34, 2,75)¹ até (12,31, 11,84, 11,71)². Supondo que todas as estrelas OB da associação estão contidas nesse intervalo de magnitudes e como estes foram excluídos do presente trabalho por encontrarem-se saturados em nossas imagens, é razoável supor que não existam estrelas OB inclusas em nossos dados. Esta suposição exclui da nossa amostra a existência de variabilidade fotométrica típica de estrelas jovens do tipo espectral inicial (estrelas muito massivas) e nos leva às T Tauri e, possivelmente, às estrelas Ae de Herbig.

2.1 Formação Estelar

Estrelas são formadas a partir do colapso gravitacional de material interestelar, *i.e.*, a partir de gás e poeira existente entre as estrelas. Esse colapso requer que a força da gravidade supere as forças da pressão térmica, dos movimentos turbulentos e dos campos magnéticos da nuvem, assim, não é surpresa que formação estelar seja normalmente observada em nuvens

¹Objeto #12 naquele catálogo.

²Objeto R280 naquele catálogo.

moleculares densas e frias. A disputa entre gravidade e pressão térmica é descrita pelo teorema do Virial, o qual dita a condição de equilíbrio para um sistema estável, ligado gravitacionalmente: $2K + U = 0$, onde K é a energia cinética do gás e U é a energia potencial gravitacional.

À medida em que colapsa, a nuvem se fragmenta em nuvens menores hierarquicamente até que a massa de cada nuvem menor atinja massas estelares (Critério de Jeans). Parte da energia potencial liberada pelo gás colapsante é irradiada e parte é convertida em energia cinética geradora de fluxo de matéria. À medida em que a densidade aumenta e a nuvem vai se tornando opaca, a eficiência com que energia térmica é irradiada diminui fazendo com que a temperatura no interior da nuvem aumente, freando o colapso da região central da nuvem. Este caroço estelar final é o que dará origem à protoestrela.

Até chegar à protoestrela, uma nuvem molecular contrai um milhão de vezes em dimensões lineares (Hartmann 2009). Um dos conceitos mais básicos oriundos da física clássica é a conservação do momento angular. Graças a ele sabemos que devido a essa dramática (e rápida) redução de tamanho, qualquer pequena rotação da nuvem formadora produz uma protoestrela que gira muito rápido. Sabe-se que o momento angular observado em nuvens interestelares é muitas ordens de grandeza maior do que aquele do Sol e outras estrelas na SP (Lamm et al. 2005), por esse motivo os modelos de formação estelar inferem a existência de mecanismos transferidores de momento angular durante diversos estágios da evolução estelar. Entre tais mecanismos estão a formação de estrelas binárias (as quais durante a contração da nuvem transferem momento angular para o movimento orbital de uma estrela em torno da outra), a ejeção de matéria espiralando através de ventos estelares, a formação do disco circunstar e planetas, luas e todos os objetos que observamos girando em torno do nosso próprio Sol.

Como não estamos lidando com corpos rígidos, mas com fluidos em rotação, a nuvem irá se achatar formando um disco circulando o núcleo protoestelar que se formou no fim do colapso gravitacional. Isso ocorre por que a conservação do momento angular aumenta a velocidade linear e como a força da gravidade passa a prover a força centrípeta, a matéria da nuvem não mais cai no centro do colapso gravitacional e se estabiliza em uma órbita em torno do eixo de rotação. Na direção perpendicular ao eixo de rotação a matéria fica impedida de se aproximar mais do centro; já na direção paralela ao eixo de rotação não existe nada que a impeça de se aproximar o máximo possível do plano que passa pelo centro da estrela, fazendo com que a nuvem se achate nesse plano e forme um disco. Acredita-se que formar discos seja inerente à formação estelar; como não são comumente observados em estrelas muito massivas, estrelas duplas, ou estrelas em aglomerados muito condensados, supõe-se que esse disco se rompe muito rapidamente nesses tipos de objetos. O tempo de

duração do disco é uma das muitas particularidades da formação estelar que parecem ser controladas pela massa da estrela. Como estamos interessados em estrelas de massa pequena e intermediária, as características da formação de estrelas massivas fogem do nosso propósito e não serão tratadas aqui.

No núcleo, a frenagem do colapso gravitacional é feita essencialmente pela competição entre pressão térmica e gravidade. A princípio esse sistema disco+núcleo está embebido no interior da nuvem formadora e enquanto o disco sedimenta, parte do material da nuvem é acretaado direto no núcleo em formação. Nessa fase, a protoestrela é invisível no ótico e muito fraca no infra-vermelho; a maior parte da massa que constituirá a estrela está no disco, o qual se estende por várias unidades astronômicas³. No caso de uma estrela do tipo do Sol esse núcleo, que está praticamente em equilíbrio hidrostático, contém inicialmente apenas 1% da massa final da estrela (Larson 2003).

Inicialmente o disco é formado de gás com uma certa viscosidade, o que faz com que matéria perca velocidade e caia na direção da estrela. A medida em que essa matéria “cai” sobre a estrela, ela alcança uma região (entre o disco e o núcleo) onde interagirá com o campo magnético da estrela. Parte dessa matéria é capturada por linhas de campo e é ejetada perpendicularmente ao disco, formando jatos bipolares expelidores de material. O restante do material é canalizado até a superfície da estrela.

De acordo com alguns modelos (Stahler et al. 1980; Stahler 1983), por volta de cem mil anos, a maior parte do casulo de poeira já foi depositada no disco ou no núcleo da protoestrela e o objeto se torna opticamente visível. A partir desta fase esses objetos são conhecidos como estrelas T Tauri (ETT), caso tenham massas menores ou igual a $2M_{\odot}$ ou como estrelas Ae/Be de Herbig (estrelas HAeBe), caso tenham massas entre $2 - 8M_{\odot}$. Apesar de já serem visíveis, seu centro ainda não é quente o suficiente para começar as reações nucleares que produzirão energia via fusão de hidrogênio em hélio durante todo o seu caminho pela sequência principal. O termo pré-sequência principal (PSP) faz referência tanto à essa falta de temperatura no centro quanto ao fato da estrela ainda não ter contraído aos tamanhos típicos de estrelas da sequência principal.

O mecanismo primário de brilho desses objetos é o processo de contração, onde energia gravitacional é convertida em energia térmica, parte da qual é irradiada. Uma estrela como o Sol demora 30 milhões de anos para chegar à sequência principal. A fase T Tauri clássica, porém, é muito mais curta e dura de 1 a 10 milhões de anos.

O assunto da acreção de matéria na protoestrela foi extensamente debatido nas últimas décadas e uma boa referência ao assunto pode ser encontrada em Hartmann (2009). Para

³Unidade Astronômica (UA), é a distância média entre a Terra e o Sol. $1UA=149597870700m$

uma abordagem física mais profunda das teorias vigentes de formação estelar, uma boa revisão é aquela feita por Larson (2003).

2.2 Estrelas T Tauri

Apesar de ETTs terem sido primeiramente identificadas como uma classe de objetos com variabilidade fotométrica irregular, sua definição formal é feita em termos de características espectroscópicas como possuir um espectro frio⁴, excesso de emissão contínua (UV e infra-vermelho), determinadas linhas de emissão muito fortes (*e.g.* $H\alpha$) e linhas fortes de lítio (indicadoras de juventude).

Podemos resumir uma ETT como uma estrela PSP com um alto grau de atividade magnética superficial (a qual produz grandes manchas e alguma emissão cromosférica), localizada no centro de um disco, o qual acreta matéria na estrela. Esse disco é responsável por excesso no infra-vermelho e a acreção é responsável por excessos no azul, ultra-violeta e por ventos estelares (Herbst et al. 1994). ETTs com todas essas características são comumente referidas na literatura como estrelas T Tauri clássicas (ETTC) (Figura 2.2 na página 14 mostra um diagrama esquemático de ETTC.); ETTs cujo disco é reduzido e não apresentam sinais de acreção (linhas de $H\alpha$ menos largas) são comumente referidas como estrelas T Tauri (de linhas) fracas (ETTF) (Figura 2.1 na página 13 mostra um diagrama esquemático de ETTF.)⁵. Segundo o entendimento atual, ETTFs correspondem a um estágio posterior de evolução às ETTCs onde o processo de acreção já terminou, mas a estrela ainda exibe bastante atividade magnética na superfície. O estágio seguinte é conhecido como pós estrelas T Tauri (PETT) e apresentam pouca ou nenhuma variabilidade no óptico, apesar de serem fortes fontes de raio X.

2.2.1 Variabilidade Fotométrica em Estrelas tipo T Tauri

A principal referência para a classificação de estrelas variáveis é o Catálogo Geral de Estrelas Variáveis (GCVS, *General Catalogue of Variable Stars*) (Samus et al. 2009)⁶ o qual contém taxonomia e diversas informações para 45678 estrelas variáveis com classificação definida até 2009. Segundo ele, ETTs são classificadas primariamente como variáveis eruptivas irregulares (I), podendo pertencer aos subgrupos: (N) em caso de estrelas associadas a nebulosidades (como as inúmeras ETTs da Nebulosa de Orion), (T) caso apresentem as

⁴Espectro frio se refere ao espectro de estrelas com temperaturas superficiais entre 2000–10000K

⁵Uma subtipo das ETTF são as T Tauri “Nuas” (ETTN), nas quais o disco já se dissipou e, consequentemente, o excesso no infra-vermelho diminui.

⁶Disponível online em <http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/iii/vartype.txt>

características espectrais de um ETT e (a) ou (b) caso tenham tipo espectral de estrelas quentes ou frias. Esse esquema de classificação, além de não ter muita relevância física, reflete um pré-conceito existente na literatura de que estrelas jovens serão sempre variáveis irregulares. Livros clássicos em estrelas variáveis como Hoffmeister et al. (1985) e Sterken & Jaschek (1996), provavelmente por serem contemporâneos aos primeiros estudos no assunto, suprimem o *fillo* das estrelas jovens e, como o GCVS, as classifica taxativamente como uma classe variáveis eruptivas.

Períodos são encontrados em estrelas T Tauri desde a primeira década de estudo de tais objetos, a existência deles não é inesperada desde que sejam explicados pela existência de componentes binários, devido às superfícies manchadas somadas à rotação (Percy 2007) ou ainda devido a extinção por material circunstelar. Trabalhos pioneiros como os realizados por Bouvier et al. (1986) e Herbst et al. (1994) mostraram que além de variabilidade periódica ser mais comum entre ETTs do que antes pensado, elas ocorrem quase sempre devido a manchas e rotação.

Herbst et al. (1994) e Bouvier et al. (1995) desenvolveram uma forma de classificar tais objetos de acordo com a física causadora da variabilidade, um sumário da variabilidade fotométrica em ETTs conforme proposto por eles será apresentado a seguir, complementado por duas outras classes sumarizadas por Herbst et al. (2007) numa revisão sobre rotação de estrelas de baixa massa.

Tipo I: Manchas frias

Ocorrência: Mais frequente em ETTFs (ainda assim encontrada em algumas ETTCs).

Causa: Manchas frias são análogas às manchas solares (porém muito maiores em relação à área do objeto). Quando persistem por algum tempo, causam variabilidade fotométrica periódica como decorrência da rotação da estrela.

Características: Essas manchas costumam cobrir até 40% da superfície estrela para radiação infra-vermelha, no caso de estrelas da massa solar. Quando estudadas em comprimentos de onda mais azuis como U e B, tal variabilidade pode misturar-se com os efeitos da fulguração e passar despercebidas.

Configuração: Variações cíclicas com escala temporal indo de 0,5 a 18 dias. Curvas de luz quase senoidais.

Amplitudes: Amplitudes típicas de 0,03 – 0,3 magnitude em V, chegando a valores máximos de 0,8 magnitudes em V e 0,5 magnitudes em I.

Persistência: A amplitude e formato dessas variações geralmente evoluem em escalas temporais de meses a anos, mas os períodos permanecem estáveis.

Existem evidências que ETTs do Tipo I que ainda apresentam disco tendem a rodar mais devagar devido ao trancamento por disco. O entendimento desse fenômeno, conforme colocado na Seção 1.2, é um dos principais motivos para a busca por ETTs com variabilidade periódica. Outro resultado importante do estudo de Herbst et al. (1994) (e muito relevante no presente trabalho) é que a amplitude das oscilações de brilho decresce para comprimentos de onda maiores, o que é explicado por existir menos contraste entre a mancha fria e a fotosfera nos comprimentos de onda mais longos.

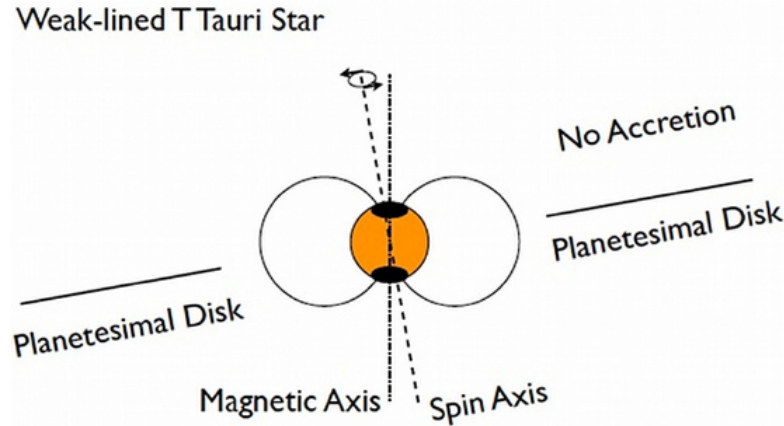


Figura 2.1: Diagrama esquemático de uma ETTF mostrando que nesse caso existe pouco (ou nenhum) gás fluindo do disco de acreção para a estrela. Portanto, grande parte da variabilidade irregular desaparece nessas estrelas, mas elas continuam apresentando variabilidade periódica de, tipicamente, 0,03–0,3 magnitudes em V, causadas pela rotação modulada pela superfície manchada. Para ETTFs normalmente é possível determinar o período de rotação, uma vez que as manchas distribuídas em sua superfície permanecem estáveis por muitos meses ou até anos. (Figura extraída de Herbst (2012)).

A Figura 2.1 mostra de forma bem simplificada o processo de modulação por rotação de ETTFs devido a existência de manchas frias.

Tipo II: Variação irregular

Ocorrência: Mais comum em ETTs.

Causa: Variação na taxa de acreção de matéria somada à rotação da estrela provocam surgimento de manchas quentes na superfície da estrela. Como a taxa de acreção é irregular, essas manchas são irregulares e mutantes.

Características: Manchas pequenas com temperaturas típicas de 10000K cobrindo 0,3% da estrela ou menos.

Configuração: Geralmente variações irregulares com escala temporal de horas.

Amplitudes: Na ordem de uma magnitude em V, chegando a valores máximos de 2,6 mag em V e 1,6 mag em I.

Predição: A variação do brilho é correlacionada com o grau de velamento⁷ do espectro.

Tipo IIp - Manchas Quentes: Em alguns casos a escala temporal da variação Tipo II é maior que o período de rotação da estrela e ocorre modulação da curva de luz devido a rotação. As amplitudes são geralmente maiores que 0,8 magnitudes até mesmo em I. O caráter periódico dura poucos ciclos.

O protótipo dessa classe é a própria T Tauri, a qual apresentou variações estáveis com período de 2,8 dias durante uma temporada de observações. A Figura 2.2 mostra de forma bem simplificada o processo de modulação por rotação de ETTCs devido a existência de manchas quentes.

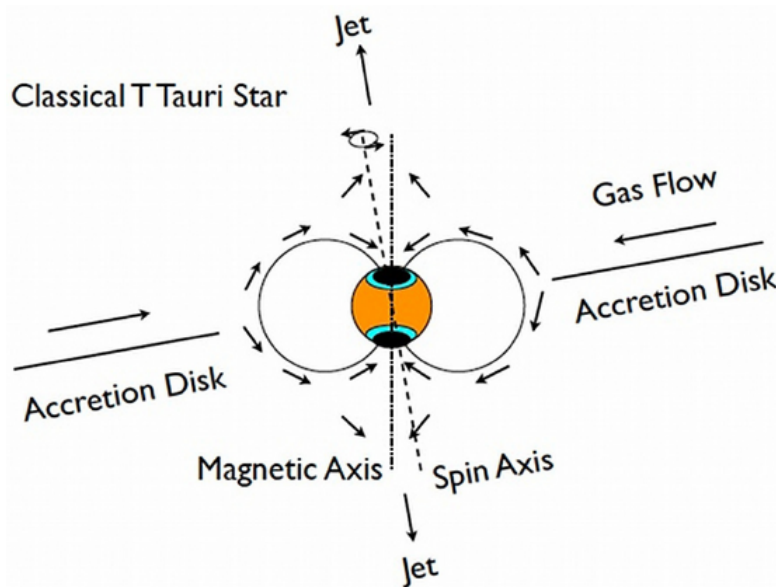


Figura 2.2: Diagrama esquemático de uma ETTC mostrando o fluxo do gás saindo do disco de acreção através de jatos para o meio interestelar ou na direção da estrela, através de seu polo magnético. As manchas escuras nos polos são resultado do rompimento do transporte convectivo de energia pelos campos magnéticos, similares às manchas solares. Os anéis azuis em torno das manchas representam partes da fotosfera aquecida pelo gás acretado. O pequeno desalinhamento entre eixos de rotação e magnético implicam em variabilidade periódica da estrela, já que vemos diferentes partes dessa inhomogeneidade da superfície de cada vez (Figura extraída de Herbst (2012)).

Tipo III: Variações irregulares devido a ocultações - UXOri

Ocorrência: Observada em Estrelas HAeBe e ETTCs.

Causa: A causa ainda é debatida, mas aparentemente a variabilidade ocorre devido a obscurecimento por material circunestelar. Em alguns objetos é uma mistura de

⁷Velamento do espectro é a diluição ou ausência de linhas de absorção no espectro causada pela superposição de dois contínuos como, por exemplo, o contínuo da estrela + contínuo da mancha.

aquecimento devido a acreção somada a obscurecimento.

Características: Assimétricas: declínios de magnitude mais rápidos que a restauração. Observa-se polarização em alguns casos.

Configuração: Variações irregulares em escala temporal de dias ou semanas (geralmente mais longas que no Tipo II). A magnitude média varia em escala de anos.

Amplitudes: Tipicamente menor que uma magnitude, mas são observadas amplitudes maiores que 2,8 magnitudes em algumas estrelas.

Predição: Aperiódicas.

Tipo IV: Variáveis Amplamente Eruptivas - FUors Grupo não muito extenso de ETTs onde foram observados eventos de erupção responsáveis por aumentar o brilho do objeto em várias magnitudes, mantendo seu brilho elevado por alguns meses, ou até mesmo anos.

Tipo V: Variáveis Eruptivas Moderadas - EXors Grupo de ETTs com erupção similar àquela das FUors, porém em escalas menores.

Tipo VI: Variáveis Periódicas do tipo KH 15D O protótipo é a estrela KH 15D (Kearns & Herbst 1998), que apresenta curvas de luz de grande amplitude e estritamente periódica. Tal comportamento é explicado pelo objeto ser um sistema binário de ETTs confinadas num disco circumbinário o qual oculta periodicamente uma, ou ambas as componentes.

As três últimas classes foram estabelecidas recentemente e poucos exemplares foram estudados, tal que ainda carecem de descrições mais analíticas, como as das três primeiras classes.

Como o esquema de classificação *per se* indica, comportamento periódico é mais comumente encontrado em ETTFs, uma vez que estas já não apresentam grande parte da variabilidade irregular das ETTCs. Quando periódicas, possuem períodos mais longos do que o de estrelas pulsantes, além de não serem observadas variações em velocidade radial.

2.3 Uma coletânea Taxonômica para Estrelas Jovens

O GCVS apresenta dois grandes grupos segundo o caráter da variabilidade: intrínsecas e extrínsecas, e os divide em 7 subgrupos de acordo com a natureza da variação (além de um oitavo grupo, para estrelas que não se enquadram nos anteriores):

Extrínsecas: Eclipsantes, Rotação ou Eventos de Micro-lente.

Intrínsecas: Pulsantes, Eruptivas, Cataclísmicas ou Raio X.

2.3.1 Mecanismos Físicos da Variabilidade Fotométrica

Hall (1995) criticou o sistema de classificação do GCVS argumentando que este falha em classificar as estrelas segundo o mecanismo físico causador da variabilidade, *e.g.*, emissão de raio X *per se* não diz nada sobre a causa da emissão (Hall 1995). Outro exemplo dessa falha é a classificação incompleta dada às estrelas tipo T Tauri, discutida na seção anterior. Apesar de não ser uma taxonomia em vigência, o esquema proposto por Hall é elucidante e um bom resumo dos mecanismos físicos causadores de variabilidade e por isso será apresentado a seguir.

Os mecanismos físicos responsáveis pela variabilidade fotométrica em estrelas segundo Hall (1995)⁸, são:

1. Eclipses
 - (a) Num sistema binário
 - (b) Por poeira exterior à estrela
 - (c) Ocultação por um planeta, asteroide, lua
 - (d) Microlente gravitacional causada por uma estrela muito próxima
2. Pulsação
 - (a) Radial ou não-radial
 - (b) Uni-periódica ou multi-periódica
 - (c) Modos p ou modos g.
3. Rotação
 - (a) Formato não esférico = efeito de achatamento (formato elipsoidal)
 - (b) Distribuição superficial de brilho assimétrica longitudinalmente
 - i. Por efeito de reflexão em um sistema binário
 - ii. Por manchas nos polos magnéticos devido a estrela possuir campos magnéticos intensos.
 - iii. Por manchas frias em estrelas convectivas com mecanismo de dínamo forte
 - iv. Por manchas quentes
4. Ciclos magnéticos como o ciclo de 22 anos das manchas solares
5. Supergranulação

⁸Note que os tipos de variabilidade observados em ETTs, descritos na seção anterior, estão incluídos na classificação proposta por Hall.

6. Eruptiva = liberação de energia ou movimento de matéria transientes
 - (a) Envolvendo toda a estrela = supernova
 - (b) A partir da superfície da estrela
 - i. Via explosão nuclear
 - ii. Via explosão magnética = fulguração
 - iii. Ejeção de matéria causada por rotação muito rápida
 - iv. Ejeção de matéria causada por outro mecanismo, e.g., pressão de radiação
 - (c) Queda de matéria = acreção
 - i. A partir de outra estrela em um sistema binário
 - ii. A partir de um disco circunstelar

Ciente do caráter descritivo do GCVS, a Associação Americana de Observadores de Estrelas Variáveis (AVVSO, *American Association of Variable Star Observers*) disponibiliza online o Índice Internacional de Estrelas Variáveis (VSX, *Variable Star Index*) (Watson et al. 2009) que descreve todos os tipos de estrelas variáveis contidas no GCVS, complementados por variáveis de outros levantamentos existentes na literatura.

Tendo sempre em vista que estamos trabalhando com uma região de formação estelar, serão apresentados no restante da presente Seção os índices do VSX apropriados ao presente trabalho. Uma associação dos mesmos ao sistema de classificação proposto por Herbst apresentado na seção anterior também será feita.

2.3.2 Variabilidade Extrínseca

Variabilidade extrínseca é causada pelo eclipse ou ocultação por algum outro objeto sobre a estrela ou devido a modulação da rotação estelar por algo que não dependa de sua estrutura interna (e.g., manchas em sua superfície) . Comporta os subgrupos:

I-Eclipsantes

(E) Binárias Eclipsantes: Estrelas binárias cujo plano orbital é muito próximo da linha de visada do observador. As mudanças de brilho são observadas na curva de luz composta pelo brilho das duas (ou mais) componentes do sistema. Uma estrela periodicamente eclipsa a outra, causando variabilidade no brilho composto. A duração e profundidade dessa variação dependerá do tamanho, temperatura e luminosidade das componentes. A evolução das componentes depende da proximidade entre elas. No caso de binárias próximas existirão forças de maré (que fazem com que a estrela tenha forma elipsoidal), efeitos de reflexão e troca de matéria entre elas; todos eles sendo fenômenos

causadores de variabilidade além do eclipse. Segundo o GCVS existem três tipos de binária eclipsante:

- (EA) Sistema Binário tipo Algol: Fora do eclipse a curva de luz é praticamente plana, variando apenas devido a efeitos de reflexão quase insignificantes. É possível saber exatamente, a partir da curva de luz, o momento de início e fim dos eclipses. Períodos variam de 0,2d até 10000d.
- (EB) Sistema Binário tipo β -Lyrae: Curva de luz varia continuamente entre os eclipses. Componentes são elipsoidais e é impossível determinar através da curva de luz quando começa ou termina um eclipse. Sempre existe um mínimo secundário (sendo ele visivelmente menor em profundidade). Períodos são maiores do que 0,5d e geralmente as componentes são do tipo espectral B-A.
- (EW) Sistema Binário tipo W-Ursae Majoris: Binárias muito próximas com períodos menores que 1d e componentes muito elipsoidais. Não é possível determinar onde começa e termina um eclipse e eles possuem profundidade muito parecida.

Parece razoável estender o tipo (E) do GCVS para objetos que apresentam variabilidade tipo eclipse, independente dele ser causado por outra estrela. Nesse caso, as seguintes subcategorias extras são possíveis:

- (EP) Estrelas com planetas: Apresentam eclipse devido ao trânsito de planetas.
- (ET) Estrela tipo TTauri com eclipses devido ao disco, ou grumos de poeira: Equivalente ao Tipo VI da classificação proposta por Herbst.

II-Rotação:

(ELL) Elipsoidal: Variáveis elipsoidais de rotação. São sistemas binários próximos com componentes elipsoidais. Exibem variabilidade no brilho combinado com períodos iguais aos períodos orbitais devido a mudanças na área das componentes direcionadas à linha de visada do observador. Não são eclipsantes.

(ROT) Rotação Modulada por Mancha: O brilho da estrela não é homogêneo na superfície. Efeito de reflexão é exclusivo de estrelas binárias. Manchas quentes devido a colisão de gás quente na superfície da estrela podem ser observadas tanto em binárias como em estrelas pré sequência principal.

No caso de estrelas jovens, comporta os subtipos propostos por Herbst:

- Tipo I de Herbst ou (ETTF/ROT): Para rotação modulada por mancha fria em estrela T Tauri Fraca.

- Tipo IIp de Herbst ou (ETTC/ROT): Para rotação modulada por mancha quente em estrela T Tauri Clássica.

2.3.3 Variabilidade Intrínseca

Variabilidade intrínseca é causada diretamente por mudanças físicas estruturais na estrela. Comporta os subgrupos:

III- Pulsação:

Variabilidade causada pela contração e expansão da estrela. Existem tipos de estrela pulsantes muito bem estudados, principalmente em se tratando de estrelas pós sequência principal, porém, quando o assunto são estrelas PSP, é uma área pouco aprofundada. Marconi & Palla (2003) ressalta que encontrar periodicidade devido a pulsação em estrelas PSP é mais provável em objetos mais maduros, onde o processo de acreção não é mais ativo. Eles também apresentam um estudo que visa determinar a localização de estrelas jovens tipo δ Scuti no diagrama HR.

- (DSCT): Variáveis do tipo δ Scuti são variáveis pulsantes com tipo espectral intermediário. As amplitudes vão de 0,003 – 0,9 magnitudes em V e períodos de 0,01 a 0,2 dias. No caso de exemplares PSP.
- (GDOR): Variáveis tipo γ Doradus são variáveis pulsantes de tipo espectral intermediário com modo g de pulsação não-radial. As amplitudes não excedem 0,1 magnitudes e usualmente apresentam períodos no intervalo 0,3 – 3,0d.

A natureza rápida da variabilidade dessas estrelas pulsantes tornam sua detecção improvável no presente trabalho.

IV- Eruptivas:

A variação em brilho em objetos jovens é causada por processos violentos e fulguração ocorrendo na cromosfera e coroa da estrela. As mudanças de brilho geralmente são seguidas por eventos de expulsão de casca, ou ejeção de massa na forma de vento estelar de intensidade variável e/ou interação com o meio interestelar ao redor. Comporta os subtipos:

(FUOR), ou Tipo IV de Herbst: Estrelas tipo T Tauri com erupções intensas. Protótipo: FU Orionis.

(EXOR), ou Tipo V de Herbst: Estrelas tipo T Tauri que apresentam erupção moderada. Protótipo: EX Orionis.

- (I) Variáveis irregulares pouco estudadas, *i.e.*, as observações são insuficientes para a classificação e tampouco o tipo espectral é sabido.

2.4 Observações Pertinentes à Aplicação da Taxonomia

É importante ressaltar que uma estrela pode apresentar múltiplos tipos de variabilidade. Uma estrela binária pode ter a componente principal pulsando da mesma forma que uma estrela pulsante pode apresentar mais de um modo de vibração e, devido a isso, múltiplos períodos.

Devido à idade de CygOB2, espera-se que a maior parte da variabilidade fotométrica periódica seja devida à presença de manchas. Dentre os dois tipos possíveis de mancha, usamos a estacionariedade como critério de seleção.

Todas as classificações sugeridas no restante deste trabalho são provisórias no sentido em que um estudo dos objetos no diagrama HR e estudos espectroscópicos são requeridos para uma classificação definitiva.

Capítulo 3

O Material Observacional

3.1 Aquisição de Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos entre Abril e Novembro de 2007 através da *Wide Field Camera* (WFCAM), atualmente instalada no UKIRT (*United Kingdom Infrared Telescope*), um telescópio de 3,8 metros localizado no Manua Kea, Havaí. Foram realizadas exposições de dois segundos, de modo que foram necessários apenas alguns minutos de tempo de telescópio em cada uma das 109 noites observadas.

A WFCAM é um dos mais poderosos instrumentos para levantamento fotométrico em infra-vermelho próximo existentes no mundo. É composta por quatro detetores Rockwell Hawaii-II (HgCdTe 2048×2048px). Cada um cobre uma área de 0,052 graus quadrados e é dividido em quatro quadrantes de 1k×1k px, com oito linhas de leitura de 128×1k px por quadrante. O espaçamento cada dois detetores é de 94% a área de um detector. Com isso, 4 observações são o suficiente para cobrir 0,75 graus quadrados do céu. A escala de pixels é 0,4" e a razão focal, f/2,4 (Casali et al. 2007)¹. A Figura 3.1 mostra o plano focal da WFCAM. No detector número 1 são mostrados os quadrantes e linhas de leitura.

Para prover material para estudos de extensos campos do céu, a WFCAM processa uma quantidade imensa de dados por noite (tipicamente são 200Gbytes por noite). Para que seja viável, a aquisição de dados funciona em paralelo com um *summit pipeline* que realiza a redução quase simultânea dos dados incluindo subtração do céu, subtração de campo plano, detecção e parametrização dos objetos, geração de um catálogo e calibração com objetos do 2MASS. Por fim os dados são enviados ao CASU (*Cambridge University Astronomical Survey Unit*), onde é feita a redução final e a remoção de assinaturas instrumentais.

O UKIRT atualmente trabalha com o sistema fotométrico ZY JHK (Hewett et al. 2006).

¹Veja <http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT/instruments/wfcam> para mais informações sobre a WFCAM.

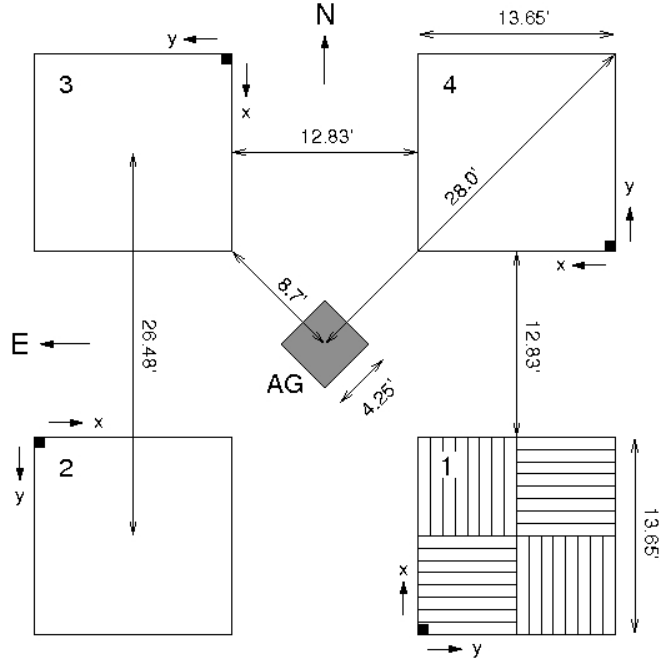


Figura 3.1: Detalhes do plano focal da WFCAM. O losango ao centro é o autoguiador do CCD. Figura extraída de <http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT>

Para o nosso levantamento, foi utilizado apenas o conjunto de filtros de banda larga JHK (comprimentos de onda centrais: 1,25, 1,63, e 2,20 μm respectivamente). Um gráfico da banda de transmissão dos filtros é mostrado na Figura 3.2.

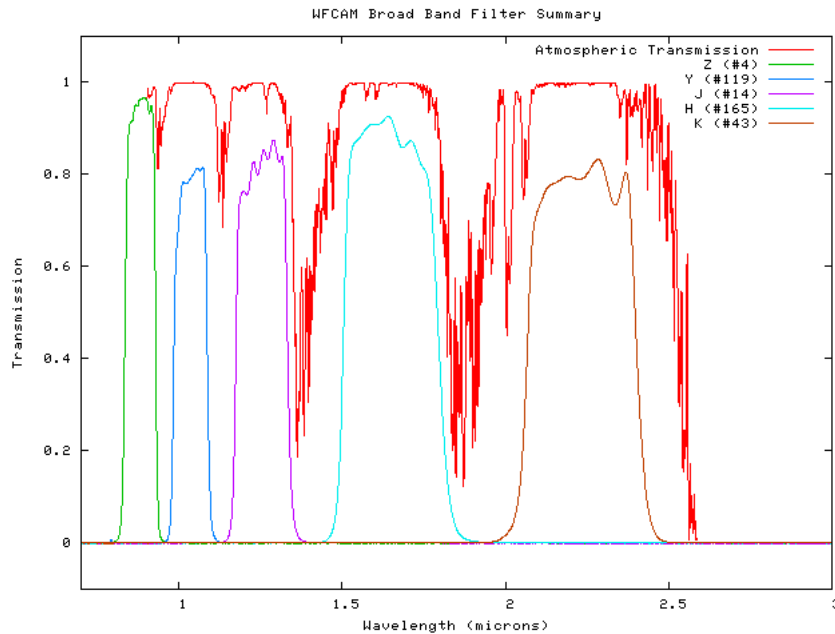


Figura 3.2: Curva de transmissão do sistema fotométrico utilizado no UKIRT. Figura extraída de <http://jach.hawaii.edu/UKIRT>

A relação completa das noites observadas encontra-se na Tabela 3.1. Tivemos acesso aos catálogos finais produzidos pelo CASU em Janeiro de 2008. Mais informações sobre os dados

podem ser encontrados nas seções 4.2 e 5.2 da tese de doutorado de Guimarães (2008).

Abril	01 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 25 26 27 28 29 30
Maio	01 02 04 05 06 07 09 10 11 14 18 19 20 21
Agosto	04 05 06 07 08 09 10 11 12 18 19 20* 21 22 23 24 26 27 28 30 31
Setembro	12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24* 25 29 30
Outubro	01 02 03 04 06 07 08 09 10* 11 12 13 14 15 16 17 19 20 21 22 24 25 26 27 28 29 30 31
Novembro	02 03

Tabela 3.1: Datas das observações de CygOB2 realizadas em 2007 e utilizadas no presente trabalho. Nas datas marcadas com * foram realizadas 2 sequências de medidas na mesma noite.

O esquema de observação utilizado pela WFCAM consiste em realizar quatro exposições variando-se a coordenada central entre cada uma. A Figura 3.3 ilustra esse esquema: Cada exposição é designada por uma das letras a, b, c e d, enquanto cada CCD é designado pelas letras w, x, y e z. Devido a imensa quantidade de fontes pontuais registradas nos catálogos do CASU (mais de 10000 objetos por área), decidimos estudar uma região de cada vez. A região analisada e estudada nessa dissertação é a exposição c detector y e está em destaque na Figura 3.3. Escolhemos esta região para iniciar o estudo de CygOB2, pois ela contém o centro da associação (RA: 20h 33m10s, DEC: +41° 12').

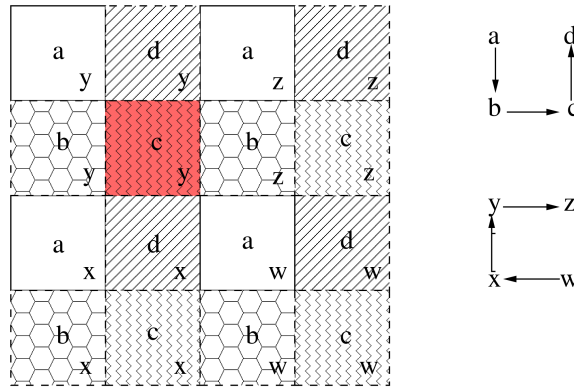


Figura 3.3: Esquema de leitura da WFCAM. A região estudada no presente trabalho é a c-y e aparece em destaque na figura. Figura extraída de Guimarães (2008).

3.2 Organização do Catálogo

Logo que recebemos os catálogos ficou claro que, para atingir o objetivo de construir curvas de luz, era necessário reorganizá-los. Isto por que a redução e geração do catálogo do CASU é feita noite a noite e com isso o objeto #1 na primeira noite não é necessariamente o objeto #1 nas noites seguintes.

Os catálogos produzidos pelo CASU vieram em tabelas binárias FITS (uma tabela por exposição, por noite). Cada tabela contém 80 colunas com parâmetros relevantes. Utilizamos a rotina `ftab\_ext.pro` do IDL ASTRO para lê-las e o conteúdo delas é descrito abaixo.²

Field	Name	Unit	Content
1	Sequence_number	Number	Número de catálogo. Segue a ordem de detecção na imagem.
2	Isophotal_flux	ADU	Definição padrão do fluxo somado dentro da isofota de detecção, além do filtro utilizado, é utilizada para definir a conectividade de elementos de imagem e, portanto, quais elementos incluir.
3	X_coordinate	Pixels	Centro de gravidade em X calculado pela intensidade isofotal ponderada.
4	X_coordinate_err	Pixels	Estimativa do erro do centróide.
5	Y_coordinate	Pixels	Centro de gravidade em Y calculado pela intensidade isofotal ponderada.
6	Y_coordinate_err	Pixels	Estimativa do erro do centróide.
7	Gaussian_sigma	Pixels	Derivada a partir dos três segundos momentos da intensidade ponderada. A equivalência para uma distribuição Gaussiana elíptica é usada para derivar: $\$Gaussian_sigma = (\$Sigma_a^2 + \$Sigma_b^2)^{1/2}$
8	Ellipticity	Number	Elípticidade= $1,0 - sigma_a/sigma_b$
9	Position_angle	Degrees	ângulo de posição=ângulo do eixo maior da elipse em relação ao eixo x
10 - 16	Areal_n_profile n=1,7	Pixels	Número de pixels acima de uma série de níveis de limiar em relação ao céu local. Os níveis são fixados em T, 2T, 4T, 8T ... 128T onde T é o limite.
17	Areal_8_profile	Pixels	Para imagens misturados este parâmetro é utilizado para sinalizar o início da sequência de componentes desmisturados, definindo o primeiro na sequência como 0.
18	Peak_height	ADU	Na contagem em relação ao valor local de céu - inclui fluxo de abertura ordem zero
19	Peak_height_err	ADU	
20	Aper_flux_n	ADU	Fluxo fitado dentro de 1/2* do raio do núcleo
21	Aper_flux_n_err	ADU	Erro do anterior
22	Aper_flux_2	ADU	Fluxo fitado dentro de 1/sqrt(2)* raio do núcleo
23	Aper_flux_2_err	ADU	Erro do anterior
24	Aper_flux_3	ADU	Fluxo fitado dentro de 1* do raio do núcleo
25	Aper_flux_3_err	ADU	Erro do anterior
26	Aper_flux_4	ADU	Fluxo fitado dentro de sqrt(2)* do raio do núcleo
27	Aper_flux_4_err	ADU	Erro do anterior
28	Aper_flux_5	ADU	Fluxo fitado dentro de 2* do raio do núcleo
29	Aper_flux_5_err	ADU	Erro do Anterior
30	Aper_flux_6	ADU	Fluxo fitado dentro de 2*sqrt(2) do raio do núcleo
31	Aper_flux_6_err	ADU	Erro do anterior
32	Aper_flux_7	ADU	Fluxo fitado dentro de 4* do raio do núcleo
33	Aper_flux_7_err	ADU	Erro do anterior
34	Aper_flux_8	ADU	Fluxo fitado dentro de 5* do raio do núcleo
35	Aper_flux_8_err	ADU	Erro do anterior
36	Aper_flux_9	ADU	Fluxo fitado dentro de 6* do raio do núcleo
37	Aper_flux_9_err	ADU	Erro do anterior
38	Aper_flux_10	ADU	Fluxo fitado dentro de 7* do raio do núcleo
39	Aper_flux_10_err	ADU	Erro do anterior
40	Aper_flux_11	ADU	Fluxo fitado dentro de 8* do raio do núcleo
41	Aper_flux_11_err	ADU	Erro do anterior
42	Aper_flux_12	ADU	Fluxo fitado dentro de 10* do raio do núcleo
43	Aper_flux_12_err	ADU	Erro do anterior
44	Aper_flux_13	ADU	Fluxo fitado dentro de 12* do raio do núcleo
45	Aper_flux_13_err	ADU	Erro do anterior
46	Petr_radius	Pixels	
47	Kron_radius	Pixels	
48	Hall_radius	Pixels	
49	Petr_flux	ADU	
50	Petr_flux_err	ADU	
51	Kron_flux	ADU	
52	Kron_flux_err	ADU	
53	Hall_flux	ADU	
54	Hall_flux_err	ADU	
55	Error_bit_flag	Number	Bit sinalizador de diversos erros de processo.
56	Sky_level	ADU	Nível de céu local interpolado a partir do rastreador de fundo
57	Sky_rms	ADU	Valor eficaz do céu local em torno da imagem
58	Parent_or_child	Number	Flag for main or part of deblended deconstruct
59	RA	RADIANS	Ascensão Reta
60	DEC	RADIANS	Declinação
61	Classification	Flag	Indicador da classificação morfológica mais provável para o objeto.
62	Statistic	N-sigma	
63 a 80	Blank		Em branco

²Descrições completa das variáveis e comentários podem ser encontrados em Hodgkin et al. (2009)

3.2.1 UKP83

Optamos por dividir o catálogo original em dois catálogos distintos: um chamado **corrds** contendo dados astrométricos, outro chamado **dadjhk** contendo dados fotométricos. A Figura 3.4 ilustra a estrutura interna dos dois catálogos. Para transforar o catálogo original nos dois novos foi desenvolvida uma rotina em IDL cuja versão final foi chamada **ukp83.pro**.

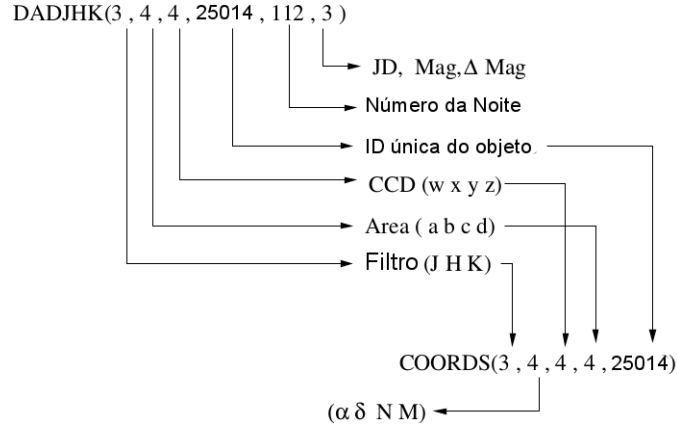


Figura 3.4: DADJHK e COORDS, tabelas contendo os dados fotométricos e astronômicos. Figura extraída de Guimarães (2008).

Antes de mais nada, foi necessário um critério de seleção, já que nem todos os objetos contidos no catálogo do CASU eram objetos estelares. O campo 61 denominado **Classification**, fornece a classificação dada aos objetos durante a redução. Os valores possíveis são: “0”, para ruído; “−1” para objeto estelar; “1” não é objeto estelar; “−2” objeto no limite entre estelar e não estelar e “−9” objeto saturado. Essa classificação automática, porém, logo se mostrou sujeita a falhas e, portanto, não poderia ser utilizada como critério único de seleção. Terminamos por desenvolver uma rotina semiautomática na qual objetos marcados como estelar eram aceitos automaticamente e os outros eram avaliados pelo usuário segundo outros critérios (*e.g.*, imagem tridimensional das contagens no CCD).

Outra dificuldade para o processo de classificação e ordenamento dos objetos foi a qualidade da noite. Entre outros fatores, destacamos o *seeing*³ que varia noite a noite influenciando diretamente o número de objetos detectados. A primeira noite em ordem cronológica (01/04/2007) continha 13038 registros no filtro K, a segunda (03/04/2007)⁴ apenas 4154. Para aumentar a eficiência do processo, decidimos começar o catálogo pela noite 25 (27/04/2007) – que foi considerada a melhor noite e continha 25417 registros em K – e depois seguir a ordem cronológica.

O **ukp83** segue basicamente dois procedimentos. O procedimento seguido na primeira

³*Seeing* diz respeito à qualidade das condições de observação induzidas pela turbulência na atmosfera terrestre a qual causa deformações nas imagens de objetos astronômicos.

⁴A noite 03/04/2007 tinha *seeing* 8,39, enquanto a melhor noite, 27/04/2007, tinha *seeing* 2,173

noite é descrito no fluxograma da Figura 3.5. Utilizando-se a noite 25, filtro K, constrói-se um catálogo base: carrega-se o catálogo do CASU e para cada objeto lê-se o parâmetro **Classification**. Se ele é igual a “-1” aceita-se o objeto automaticamente. Caso contrário, ele é marcado na imagem por um círculo com um segundo de arco de raio, centrado na coordenada do objeto; visualiza-se de forma dinâmica as contagens fotométricas da região, de todas as direções; imprimem-se os parâmetros fotométricos (magnitude no filtro em questão e sua incerteza), astrométricos (coordenadas e incerteza) e o parâmetro **Classification**. O operador pode investigar os dados de forma ampla, variando a tabela de cores de visualização (*Look Up Table*, ou LUT), ampliando a visualização dinâmica tridimensional das contagens e analisando os números da medida. Cabe ao operador decidir entre aceitar ou não o objeto. A todo objeto aceito é atribuído um novo número de catálogo (ID), os rejeitados são armazenados numa matriz denominada **delcoo**, cuja função é manter uma base de dados de posições no céu com medidas que foram recusadas como não sendo de estrelas, para que o programa passe a recusar sistematicamente essas medidas. O processo, inicialmente, é lento e artesanal, mas à medida que mais noites vão sendo analisadas, o programa vai aumentando sua base de dados de coordenadas que representam estrelas ou objetos não estelares (ou simples defeitos) e a coleta de dados das noites são processadas cada vez mais rapidamente.

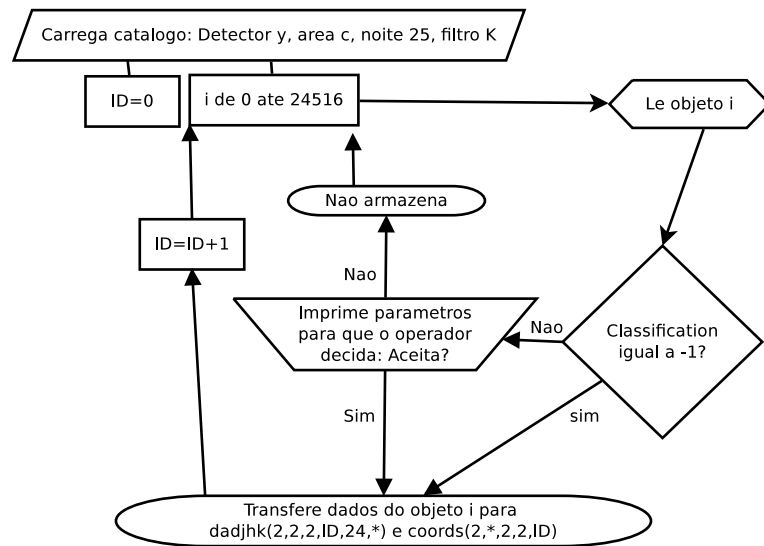


Figura 3.5: Passos seguidos pelo **ukp83** para noite 25, filtro K, que foi utilizada como catálogo base para organizar as noites seguintes.

Como já existia um catálogo base, o processo seguido para os filtros J e H da noite 25 e para as noites seguintes é um pouco diferente e é descrito no fluxograma da Figura 3.6. Dentro de um *loop* que percorre todos os filtros e todas as noites restantes, carrega-se o catálogo do CASU para a noite e filtro em questão. Para a coordenada de cada objeto,

checa-se a existência de registros no novo catálogo em um raio de um segundo de arco a partir da coordenada do mesmo. Caso exista um registro possível, e apenas um, armazenase o novo dado automaticamente. Caso exista mais de um registro possível, recorre-se ao operador e imprimem-se os dados descritos no parágrafo anterior para todos os possíveis correspondentes; cabe ao operador escolher entre descartar o objeto ou indicar qual é o ID apropriado a ele no novo catálogo. Caso não existam possíveis equivalentes, seguem-se os mesmos passos da Figura 3.5.

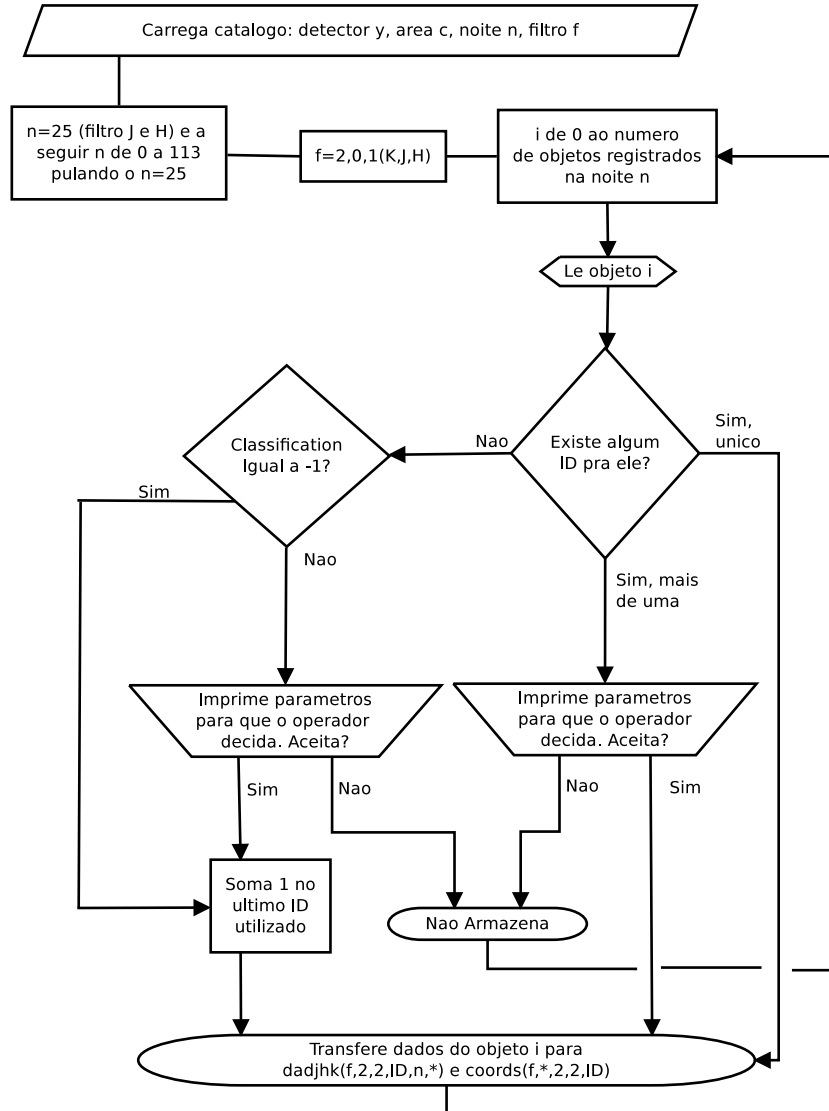


Figura 3.6: Passos seguidos pelo **ukp83**, uma vez que já existia um catálogo base, para catalogar as noites restantes.

O catálogo final contém 25014 objetos, os quais possuem até 112 noites de dados válidos. Quando começamos a tratar os objetos estatisticamente, decidimos excluir dos nossos dados as 8 piores noites por julgarmos que elas contaminavam os dados já que nessas noites, apenas os objetos mais brilhantes da amostra eram visíveis. O critério utilizado para julgar as piores

noites foi o número de objetos detectados no filtro K (25417 objetos na melhor noite e 463 na pior). A Tabela 3.2 lista as noites excluídas.

Data (2007)	03/04	18/04	05/05	20/05	15/09	17/09	21/09	22/09	15/10	15/10
No. de fontes pontuais em K	4154	10731	10893	10701	5026	463	11145	6151	8337	6665

Tabela 3.2: Noites excluídas da amostra por má qualidade.

Uma observação pertinente é que, devido às variações nas noites, nem todos os objetos estão presentes em todas elas. Desta forma, um objeto qualquer pode ter de 1 a 104 observações não nulas. Todos os objetos utilizados nas análises apresentadas a partir daqui foram identificados em pelo menos 23 noites; 9766 objetos foram identificados em pelo menos 100 noites; Dos 557 objetos considerados variáveis interessantes – *i.e.*, objetos cuja curvas de luz apresentavam alta correlação entre bandas (Capítulo 5) – 493 (96,3%) foram identificados em em pelo menos 100 noites.

3.2.2 Objetos fragmentados

Ao decorrer dos trabalhos de análise das curvas de luz, observamos que algumas curvas de luz estavam fragmentadas. Um exemplo disso são os objetos #2802 e #693. A Figura 3.7 mostra a imagem dos dois no filtro K.

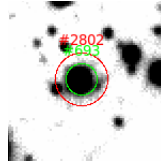


Figura 3.7: Objetos #2802 e #693, considerados como o mesmo objeto cuja curva de luz foi fragmentada.

Para verificar tal ocorrência, selecionaram-se no catálogo `coords` todos os objetos que constavam em pelo menos 12 noites e no máximo em 90 no filtro K. Verificou-se para coordenada de cada um desses objetos se existia outro registro de coordenada num raio de um segundo de arco a partir dela.

Foram encontrados 599 ocorrências dentro destes critérios. Para verificar se se tratavam de dois objetos muito próximos ou de um único objeto, marcou-se a coordenada de cada um na imagem somada para o filtro K e plotou-se em três dimensões o número de contagens por coordenada em X e Y num raio de um segundo de arco a partir do objeto de menor ID. A separação angular entre os dois foi calculada e impressa, assim como as magnitudes médias em todos os filtros, o número de vezes que cada um aparece nas imagens e a tabela `dadjhk(*,ID,*,1)` que mostra o valor de magnitude registrado para aquele objeto em cada uma das 104 medidas e dos 3 filtros.

O objeto era descartado se:

- Houvesse sobreposição de dados e/ou o número total de dados válidos do objeto resultante fosse maior que 104 (já que esse é o maior número de observações válidas possível);
- A magnitude média dos dois fosse diferente além da casa decimal;
- Houvesse dois objetos dentro do raio de um segundo de arco indicando que o *ukp83* confundia os dois.
- Houvesse contaminação do fundo, devido a um objeto muito brilhante próximo

Por fim, 87 pares foram considerados como objeto único, fragmentados devido a ambiguidades no procedimento de catalogação. Destes, 4 estão na lista de objetos variáveis interessantes apresentados neste trabalho.

3.3 Estrelas Constantes

Curva de luz é um gráfico que mostra como o fluxo de luz vindo de um objeto astronômico varia com o tempo. Considerando que nossa medida de fluxo é feita em magnitudes, um objeto variável será aquele que apresenta desvios significativos do valor médio de magnitude. Nesse contexto, uma estrela constante é aquela cuja curva de luz é uma reta com inclinação nula num gráfico magnitude×tempo (curva de luz) e cujo desvio geométrico e desvio padrão do valor médio são muito pequenos. Um estudo teórico sobre curvas de luz de estrelas variáveis será feito no Capítulo 4. Por enquanto estamos interessados apenas em encontrar os objetos mais constantes em nossa amostra para realização de fotometria diferencial.

Para atingir o objetivo de distinguir entre objetos variáveis e constantes, calculamos alguns índices estatísticos (para todos eles N é o número de noites em que o objeto foi medido e m_i é o valor de magnitude para a i -ésima medida do objeto):

- Magnitude média:

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad (3.1)$$

É simplesmente a média sobre todas as detecções.

- Desvio Padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}{N - 1}} \quad (3.2)$$

- Variância

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}{N - 1} \quad (3.3)$$

Mostra quão longe em geral os seus valores se encontram do valor médio.

- Desvio Geométrico:

$$\sigma_g = e^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \|m_i - \bar{m}\|} \quad \text{se} \quad \|m_i - \bar{m}\| \geq 0,001 \quad (3.4)$$

É a média geométrica dos desvios absolutos maiores que 0,001 e é sensível a variações pequenas a partir da média.

Selecionamos como candidatos a objetos constantes aqueles cujo desvio geométrico e desvio padrão eram mínimos. Feito isso, analisamos suas curvas de luz para decidir quais eram os melhores candidatos a constante.

3.3.1 Curvas médias

Para encontrar os objetos constantes, traçamos curvas de desvio padrão e geométrico por magnitude para os 9166 objetos que apareciam em pelo menos 100 medidas, e interpolamos uma curva que limitasse inferiormente a distribuição. Essa envoltória que limita inferiormente a distribuição de pontos representa os limites reais de nossas medidas em termos dos desvios padrão e geométrico em função do brilho dos objetos. Tal curva foi encontrada via interpolação por **B-spline** cúbico.⁵ **Spline** é uma curva suave definida por dois ou mais pontos. Antigamente utilizavam-se as chamadas “curvas francesas”, moldes fixos com diversas curvaturas, mas matematicamente existem várias definições de **spline**. Os **B-spline** aqui utilizados são polinômios de terceiro grau entre nós ou “pontos de controle” que, de certa forma, são as âncoras do **spline**. Os nós podem ser simples, duplos, triplos ou quádruplos e a diferença está em que, em nós simples, os polinômios de terceiro grau têm que possuir as derivadas de ordem zero, primeiro e segundo graus iguais à direita e à esquerda do nodo. Em nós duplos (dois nós na mesma posição), a condição de derivada segunda é relaxada e os polinômios têm que ter somente suas derivadas de ordem zero e primeiro iguais à direita e à esquerda. Nodos triplos relaxam a condição na derivada de primeira ordem e nos nós quádruplos nem o valor dos polinômios (derivada de ordem zero) precisam ser iguais à direita e à esquerda do mesmo. No nosso caso, utilizamos, além de nós quádruplos nas extremidades dos pontos (menor e maior valor), dois outros nós duplos com exigência de que

⁵Utilizamos uma função do *Numerical Algorithms Group Library* (NAG) para isso.

a primeira e segunda derivadas da curva sejam contínuas à direita e à esquerda desses.

Uma vez que todos os nós são definidos, calcula-se um **spline** inicial e o desvio geométrico de cada ponto à curva. Todos os pontos cujo desvio geométrico é superior a 0,09 são excluídos e é feito um segundo **spline** para os pontos restantes e repete-se iterativamente o processo até que nenhum novo ponto seja eliminado. A envoltória **spline** final, obtida para o desvio padrão, é mostrada nas Figuras 3.8 à esquerda, os objetos selecionados como constantes para esta curva estão marcados em verde. Os nós foram escolhidos por tentativa e erro e os nós duplos intermediários escolhidos (mostrados como quadrados azuis nas Figuras 3.8) foram nas magnitudes 14,5 e 16,5 em K .

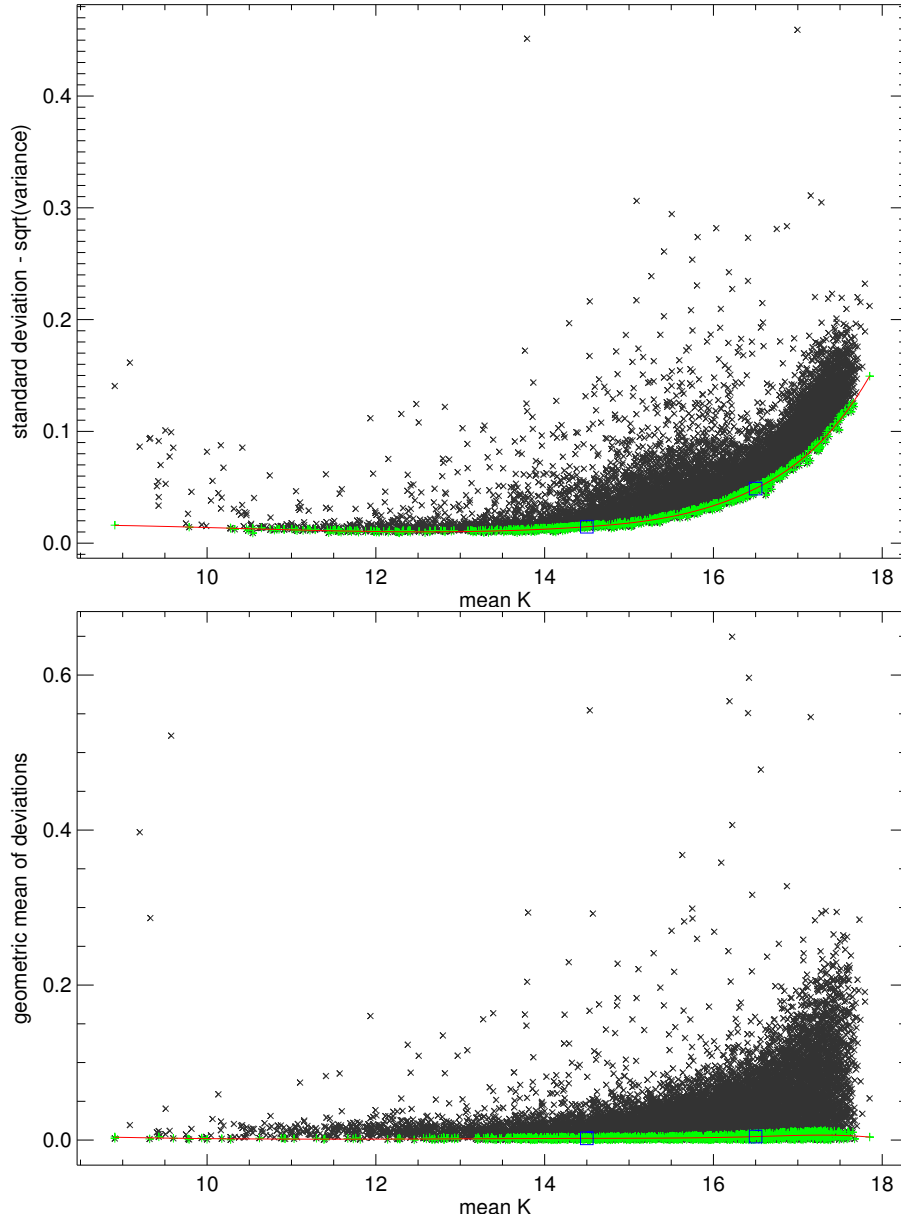


Figura 3.8: Distribuição de desvio padrão (acima) e desvio geométrico (abaixo) para os objetos contendo entre 100 e 104 medidas válidas no filtro K .

Seguiu-se o mesmo procedimento para a curva de desvio geométrico e os resultados

são mostrados na Figura 3.8 à direita. Por último, comparamos os objetos selecionados em cada curva e consideramos constantes aqueles que apareciam nas duas seleções. Tais objetos aparecem em círculos laranja em ambos os gráficos da Figura 3.9. Além disso, os objetos selecionados segundo desvio padrão são marcados com cruzes vermelhas e aqueles selecionados segundo desvio geométrico, cruzes turquesa.

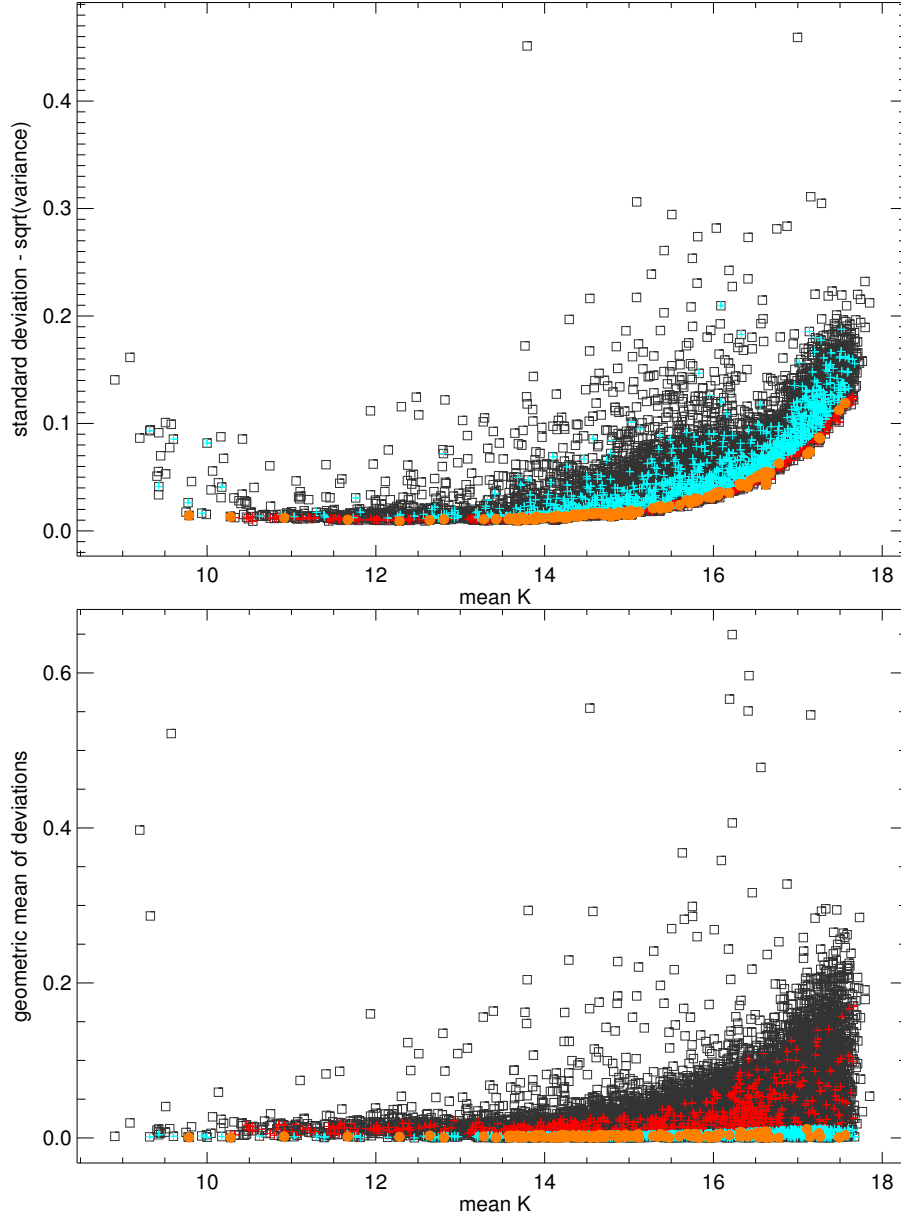


Figura 3.9: Correlação entre os objetos constantes segundo desvio padrão e geométrico plotados sobre a curva de desvio padrão para o filtro K .

Dos 25014 objetos registrados, 9766 apareciam em pelo menos uma centena de noites medidas em K , dos quais apenas 10 foram considerados como os mais constantes, dentro da cobertura temporal das observações e segundo os critérios aqui descritos. A Tabela 3.3 apresenta estes objetos segundo seu número de catálogo, magnitude média, desvio padrão e número de noites em que eles aparecem em cada um dos três filtros. Como exemplo, a curva

de luz do objeto # 15574 é mostrada na Figura 3.10.

#		6702	15574	10033	6371	2503	9550	13465	10990	6257	5276
J	$\bar{m}_J$	15,059	14,537	14,760	14,945	16,219	14,989	15,962	15,717	16,061	18,093
	σ_J	0,013	0,013	0,013	0,011	0,018	0,012	0,0192	0,015	0,018	0,080
	N_J	103	103	103	103	103	103	103	103	103	101
H	$\bar{m}_H$	13,748	13,849	14,111	14,206	14,733	14,463	14,999	14,974	15,195	16,983
	σ_H	0,012	0,013	0,013	0,010	0,011	0,012	0,015	0,013	0,014	0,055
	N_H	104	104	104	104	103	104	104	104	104	103
K	$\bar{m}_K$	13,094	13,389	13,779	13,897	13,969	14,202	14,475	14,565	14,721	16,269
	σ_K	0,012	0,012	0,0139	0,011	0,014	0,013	0,0145	0,016	0,015	0,04
	N_K	104	102	104	104	104	104	104	104	104	104

Tabela 3.3: Objetos considerados como os mais constantes da região segundo sua ID, magnitude média, desvio padrão da magnitude e número de noites em que aparecem para cada um dos filtros.

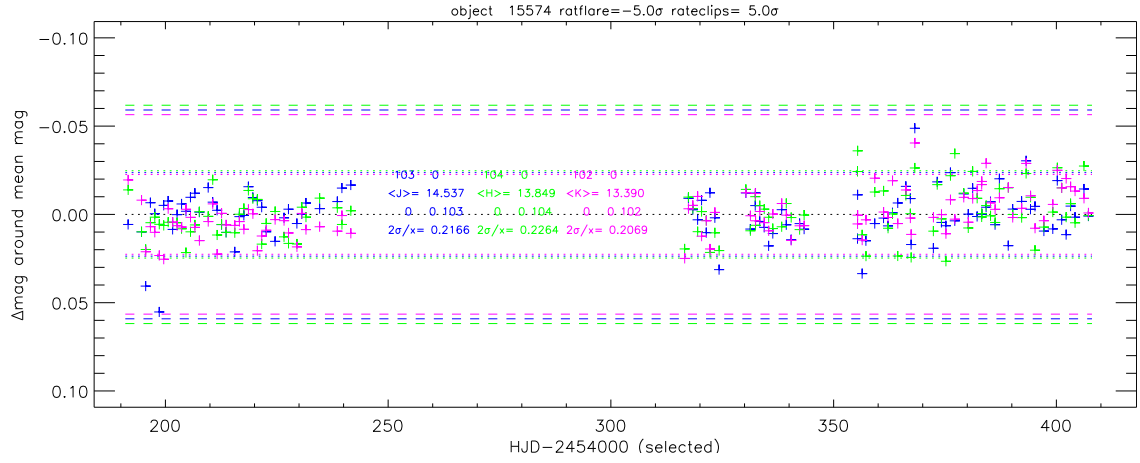


Figura 3.10: Curva de luz do objeto #15574, selecionado como constante segundo os parâmetros propostos.

Na seção seguinte utilizamos estes objetos na aplicação de fotometria diferencial.

3.3.2 Fotometria Diferencial

A fotometria diferencial consiste em selecionar as estrelas mais constantes presentes no campo de estudo e utilizá-las como estrelas de comparação na calibração das curvas de luz dos demais objetos. Como em princípio as causas de variabilidade fotométrica em uma estrela constante são as incertezas do aparelho de aquisição de dados e flutuações na noite, esta técnica eliminaria aquelas incertezas a que estão igualmente submetidos todos os objetos do campo de estudo.

Para testar a eficiência da técnica sobre nossos dados, comparamos as estrelas da Tabela 3.3 entre si. Isso deveria diminuir os desvios padrões individuais. Os resultados para a fotometria diferencial entre elas é mostrado na Tabela 3.4.

#		6702	15574	10033	6371	2503	9550	13465	10990	6257	5276
J	6702	15.059	0.015	0.015	0.014	0.019	0.015	0.019	0.017	0.016	0.079
	15574	0.522	14.537	0.013	0.012	0.021	0.012	0.019	0.015	0.019	0.083
	10033	0.299	-0.223	14.759	0.013	0.020	0.013	0.019	0.015	0.019	0.083
	6371	0.115	-0.408	-0.184	14.944	0.019	0.011	0.019	0.014	0.018	0.081
	2503	-1.160	-1.683	-1.459	-1.275	16.219	0.021	0.026	0.022	0.021	0.076
	9550	0.069	-0.453	-0.229	-0.046	1.229	14.989	0.019	0.013	0.020	0.082
	13465	-0.903	-1.425	-1.202	-1.018	0.257	-0.972	15.962	0.021	0.019	0.084
	10990	-0.658	-1.179	-0.957	-0.772	0.503	-0.727	0.245	15.717	0.022	0.083
	6257	-1.003	-1.525	-1.302	-1.117	0.158	-1.072	-0.099	-0.345	16.061	0.084
5276	-3.034	-3.556	-3.333	-3.149	-1.874	-3.103	-2.132	-2.377	-2.032	18.093	
H	6702	13.748	0.017	0.018	0.013	0.015	0.017	0.016	0.017	0.014	0.053
	15574	-0.101	13.849	0.011	0.018	0.013	0.014	0.013	0.013	0.017	0.058
	10033	-0.363	-0.262	14.111	0.0119	0.015	0.012	0.0132	0.013	0.018	0.057
	6371	-0.458	-0.357	-0.096	14.206	0.009	0.013	0.015	0.013	0.013	0.055
	2503	-0.985	-0.883	-0.622	-0.526	14.733	0.015	0.018	0.014	0.015	0.054
	9550	-0.715	-0.614	-0.352	-0.257	0.269	14.463	0.013	0.011	0.018	0.055
	13465	-1.252	-1.151	-0.889	-0.794	-0.267	-0.537	14.999	0.013	0.016	0.058
	10990	-1.227	-1.125	-0.864	-0.768	-0.242	-0.512	0.025	14.974	0.018	0.055
	6257	-1.448	-1.347	-1.085	-0.989	-0.463	-0.733	-0.196	-0.221	15.196	0.058
5276	-3.235	-3.133	-2.872	-2.776	-2.250	-2.519	-1.983	-2.008	-1.787	16.983	
K	6702	13.094	0.016	0.019	0.013	0.017	0.019	0.019	0.020	0.014	0.047
	15574	-0.296	13.389	0.011	0.011	0.013	0.009	0.011	0.010	0.0167	0.046
	10033	-0.685	-0.389	13.779	0.012	0.013	0.011	0.014	0.014	0.019	0.043
	6371	-0.803	-0.508	-0.118	13.897	0.0107	0.011	0.0136	0.014	0.016	0.045
	2503	-0.875	-0.581	-0.190	-0.073	13.969	0.012	0.015	0.013	0.019	0.043
	9550	-1.107	-0.812	-0.422	-0.304	-0.232	14.202	0.011	0.011	0.018	0.043
	13465	-1.381	-1.086	-0.696	-0.578	-0.505	-0.274	14.475	0.0121	0.019	0.046
	10990	-1.471	-1.176	-0.786	-0.668	-0.596	-0.364	-0.090	14.565	0.019	0.046
	6257	-1.627	-1.331	-0.942	-0.824	-0.752	-0.519	-0.246	-0.156	14.721	0.048
5276	-3.176	-2.879	-2.4901	-2.373	-2.300	-2.068	-1.795	-1.705	-1.549	16.269	

Tabela 3.4: Dados da fotometria diferencial para os 10 objetos selecionados como constantes.

Sendo A_{ij} cada elemento da tabela, em cada elemento da diagonal ($i=j$) está a magnitude média de cada objeto i ($A_{ii} = \bar{m}_i$). Na linha abaixo da magnitude média ($i < j$) está a magnitude média do objeto i quando calibrado de acordo com o objeto j ($A_{ij} = \bar{m}_i - \bar{m}_j$). Na linha ao lado da magnitude média ($i > j$) está o desvio padrão para o objeto i quando ele é calibrado a partir do objeto j .

Um exemplo da análise é marcado em vermelho na Tabela 3.4. Nela temos os objetos $i=2$ (#15574) cuja magnitude média é $\bar{m}_K^{(\#15574)} = A_{22} = 14,537$ e o objeto $i=3$ (#10033), com magnitude média $\bar{m}_K^{(\#10033)} = A_{33} = 14,759$. A magnitude média do objeto #15574, quando comparado ao #10033, é $\bar{m}_K^{(\#15574)} = A_{32} = -0,223$ e o novo desvio padrão é $\sigma_K^{(\#15574)} = A_{23} = 0,013$. Comparando esse novo desvio padrão com aquele obtido para fotometria absoluta (Tabela 3.3), ($\sigma_K^{(\#15574)} = 0,013$), observa-se que não há melhoria significativa quando utilizamos a fotometria diferencial.

Concluimos com isso que não existem objetos suficientemente constantes em nosso campo tal que valha a pena utilizar fotometria diferencial. Como CygOB2 é uma região de formação estelar com idade estimada de poucos milhões de anos, é plausível concluir que seus objetos ainda estão ativos demais para serem considerados constantes.

Para enfatizar nossa escolha de trabalhar com fotometria absoluta, estudamos os objetos aqui chamados de constante da mesma maneira que os variáveis periódicos. Um exemplo de

tal estudo será apresentado na Seção 5.1.

Capítulo 4

As Ferramentas para Análise da Variabilidade Fotométrica

A análise estatística e matemática de séries temporais tem amplas aplicações em diversas ciências. Existe uma vasta literatura no assunto, principalmente devido à sua aplicabilidade em engenharia e geofísica. No escopo desse trabalho, a análise de séries temporais fornece ferramentas fundamentais para a detecção e estudo de estrelas variáveis. Uma rápida, mas boa, introdução ao tema aplicado à astrofísica pode ser encontrada em Templeton (2004). Será apresentado neste capítulo um sumário de algumas definições e metodologias que se mostraram eficientes quando aplicadas aos nossos dados.

Primeiramente é preciso entender o que é a curva de luz e que tipo de informação ela pode conter (Seção 4.1). Tendo em mãos uma série temporal discreta, podemos estudá-la no domínio das frequências ou no domínio temporal. Escolher qual domínio é mais apropriado dependerá de que tipo de informação deseja-se obter. O domínio das frequências é mais apropriado para processos determinísticos, o elo entre esse domínio e a curva de luz é a transformada de Fourier que, apesar de muito útil, suprime informações relacionadas à amplitude das oscilações e à fase (Seção 4.2). Para recuperar este tipo de informação e complementar a análise de Fourier, algumas técnicas no domínio temporal, como análise da curva de correlação cruzada (Seção 4.3) e ajuste por mínimos quadrados de curvas conhecidas (Seção 4.4), se mostram de grande valia.

Não é objetivo desse trabalho um estudo teórico profundo de tais técnicas, para tal devem-se consultar livros especializados no assunto como Oppenheim & Schaffer (2010), Proakis & Manolakis (2007) e Ortigueira (2005).

4.1 A Curva de Luz

Uma série discreta de dados é comumente denominada *senal* e pode ser pensada qualitativamente como uma quantidade que contém informação. No presente caso, o sinal em questão é uma *curva de luz*: uma série de dados fotométricos medidos ao decorrer do tempo que nos diz como a magnitude da estrela varia com o tempo.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram as curvas de luz dos três filtros sobrepostos para quatro objetos do catálogo. As ordenadas representam as datas julianas normalizadas para HJD-2454000; As abcissas representam a magnitude centrada na magnitude média de cada filtro, tal que toda oscilação em magnitude ocorre em torno da origem das abcissas (linha preta pontilhada); o valor médio de magnitude aparece no centro do gráfico, assim como o número de dados válidos compondo cada curva. Os filtros J, H e K são representados pelas cores azul, verde e magenta respectivamente. Este padrão de cores foi utilizado em todos os gráficos apresentados no presente trabalho. As linhas tracejadas representam níveis definidos por $\pm 2\sigma$ e as linhas pontilhadas, os níveis definidos por $\pm\sigma$, com σ calculado de acordo com a Equação (3.2).

A Figura 4.1 mostra a curva de luz de uma estrela variável para a qual a nossa resolução (intervalo total monitorado e frequência de observação) foi insuficiente para caracterização do princípio físico responsável pela variação de magnitude.

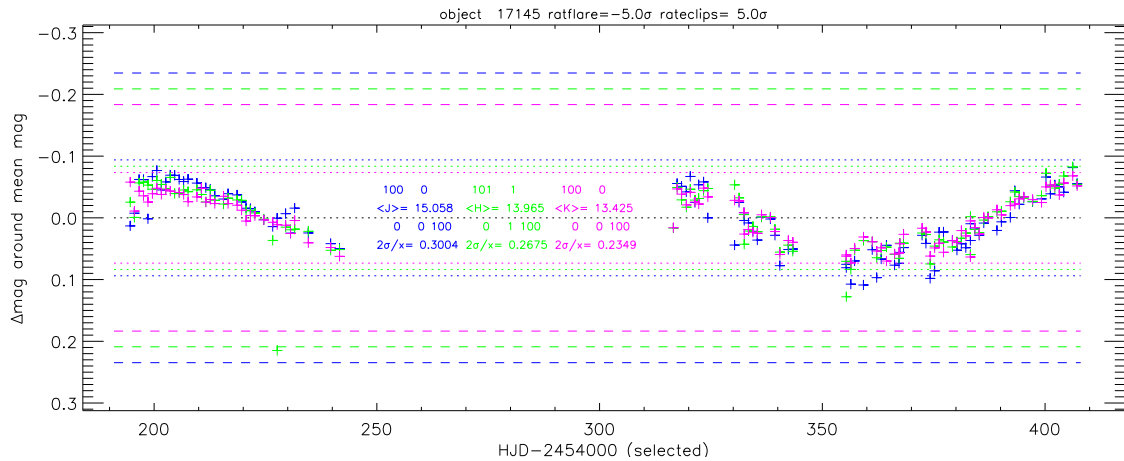


Figura 4.1: Curva de luz composta do objeto #17145. Ele é visivelmente variável, mostrando variações sistemáticas e altamente correlacionadas nas três bandas fotométricas, mas a amostragem é insuficiente para uma caracterização precisa.

As curvas de luz nas Figuras 4.2 e 4.3 evidenciam a necessidade das técnicas a serem descritas no presente capítulo. A partir de uma análise visual ambas apresentam variabilidade em magnitude, mas em primeira instância não é possível dizer se são periódicas ou não.

Na curva de luz da Figura 4.4 é evidente a existência de um período e, além disso, podemos conjecturar que a variação na magnitude pode ser descrita matematicamente por

uma curva senoidal.

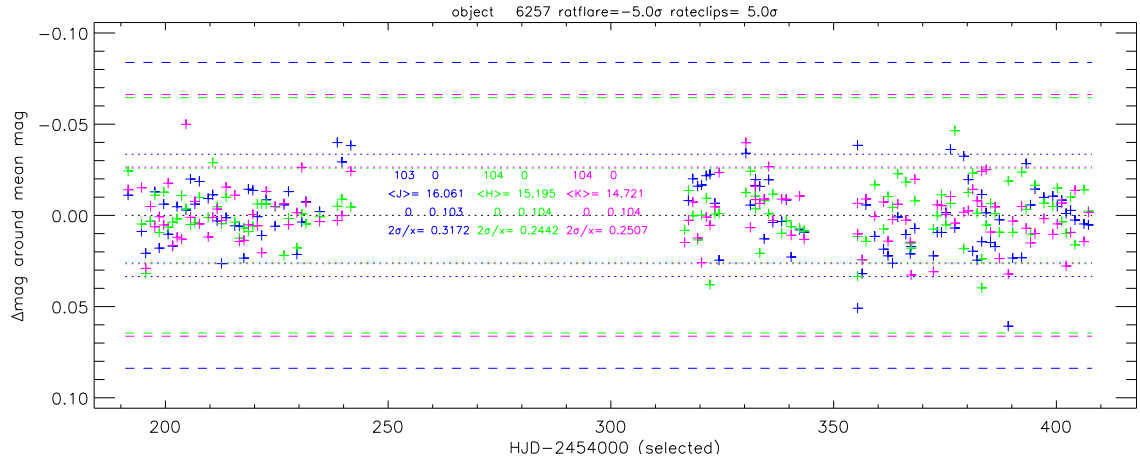


Figura 4.2: Curva de luz composta do objeto #6257. Foi uma das estrelas selecionadas como uma das mais constantes da amostra na Seção 3.3.

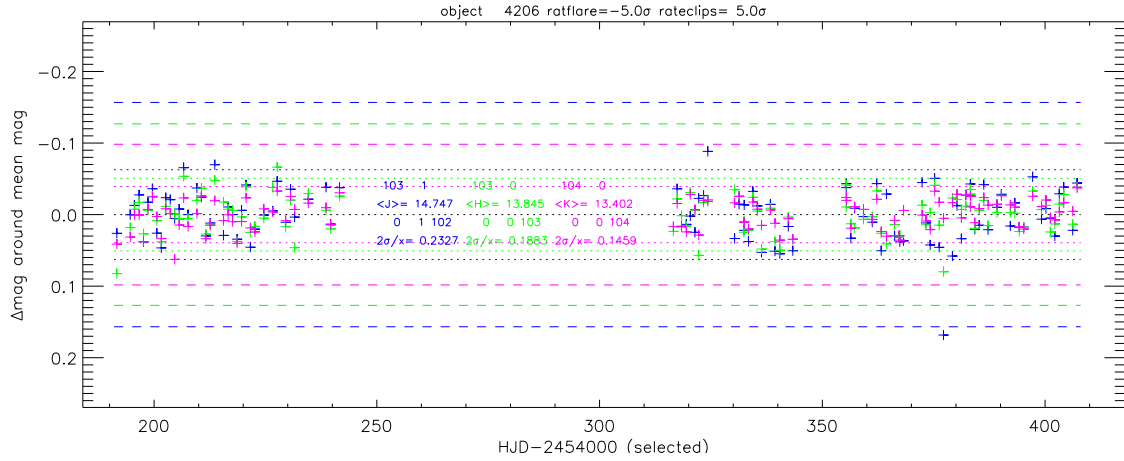


Figura 4.3: Curva de luz composta do objeto #4206. Foi classificada como uma variável senoidal com período de 1,4d.

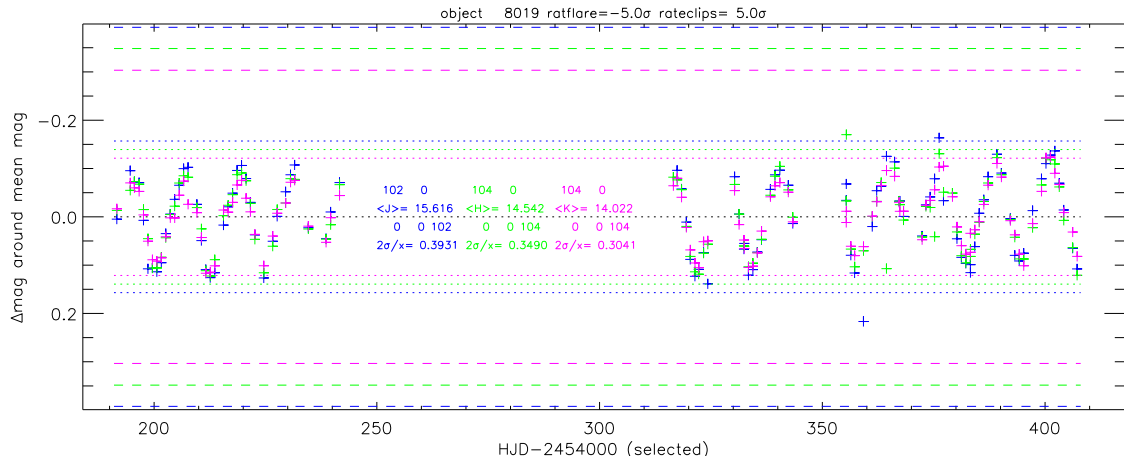


Figura 4.4: Curva de luz composta do objeto #8019. Existe um período evidente visualmente por volta de 12d.

Na curva de luz da Figura 4.5 existe uma tendência periódica de frequência pequena não muito bem resolvida, além de uma inclinação na curva de luz, indicadora de um período longo.

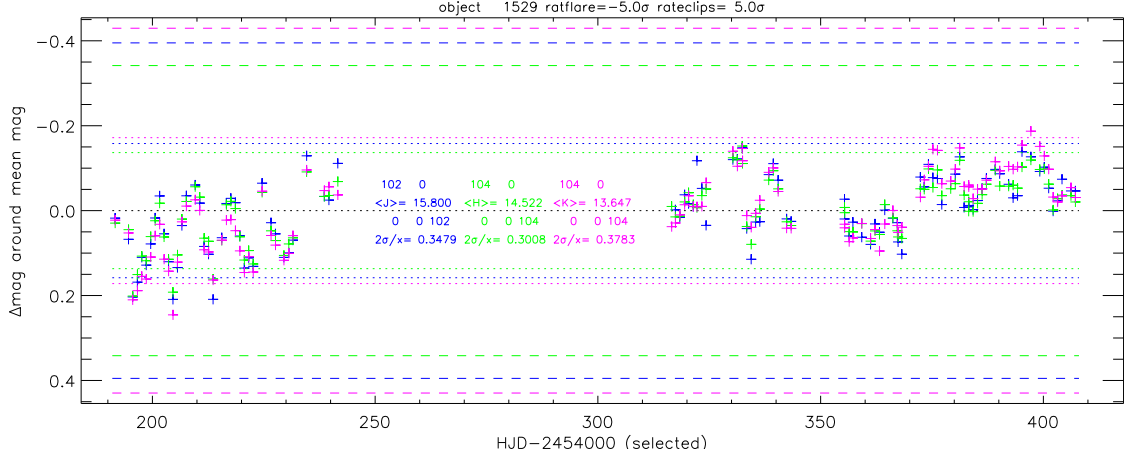


Figura 4.5: Curva de luz composta do objeto #1529, uma estrela multi-periódica.

Antes de tratar as curvas de luz reais, consideremos o caso ideal onde não existe ruído e uma medida é realizada a cada período (T) fixo. Definimos uma curva de luz m_n genérica como:

$$m_n \equiv m(t_n), \quad t_n = nT, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (4.1)$$

Concluimos na Seção 3.3.2 do Capítulo anterior que mesmo as estrelas que menos variam fotometricamente ainda apresentam variações significativas e não poderiam ser consideradas constantes dentro do intervalo de tempo amostrado. Essa conclusão é comprovada via uma rápida análise da curva de luz do objeto #6257 (Figura 4.2), o qual mesmo estando entre os dez objetos com desvios padrão e geométrico (em relação à sua magnitude média) menores da amostra, é claramente uma variável fotométrica. A essa altura, é preciso nos fazer a pergunta: Dentre os objetos variáveis do catálogo (todos), de um ponto de vista físico, quais nos interessam?

Introduzimos qualitativamente nas Seções 2.2.1 e 2.3 os tipos de variabilidade passíveis em uma amostra de estrelas jovens como a do presente estudo. Vimos no Capítulo 2 que os parâmetros físicos mais acessíveis em uma estrela jovem são aqueles relacionados à variabilidade fotométrica periódica (ou quase-periódica) como a rotação modulada por manchas, pulsação e eclipses causados por um segundo objeto em revolução em torno da estrela. Apesar desses fenômenos possuírem natureza distinta, em primeira aproximação todos eles podem ser descritos como um processo estacionário, *i.e.*, baseado em observações no presente, podemos prever seu comportamento futuro com erro próximo de zero (Scargle 1981).

O modelo matemático mais simples possível para um sinal periódico é uma função senoidal. Modelamos um sinal dessa forma supondo uma distribuição temporal de obser-

vações idêntica àquela dos dados reais. Com isso, ganhamos uma noção de quais eram as características das curvas de luz impostas por essa distribuição temporal e quais eram as características impostas pelo caráter periódico de tal função.

4.1.1 A Medida Fotométrica

Voltando ao tratamento da curva de luz, consideremos um fenômeno cuja curva de luz seja puramente senoidal, *i.e.* a magnitude aparente da estrela em função do tempo pode ser descrita matematicamente como:

$$m(t) = \cos(\omega_o t + \phi), \quad (4.2)$$

onde ω_o é a frequência angular do sinal (*i.e.*, $\omega_o = \frac{2\pi}{T_o}$) e ϕ é a fase. A realização de medidas com frequência $\frac{1}{T_s}$ equivale a um trem de pulsos:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s). \quad (4.3)$$

O ato de medir a magnitude aparente da estrela ao decorrer do tempo equivale a multiplicar a equação que a descreve (4.2) pela equação matemática da medida (4.3) tal que podemos escrever a curva de luz matematicamente como:

$$\begin{aligned} m_{cl}(t) &= m(t)s(t) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(t)\delta(t - nT_s) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s)\delta(t - nT_s). \end{aligned} \quad (4.4)$$

O resultado é uma série temporal como aquelas apresentada nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. O processo de medida é ilustrado na Figura 4.6.

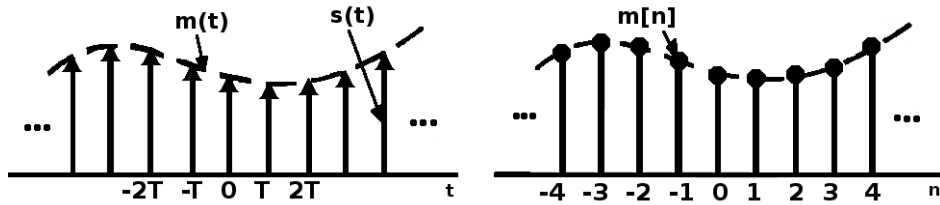


Figura 4.6: Diferença entre o fenômeno físico e o que é medido. Figura adaptada de Oppenheim & Schaffer (2010)

Uma vez que sabemos *o que* são os dados que temos em mãos, nos preocuparemos agora em como resgatar a informação neles contida.

4.2 Análise de Fourier

Uma das ferramentas matemáticas mais antigas para a análise de séries temporais é a análise de Fourier. Seja $m(t)$ uma função contínua qualquer, *e.g.* a função que descreve a série de dados em questão, ela pode ser representada através da soma de senos e cossenos, *i.e.*,

$$m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} M(\omega) e^{-i\omega t} dt, \quad (4.5)$$

onde $\omega = \frac{2\pi}{T}$ é a frequência angular, T é o período e $M(\omega)$ representa as amplitudes das componentes senoidais de $m(t)$ e é conhecida como transformada de Fourier (TF) de $m(t)$. Uma referência para revisão de transformadas de Fourier é Bracewell (1986); de forma simplificada, a TF decompõe uma função em um espectro de frequências, de modo que a cada frequência é associada uma amplitude.

Acontece que estamos trabalhando com m_n , que é discreto, e não com $m(t)$, que é contínua; A transformada de Fourier discreta (TFD) de uma série m_n de N dados é:

$$M(\omega) = \sum_{n=1}^N m_n e^{i\omega t_n}. \quad (4.6)$$

Um algoritmo muito conhecido (e utilizado) para o cálculo da TDF é o FFT (*Fast Fourier Transform*). Uma referência para o método pode ser encontrada em Brigham (1974). Existe uma série de propriedades que tornam a TF tão utilizada em diversas ciências. Quando o assunto é a busca por períodos em um conjunto de dados, a propriedade de interesse é que a TF de um sinal senoidal é uma função delta no domínio das frequências, *i.e.*, a TF da Equação (4.2) é $M(\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_o) + \delta(\omega + \omega_o)]$.

Por si só a TF é capaz de fornecer bastante informação sobre o sistema, porém, quando normalizada de forma apropriada ela é capaz de refletir diretamente propriedades físicas do sistema (Deeming 1975).

4.2.1 Periodograma Clássico

O periodograma, que a partir daqui chamaremos de periodograma clássico, é definido como (Deeming 1975; Scargle 1982):

$$\begin{aligned} P_M(\omega) &= \frac{1}{N} |M(\omega)|^2 \\ &= \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N m_n e^{-i\omega t_n} \right|^2 \\ &= \frac{1}{N} \left\{ \left[\sum_n m_n \cos(\omega t_n) \right]^2 + \left[\sum_n m_n \sin(\omega t_n) \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Se a série de dados m_n contém um sinal coerente com uma frequência ω_o , então $P_M(\omega)$ atinge um máximo local em ω_o (pois m_n e $e^{-i\omega t_n}$ estarão em fase). Se a série de dados contém diversos sinais com diferentes frequências, então $P_M(\omega)$ terá máximos locais em cada uma dessas frequências com o máximo global na frequência com máxima amplitude. A Figura 4.7, extraída de Bracewell (1986), exemplifica a formação de máximos num periodograma teórico para o caso monoperiódico e multiperiódico (com sinais de mesma e diferente amplitudes).

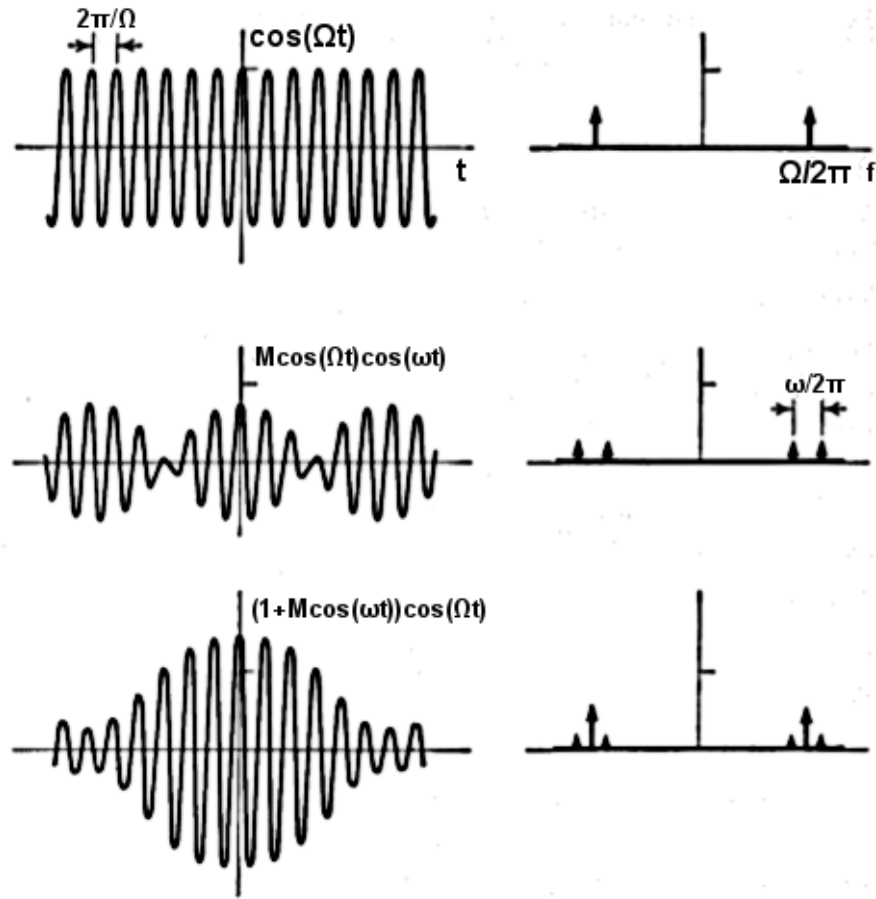


Figura 4.7: Formação de picos em um periodograma teórico para sinais com um período (superior), dois períodos e mesma amplitude (meio) e dois períodos com diferentes amplitudes (inferior). Figura extraída de Bracewell (1986).

Frequência de Nyquist

Em princípio $P_M(\omega)$ pode ser calculado para qualquer frequência, mas quais são os ω_o que podem ser medidos com essa amostragem?

A informação que se consegue extrair da curva de luz fica limitada ao teorema da amostragem¹: *Uma série de dados m_n cuja maior frequência é B só pode ser recuperada caso seja amostrada com frequência $\frac{1}{T_s} \geq 2B$*

¹O teorema da amostragem é muitas vezes referido como Teorema da amostragem de Nyquist-Shannon.

A partir disso, definimos a frequência de Nyquist:

$$\omega_N = 2\pi \frac{1}{2T_s} = \frac{\omega_s}{2}, \quad (4.8)$$

onde ω_s é a frequência angular de amostragem. O periodograma para $\omega > \omega_N$ deve ser considerado com muito cuidado. Isto por que para frequências maiores o periodograma sofrerá *aliasing*, *i.e.*, os picos de frequências maiores aparecem repetidos no periodograma para frequências menores.

Aliasing

Uma série de simples manipulações matemáticas das definições utilizadas até aqui pode nos levar a uma definição matemática de alias. Tomando a TF de (4.2) e (4.3), temos:

$$\begin{aligned} M(\omega) &= \pi\delta(\omega - \omega_o) + \pi\delta(\omega + \omega_o) \\ S(\omega) &= \frac{2\pi}{T_s} \sum_{k=0}^N \delta(\omega - k\omega_s); \end{aligned} \quad (4.9)$$

Logo, a TF de (4.4) fica:

$$\begin{aligned} M_{cl}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} M(\omega) * S(\omega) \\ &= \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^N M(\omega - k\omega_s) \\ &= \frac{\pi}{T_s} \sum_{k=0}^N \delta[\omega - (k\omega_s + \omega_o)] + \delta[\omega - (k\omega_s - \omega_o)], \end{aligned} \quad (4.10)$$

onde *cl* indica que estamos agora trabalhando com os dados reais, ou seja, a curva de luz. No presente caso (onde os dados são igualmente espaçados) fica impossível distinguir entre qual potência do periodograma corresponde a um *alias* e qual corresponde a uma frequência verdadeira do sinal. A Figura 4.8, na próxima página, ilustra o porquê no domínio temporal: Dado um conjunto de dados discretos igualmente espaçados, é possível ajustar satisfatoriamente mais de uma senoide com períodos diferentes (relacionados matematicamente conforme descrito na equação (4.10)).

A existência de *aliases* é um caso particular de um fenômeno inerente à técnicas via periodograma (*i.e.*, que passam do domínio temporal para o espaço de frequências) denominado *vazamento espectral* (num periodograma: picos aparecem deslocados para outras frequências). Vazamento espectral também ocorre devido a série temporal ser finita e é um problema totalmente morfológico, nada tendo a ver com a qualidade dos dados em si.

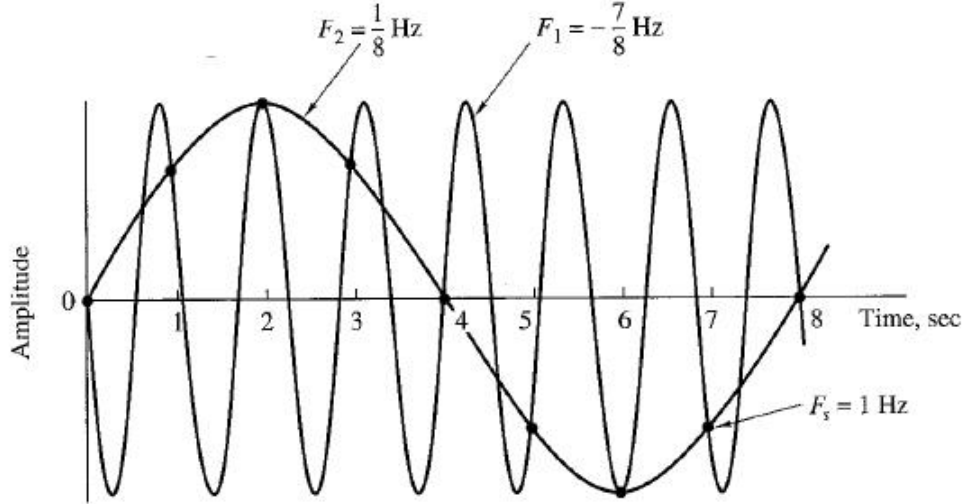


Figura 4.8: Ilustração do efeito de *aliasing*. Os pontos representam as medidas, observe que é possível ajustar pelo menos duas curvas com períodos diferentes às medidas. Créditos da figura: Proakis & Manolakis (2007).

Outro problema relacionado ao uso da FFT é a sua limitação estatística. O periodograma clássico tem muita incerteza mesmo para dados com sinal/ruído alto. Além disso, o ruído no periodograma não diminui ao aumentar-se o tamanho da amostra.

Em medidas astronômicas feitas a partir da Terra, como é o nosso caso, é praticamente impossível obter dados igualmente espaçados. As razões para isso são diversas, entre elas a disponibilidade de tempo de observação. A série temporal não é mais descrita conforme a equação (4.1) e o periodograma clássico não pode ser utilizado. A curva de luz real tem a forma:

$$m_i = m(t_i) \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4.11)$$

Além disso, o dado real é composto pelo sinal misturado a erros observacionais inerente às técnicas de medida.

$$m_i = m_s(t_i) + R(t_i) \quad (4.12)$$

onde $m_s(t_i)$ é o sinal (supostamente periódico) e $R(t_i)$ são os erros observacionais (supostamente aleatórios)².

No presente caso, a curva de luz é constituída por 104 pontos cobrindo um $T_{max} = 215,6d$, com espaçamento variando entre 0,027d e 74,9d e moda 1,0046d. A distribuição de intervalos de tempo entre medidas sucessivas é ilustrada no histograma da Figura 4.9, na próxima página, o valor da moda aparece como uma linha vermelha no histograma.

Diversas técnicas foram desenvolvidas para tornar dados não igualmente espaçados apropriados para a aplicação do periodograma clássico, dentre as quais algumas técnicas de

²Scargle (1981, 1982) define como “erros observacionais aleatórios” erros estatisticamente independentes noite a noite (não-determinísticos), que assumem uma distribuição normal com média zero e variância constante.

interpolação; entretanto, decidimos não utilizar tais técnicas no presente trabalho pois elas interferem nos resultados.

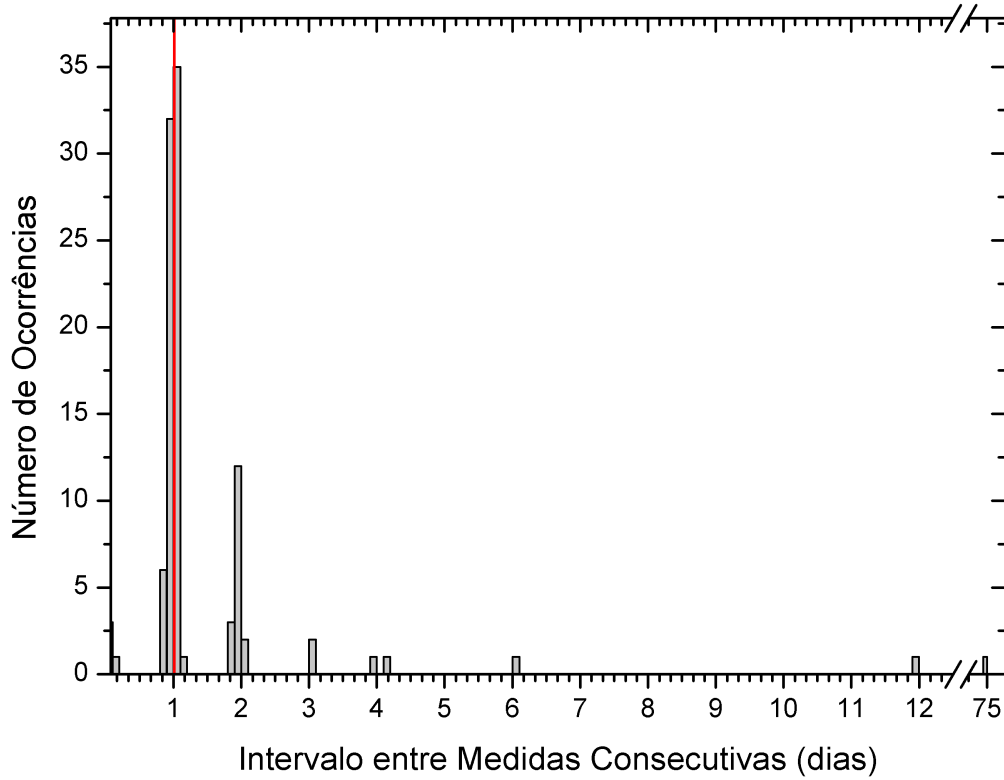


Figura 4.9: Histograma do intervalo de tempo entre medidas sucessivas, o valor da moda entre os intervalos aparece como uma linha vermelha.

4.2.2 Periodograma Normalizado de Lomb

Uma das soluções de maior aplicação para as limitações da análise via periodograma clássico é o periodograma normalizado de Lomb (LNP, *Lomb Normalized Periodogram*) (Scargle 1982; Lomb 1976) na qual são feitas ligeiras modificações na técnica descrita na seção anterior, capazes de generalizá-la para o caso de dados não igualmente espaçados.

Scargle (1982) se voltou ao problema de estudar um sinal periódico contido em uma série discreta de dados de uma variável física modelados pelas Equações (4.12) e (4.11).

O valor médio e a variância da amostra são calculados conforme as equações (3.1) e (3.3). O periodograma modificado, proposto por Scargle (1982), é definido como:

$$P_N(\omega) \equiv \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_j (m_i - \bar{m}) \cos(\omega(t_j - \tau))]^2}{\sum_j \cos^2(\omega(t_j - \tau))} + \frac{[\sum_j (m_i - \bar{m}) \sin(\omega(t_j - \tau))]^2}{\sum_j \sin^2(\omega(t_j - \tau))} \right\}, \quad (4.13)$$

onde τ é definido pela relação:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_j \sin(2\pi\omega t_j)}{\sum_j \cos(2\pi\omega t_j)}. \quad (4.14)$$

A constante τ garante que $P_N(\omega)$ seja invariante sob translação temporal. Além disso, Scargle ressalta a equivalência de (4.13) à expressão obtida por Lomb (1976) ao propor uma forma de avaliar o conteúdo harmônico de uma série de dados $m(t)$ via mínimos quadrados através do modelo $m(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$. No caso de dados igualmente espaçados (4.13) se reduz a (4.7).

Probabilidade de Falso Alarme

Horne & Baliunas (1986) ressaltam que o periodograma deve ser normalizado pela variância dos dados, σ^2 , incluindo o sinal senoidal e o ruído; dessa forma P_N assumirá uma distribuição de probabilidade exponencial com média unitária tanto quando existir um sinal periódico de frequência ω_o quanto quando o sinal for composto de puro ruído gaussiano. Isso significa que, para uma frequência ω_o , a probabilidade de $P_N(\omega_o)$ assumir um valor entre z e $z + dz$, é:

$$Pr[z < P_N(\omega) < z + dz] = e^{-z} dz. \quad (4.15)$$

Assim, a probabilidade de uma frequência ser menor que z será $1 - e^{-z}$. Se estamos falando de um periodograma no qual foram inspecionadas N_i frequências, a probabilidade de cada P_N ser menor que z será $[1 - e^{-z}]^{N_i}$ e com isso conhecemos a probabilidade de falso alarme, *i.e.* a probabilidade de que um pico tenha um valor igual ou maior que z , uma vez que os dados são compostos de puro ruído.

$$F = 1 - [1 - e^{-z}]^{N_i}. \quad (4.16)$$

Se consideramos que z é a maior potência do periodograma, então $1 - F$ fornecerá a probabilidade de a série de dados conter um sinal periódico. Esta definição explica por que o periodograma de Lomb deve ser normalizado pela variância dos dados juntos com o ruído já que qualquer outra variância destruiria a definição da probabilidade de falso alarme.

Para aplicar este método aos dados de CygOB2 utilizamos uma função do IDL chamada `LNP_TEST` para computar o LNP dos dados. A função é baseada na rotina `fasper.f` descrita na seção 13.8 do *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing* (Press et al. 1992). Dado um par de vetores **X** e **Y** (no presente caso: vetores contendo informação do tempo e magnitude das medidas) e dados os fatores de escala `ofac` e `hifac` (descritos a seguir), a rotina fornece como saída os vetores **WK1** e **WK2** correspondente às ordenadas x (frequências) e y (potência) do periodograma, sendo x em unidades de frequência (e não frequência angular); e **JMAX** a ordenada x do pico de maior potência em y .

Um último aspecto importante sobre o cálculo do LNP é como definir o número de

frequências independentes N_i que serão analisadas. Horne & Baliunas (1986) realizaram simulações de Monte Carlo para estimar o N_i ideal para uma série de N observações e encontraram $N_i = -6,362 + 1,193N + 0,0098N^2$, mas por questão de complexidade computacional Press et al. (1992) propõem em lugar do N_i :

$$N_P = \frac{\text{hifac} \times \text{ofac}}{2} N. \quad (4.17)$$

ofac é um fator de sobre-amostragem (*oversampling*) que determina quantos pontos extras de frequência serão analisados para garantir que $P_N(\omega)$ varie suavemente; e **hifac** é um fator de escala que determina quantas vezes além da frequência de Nyquist será feita a análise.

Aliasing e Frequência de Nyquist

Relembrando a teoria apresentada em 4.2.1, levar a gama de frequências analisadas além da frequência de Nyquist significa contaminar o periodograma com *aliasing*. *Aliases* continuam sendo formados conforme (4.10), mas a frequência de Nyquist, Equação (4.8), agora é definida com $T_s (=1,0\text{d})$ sendo o valor mais comum dos espaçamentos entre dados sucessivos (vide Figura 4.9); a máxima frequência para a qual existe informação na curva de luz é π dividido por $\Delta t_{\min} = \min(t_{i+1} - t_i)$ (Scargle 1982) e o *aliasing* é suavizado, i.e., a potência do pico referente ao período real é ligeiramente maior que a dos picos espúrios.³

Com isso em vista, adotamos para a análise das curvas de luz os parâmetros **hifac**=10 (i.e., são inspecionadas frequências até 10 vezes a frequência de Nyquist) e **ofac**=4; para os objetos em que não falta nenhum dado, $N=104$. De acordo com a Equação (4.17), serão inspecionadas $N_i = 2080$ frequências para composição do periodograma. Com esse parâmetros, apresentamos na Tabela 4.1 os níveis de probabilidade de falso alarme, calculados a partir de (4.16).

$1 - F$	50%	85%	95%	99%	99,9%
$P(\omega)$	7,64	8,84	9,94	11,55	13,86

Tabela 4.1: Níveis de probabilidade de um pico no periodograma normalizado de Lomb ser devido a um sinal real, calculado de acordo com os parâmetros utilizados.

Como exemplo, apresentamos na Figura 4.10 a análise via LNP da curva de luz mostrada na Figura 4.3 (Página 38). Se fizéssemos a análise somente até a frequência de Nyquist (i.e., 0,5/d), o período calculado via LNP seria de 3,5d o qual, na realidade, é um *alias*. O pico de maior potência fornece um período de 1,4d que é compatível com o período de 1,399d obtido por Henderson et al. (2011) com duas observações por noite nos filtros R e I⁴ Observe

³A título de exemplificação, a porção inferior do histograma da figura 4.9 é composta por espaçamentos de 0,016d(23,04min), 0,027d(38,88min), 0,061d(1h 27,84min) e 0,18d(4h 19,2min).

⁴O objeto #4206 é a estrela HSE 076 de Henderson et al. (2011).

que todos os picos significativos (tanto os quatro *aliases* quanto o verdadeiro) estão acima do nível de probabilidade de falso alarme menor que 0,1%, um critério de seleção que é comumente adotado na literatura de estrelas variáveis.

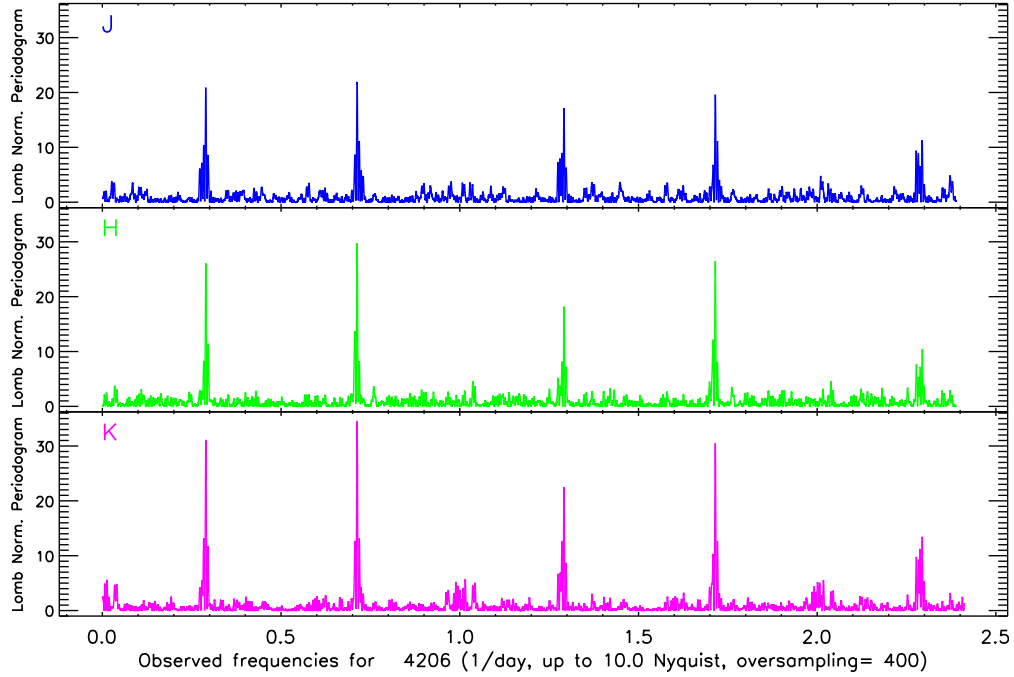


Figura 4.10: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #4206 foi medido, cuja curva de luz composta foi mostrada na Figura 4.3 (Página 38).

Outra observação pertinente sobre a análise do periodograma é que, conforme a análise apresentada na Seção 4.2.1 sobre a formação de *aliases*, esperamos o aparecimento de 4 picos significativos além do pico referente ao período real (totalizando cinco picos significativos), informação crucial na detecção de objetos multiperódicos. Voltaremos nesse assunto ao tratar o periodograma do objeto #1529 (Figura 4.5, página 39) na Seção 5.2.3 do próximo Capítulo.

A essa altura voltamos a um problema discutido no Capítulo 3: Alguns objetos não são detectados em noites ruins, o que causa perda de pontos na série temporal (um exemplo disso é a curva de luz da Figura 4.1 (Página 37) onde o número de dados que compõem a curva luz é 100, valor inferior ao total de noites observadas). Além disso, o filtro K é significativamente mais sensível que os demais, assim muitas vezes o número de observações nos demais filtros é inferior a ele, o que introduz ruído nos periodogramas. Algumas vezes a falta desses pontos na série temporal faz com que períodos diferentes sejam encontrados em cada cor, dificultando a identificação dos *aliases*. Com isso, consideramos então que o Periodograma Normalizado de Lomb era necessário, mas não suficiente para corretamente determinar períodos.

4.2.3 Dispersão em fase

Uma forma de decidir entre qual período era verdadeiro e qual era *alias* foi dobrar a curva em fase para ambos os períodos e escolher aquela que apresentava menor variância. Supomos que o período verdadeiro é aquele com a menor dispersão em fase. Consideremos novamente o exemplo do objeto #4206, cujas curvas de luz em fase para os dois possíveis períodos são mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12. A Tabela 4.2 compara os valores de dispersão em fase para cada um dos períodos.

Período	Dispersão em fase		
filtro:	J	H	K
3,45d	0,0397	0,0287	0,0187
1,40d	0,0402	0,0267	0,0177

Tabela 4.2: Dispersão em fase para a curva de luz em fase do objeto #4206 para o período de 1,4d (verdadeiro) e 3,45d(*alias*).

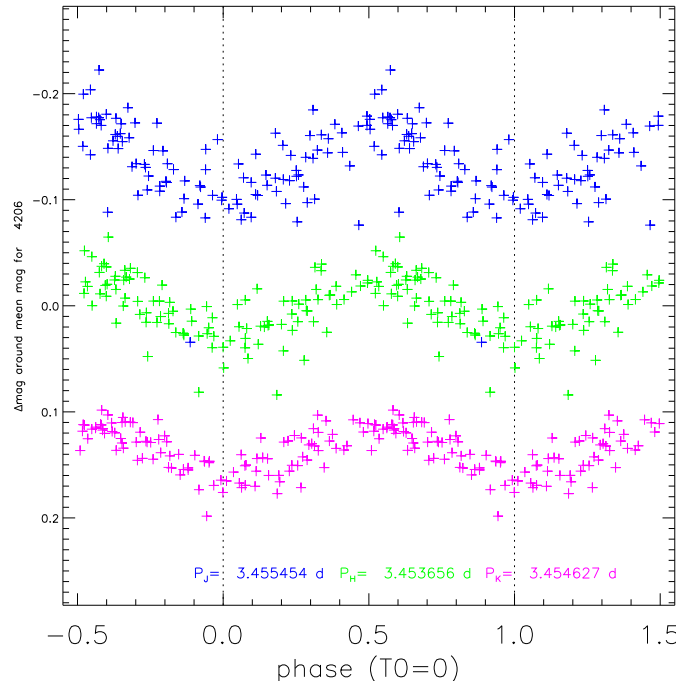


Figura 4.11: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4206 (Figura 4.3, página 38), com o período *alias* de 3,45d.

Apesar de a dispersão em fase do período 1,40d para o filtro J ser ligeiramente maior que a dispersão em fase para o período de 3,45d, a diferença entre elas está uma casa decimal abaixo da diferença de dispersão em fase para os dois períodos nos demais filtros, os quais foram utilizados para confirmar 1,40d como período verdadeiro.

Um outro exemplo de curva de luz dobrada em fase é apresentado na Figura 4.13. Neste caso não houve ambiguidade quanto à determinação do período (12,14d), o qual era visível inclusive na curva de luz.

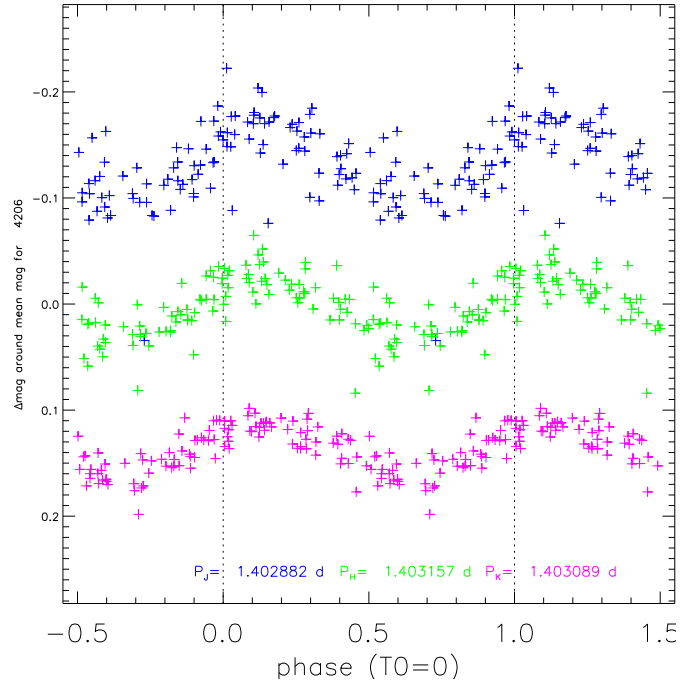


Figura 4.12: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4206 (Figura 4.3, página 38) com o período considerado correto de 1,40d.

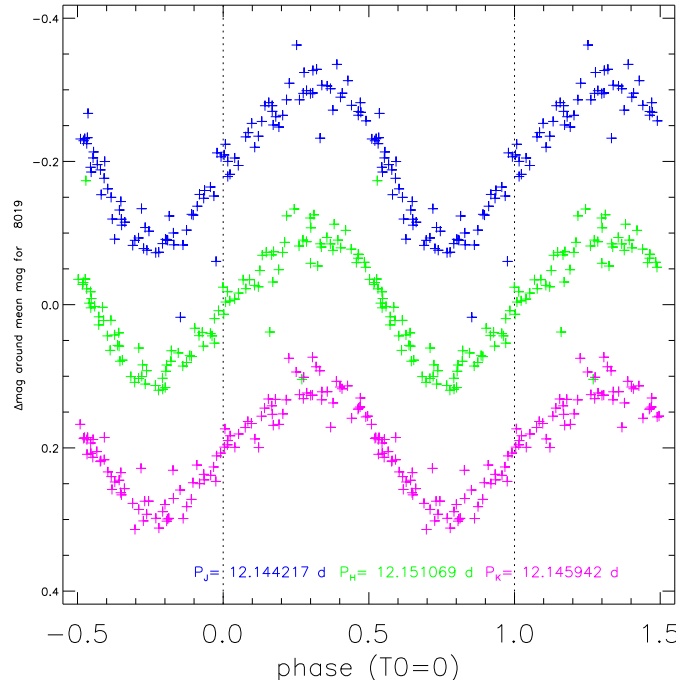


Figura 4.13: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #8019 (Figura 4.4, página 38) com o período de 12,14d.

Observe que apesar de ambas serem senoides, a curva de luz em fase da Figura 4.13 é muito mais assimétrica do que a da Figura 4.12. Além disso a amplitude da senoide na Figura 4.12 é quase uma ordem de grandeza abaixo da amplitude na Figura 4.13. Diferenças como essas serão utilizadas no Capítulo 4 para classificar as estrelas segundo a provável

origem da variabilidade.

4.3 Correlação Cruzada entre Filtros

Uma outra forma de estudar séries temporais é através da correlação cruzada. Suponha que temos uma série de dados conforme as Equações (4.11) e (4.12) (página 44), a chamaremos de $m_i^{(K)}$ onde o índice (K) faz referência à curva de luz no filtro K. A autocorrelação da série é definida como:

$$\Phi_{KK}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-\tau} (m_i^{(K)} - \bar{m}^{(K)})(m_{i+\tau}^{(K)} - \bar{m}^{(K)}). \quad (4.18)$$

A função autocorrelação mede como um ponto da série temporal está relacionado com pontos futuros ou passados separados por τ . Vale ressaltar duas propriedades importantes da função autocorrelação: (i) ela tem máximo em $\tau = 0$, i.e., $\Phi_{KK}(\tau) \leq \Phi_{KK}(0)$ e (ii) ela é simétrica em relação à origem, i.e., $\Phi_{KK}(-\tau) = \Phi_{KK}(\tau)$. Uma extensão do conceito de autocorrelação é a correlação cruzada entre dois sinais. Sejam $m_i^{(H)}$ e $m_i^{(K)}$ as curvas de luz de uma estrela nos filtros H e K respectivamente, a correlação cruzada entre filtros (CCF) será:

$$\Phi_{HK}(\tau) = \frac{1}{N'} \sum_{i=0}^{N-\tau} \frac{(m_i^{(H)} - \bar{m}^{(H)})(m_{i+\tau}^{(K)} - \bar{m}^{(K)})}{\sigma_H \sigma_K}, \quad (4.19)$$

onde N' diz quantos pares de $m_i^{(H)}$ e $m_i^{(K)}$ fizeram parte da soma e a normalização pelo desvio padrão garante que, quando $\tau=0$, a CCF fica limitada à unidade.

A CCF mede quão proximamente dois observáveis estão relacionados um ao outro para o mesmo e diferentes tempos. Ela também diz quão bem um processo pode ser predito a partir de observações (Scargle 1989), daí a sua utilidade em identificar processos semi-periódicos.

No caso de sinais periódicos, a CCF entre eles também será um sinal periódico. Caso os dois sinais tenham o mesmo período, o período da CCF será o mesmo; caso tenham períodos diferentes, o período da CCF será o mínimo múltiplo comum entre eles (Ortigueira 2005).

Para complementar a informação que a CCF fornece, calcula-se também um desvio cruzado entre filtros (DCF):

$$d_{HK}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{i=0}^{N-\tau} [(m_i^{(H)} - \bar{m}^{(H)}) - (m_{i+\tau}^{(K)} - \bar{m}^{(K)})]^2}. \quad (4.20)$$

O DCF é uma quantidade dependente da CCF, que fornece informação sobre a ordem de grandeza das amplitudes no caso em que o sinal é periódico.

Toda teoria apresentada nessa seção leva em conta o caso de dados igualmente espaçados. Ao analisar os intervalos temporais entre medidas sucessivas (Figura 4.9, página 45),

julgamos razoável a hipótese de dados igualmente espaçados e calculamos as curvas de CCF e DCF atribuindo um valor inteiro para cada noite, supondo uma frequência de observações condizente com o valor da moda entre as observações reais (1 observação por noite). Tal hipótese torna a CCF susceptível a erros sistemáticos, fixa sua frequência de Nyquist ao valor $0,5 \frac{1}{d}$ e a exclui como ferramenta primária do cálculo de períodos. Por outro lado, estudar a curva de CCF mostrou-se uma ferramenta prática e rápida para por em cheque os resultados obtidos via LNP uma vez que, caso exista um período ele é refletido como um perfil senoidal na CCF.

Apesar de não fornecer informação completa sobre os períodos, a curva de CCF foi considerada critério primário na seleção das estrelas passíveis de classificação por variabilidade dentre os 25014 objetos do catálogo. Isso porque dada a hipótese de que para a variação na curva de luz ter sentido físico ela deve ocorrer similarmente em todos os filtros (hipótese que é razoável dado que estamos lidando com bandas fotométricas centradas em comprimentos de onda muito próximos e, portanto, relacionados aos mesmos fenômenos físicos), espera-se que quando isso é verdade suas propriedades aproximem-se daquelas da função autocorrelação tal que a correlação seja máxima (i.e., próxima de 1,0) quando $\tau=0$.

A ocorrência desse critério é observada ao comparar a curva de CCF do objeto #6257 na Figura 4.14 na próxima página com as demais curvas de CCF (Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18). Na primeira, não existe um máximo central nem observa-se simetria em torno de $\tau = 0$, o que indica que a variação da magnitude é descorrelacionada (não estacionária) e não se enquadra nos processos físicos que buscamos. Antes de passar à apresentação de exemplos é importante dizer que toda a análise realizada via curva de CCF foi feita variando-se τ de -60d até +60d de um em um dia.

Na Figura 4.15 observamos a correlação máxima para o objeto #17145 (Curva de luz na Figura 4.1, página 37) ocorrendo pontualmente em $\tau = 0$, atingindo o valor máximo 1,0. Além disso, a curva de CCF possui uma concavidade, o que sugere um sinal periódico com período maior que 160d, portanto fora da nossa resolução⁵. A partir da curva de DCF podemos inferir a amplitude média da variação como sendo 0,08mag.

A Figura 4.16 mostra a CCF para o objeto #4206 (Curva de luz na Figura 4.3, página 38) a qual exemplifica o caso em que a curva de CCF fica tolhida pela frequência de Nyquist, mascarando o período verdadeiro. Note, porém, que a curva de DCF fornece uma noção correta dos valores de amplitude. Os valores de amplitude reais, conforme calculados na Seção 4.4 a seguir, concordam em ordem de grandeza com a curva de DCF⁶.

⁵Por resolução entendemos o intervalo de 120d da correlação. Quando usamos um intervalo maior que esse, o N' das Equações (4.20) e (4.19) fica muito pequeno e as curvas ficam muito sensíveis a pontos com muito ruído provenientes de noites ruins.

⁶Valores reais de amplitude para o objeto #4206 nos filtros J, H e K calculados via ajuste de mínimos

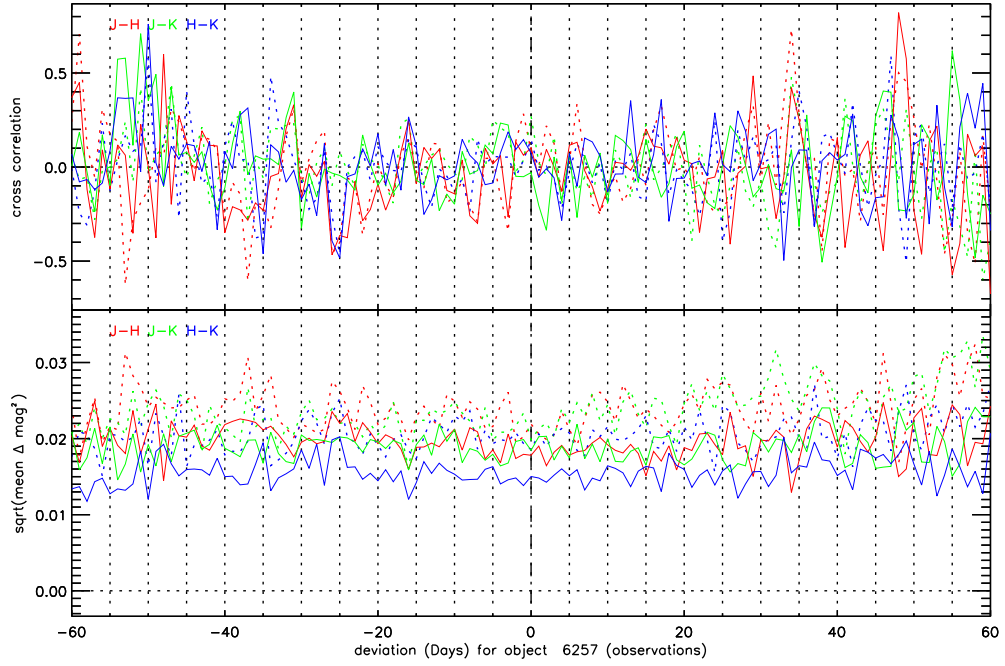


Figura 4.14: Curvas de CCF e DCF para o objeto #6257, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.2, página 38.

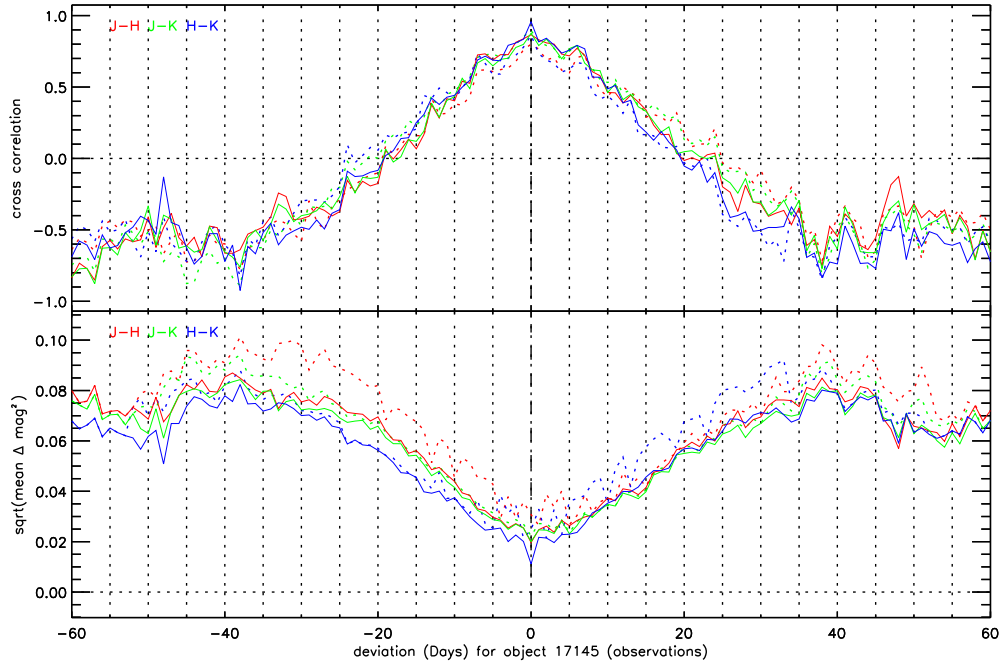


Figura 4.15: Curvas de CCF e DCF para o objeto #17145, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.1, página 37.

A Figura 4.17 mostra a curva de CCF do objeto #8019 cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.4. O período via LNP foi 12,147d e também é observado nas curvas de luz e CCF. Note que ela é mais simétrica em relação ao $\tau=0$ que no caso do objeto #4206 (Figura

quadrados de um modelo senoidal à curva de luz teórica (Seção 4.4), são: 0,0339, 0,0297 e 0,0241.

4.16).

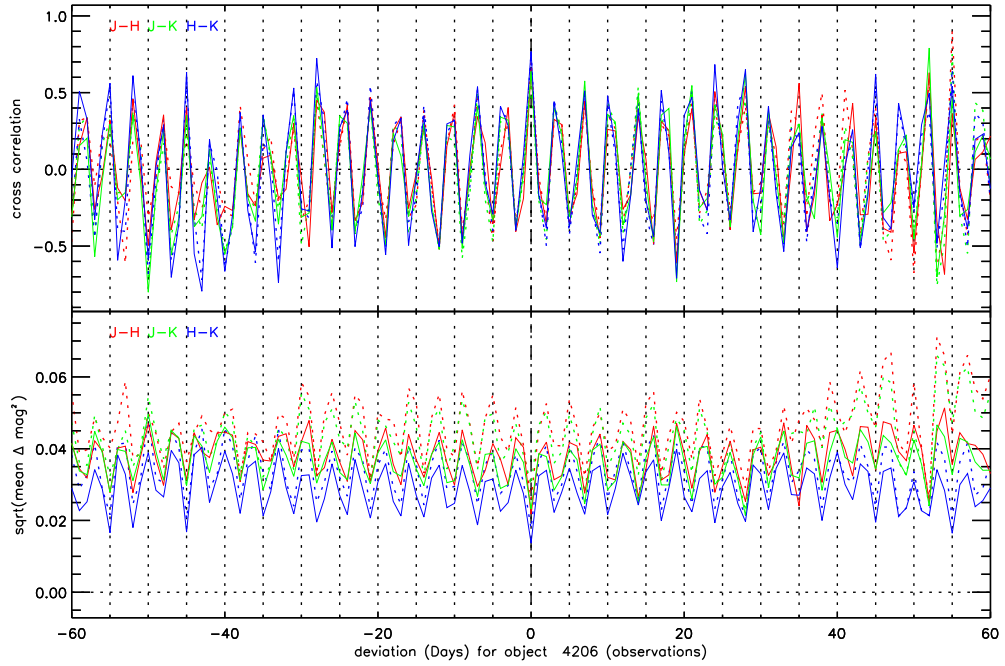


Figura 4.16: Curvas de CCF e DCF o objeto #4206, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.3, página 38.

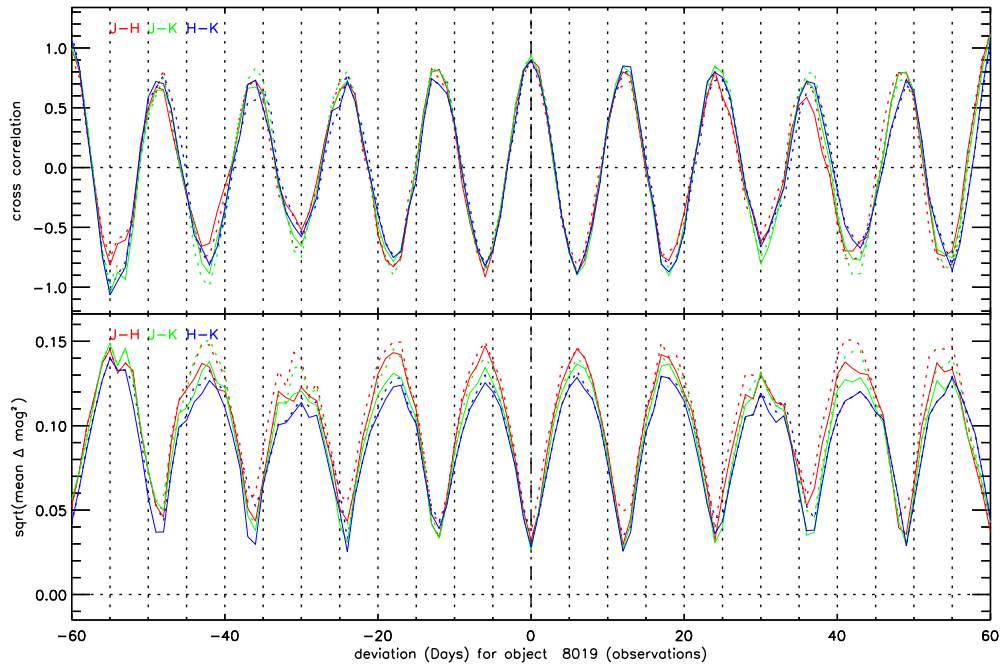


Figura 4.17: Curvas de CCF e DCF para o objeto #8019, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.4, página 38.

Um último exemplo da utilidade da curva de CCF é a detecção de objetos multi-periódicos. Na Figura 4.5 foi apresentada a curva de luz composta do objeto #1529, a curva de CCF para este objeto, Figura 4.18, deixa clara a existência de (pelo menos) dois

períodos: um deles maior que 140d com amplitudes da ordem de 0,1 magnitudes e o outro por volta de 8,0d com amplitudes menores, por volta de 0,05 magnitudes.

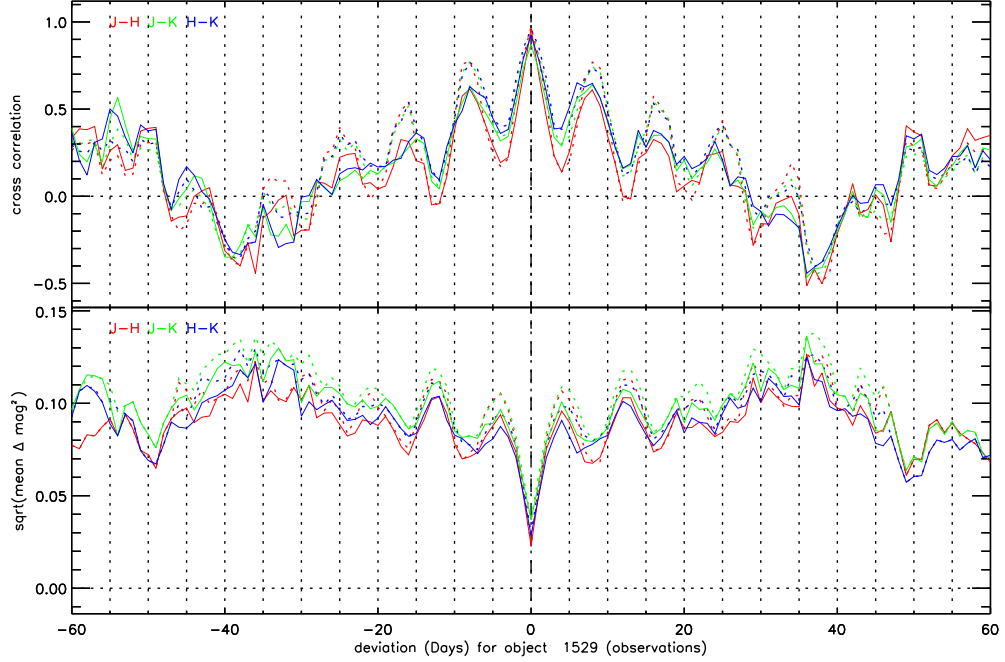


Figura 4.18: Curvas de CCF e DCF para o objeto #1529, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 4.5, página 39.

O cálculo das curvas de CCF e DCF aqui apresentadas (Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18) foi realizado por uma rotina escrita em IDL denominada `filterx.pro` conforme as definições em (4.18) e (4.20).

4.4 Modelo Senoidal

Tendo em vista que várias das curvas de luz demonstram ter uma variabilidade bem aproximada por uma função senoidal, a Equação (4.2) foi generalizada para uma série de funções senoidais com amplitudes, períodos e fases diferentes, como:

$$m(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \phi_i), \quad (4.21)$$

onde N é o número de funções cosseno, ω_i representa as frequências, A_i a amplitude e ϕ_i a fase de cada uma. Através de um ajuste por mínimos quadrados tentamos ajustar a série da Equação (4.21) às observações com um N adequado. O objetivo é ajustar curvas harmônicas estritamente periódicas às observações, nos 3 filtros, e amostrá-las nos mesmos tempos de observação para estudar melhor as propriedades de nossos estudos de periodograma e correlações.

Vimos que as curvas de luz sintéticas poderiam ser utilizadas para reproduzir satisfatória-

mente as curvas de luz de estrelas com variabilidade tipo mancha ou estrelas pulsantes. Visto que a análise de Fourier suprime a fase da oscilação e que a hipótese de dados igualmente espaçados compromete a exatidão da curva de CCF, encontramos no ajuste por mínimos quadrados de curvas sintéticas um alternativa para a obtenção da fase e amplitudes desses objetos.

Como exemplo apresentamos o ajuste por mínimos quadrados para o objeto #8019. Utilizamos como entrada o valor médio entre os períodos em cada um dos filtros, o valor médio dos máximos de amplitude na curva de DCF (Figura 4.16, página 54) e uma fase qualquer. Após 89 iterações, obtivemos os valores para amplitudes e fase apresentados na Tabela 4.3. O ajuste é mostrado na Figura 4.19, onde as cruzes (+) representam os dados reais (conforme o padrão de cores das curvas de luz compostas originais) e os círculos cheios, os pontos da curva de luz sintética (segundo o padrão de cores azul, verde e púrpura para J, H e K respectivamente), a curva em linha contínua segue o sinal senoidal contínuo usado na confecção da curva de luz sintética.

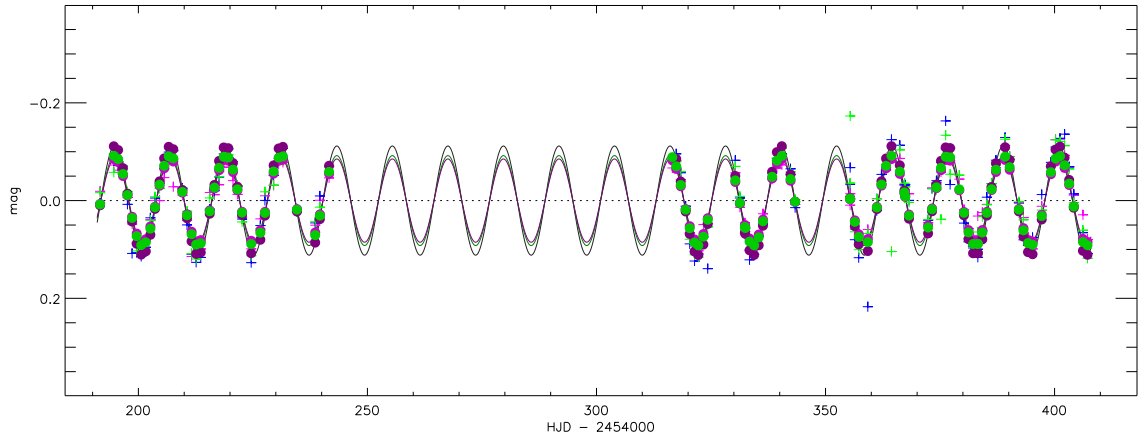


Figura 4.19: Curvas de luz sintéticas ajustadas à curva de luz do objeto #8019 (Figura 4.3, página 38) para obtenção das amplitudes e fase.

Um outro exemplo é o ajuste por mínimos quadrados de dois períodos para o objeto #1529, mostrado na Figura 4.20. Os valores para as amplitudes e fases fornecidos pelo ajuste após 95 iterações são apresentados na Tabela 4.4.

#8019		Amplitudes		
Período (dias)	Fase (rad)	J	H	K
		(magnitudes no filtro)		
12,1225(35)	$1,356(13)\pi$	0,1116(41)	0,0919(40)	0,0851(40)

Tabela 4.3: Resultados obtidos via ajuste por mínimos quadrados de uma senoide à curva de luz do objeto #8019 com o período médio obtido via LNP.

Observe que o ajuste para o objeto #1529 é *pior* do que o do objeto #8019. A diferença

em qualidade ocorre devido a curva de luz do objeto #8019 ser mais próxima de uma senóide do que a curva de luz do objeto #1529⁷.

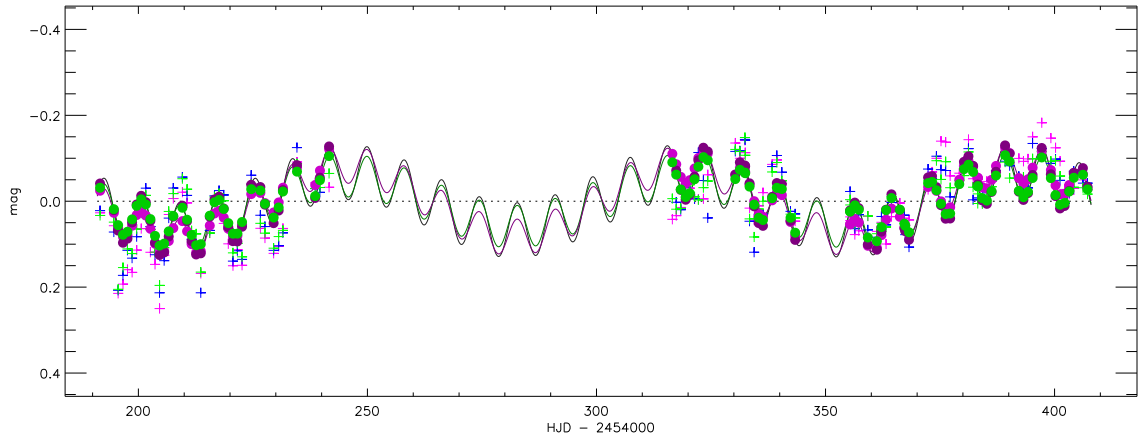


Figura 4.20: Curvas de luz sintéticas multiperiódicas ajustadas à curva de luz do objeto #1529 (Figura 4.5, página 39) para obtenção das amplitudes e fase.

#1529		Amplitudes		
Período (dias)	Fase (rad)	J	H	K
(magnitudes no filtro)				
73,08(15)	$0,2202(25)\pi$	0,0676(78)	0,0640(77)	0,0593(77)
8,1880(59)	$0,4511(25)\pi$	0,05(12)	0,08(36)	0,0423(78)

Tabela 4.4: Resultados obtidos via ajuste por mínimos quadrados de duas senóides (equação (4.21)) à curva de luz do objeto #1529 com os períodos médios obtidos via LNP.

As curvas de CCF, DCF e LNP também foram geradas para a curva de luz sintética e utilizadas para julgar a qualidade do ajuste e verificar a diferença entre o período real e os *aliases*. Voltaremos a elas no Capítulo 5.

A confecção, manuseio, aplicação e análise das curvas de luz sintéticas foi realizada por uma rotina escrita em IDL denominada `scluk.pro`. Todas as funções e rotinas aqui descritas (`LNP_TEST`, `filterx.pro` e `scluk.pro`), foram utilizadas como sub-rotinas de um procedimento em IDL para confecção e análise das curvas de luz denominado `typeuk.pro`.

O `typeuk.pro` permite a análise de todos os objetos da amostra em sequência, ou a análise de objetos individuais. Para cada objeto, ele lê a tabela de dados organizada pelo `ukp83.pro` (Seção 3.2.1) e calcula todos os parâmetros estatísticos necessários para a análise. No caso de análise de objetos individuais, o número de identidade do objeto a ser estudado é fornecido através da linha de comando; os dados para tal objeto são lidos e preparados para análise: as datas e magnitudes são normalizadas para média zero e organizadas em ordem

⁷Parece haver um problema em nosso algoritmo para mínimos quadrados quando calculamos o erro do ajuste de objetos multiperiódicos. O problema será investigado antes de passarmos ao trato das demais 15 sub-regiões.

crescente de data. São chamadas as sub-rotinas `LNP_test.pro` e `filterx.pro`; o operador pode então escolher entre finalizar a análise ou fornecer os parâmetros necessários para o ajuste de um modelo senoidal via sub-rotina `scluk.pro`. Apresentarei no próximo capítulo alguns resultados obtidos após a análise dos objetos interessantes.

Capítulo 5

Catálogo Provisório de Variáveis em CygOB2

Verificamos visualmente as curvas de luz, CCF e DCF dos 25014 objetos, selecionando aqueles com variabilidade correlacionada entre filtros, *i.e.*, objetos com alta correlação cruzada entre filtros (valores próximos de 1,0) quando $\tau=0$. Sob esse critério, selecionamos 557 estrelas¹, as quais denominamos objetos interessantes. Desses, 408 apresentavam variabilidade com caráter senoidal, 3 apresentavam variabilidade tipo *flare*, 51 apresentavam mínimos tipo eclipse, 60 apresentavam variabilidade de longo período e 35 apresentavam alta correlação cruzada entre filtros, mas não se enquadravam nos grupos anteriores.

Relacionando as descrições do Capítulo 3 com as ferramentas do Capítulo 4, apresentaremos no presente capítulo uma classificação prévia para os objetos selecionados. Tratamos novamente na Seção 5.1 as estrelas mais constantes da amostra. Apresentaremos na Seção 5.2 as variáveis cujas curvas de luz apresentaram caráter senoidal: Os objetos para os quais foi possível calcular períodos com certa confiabilidade são apresentados na Subseção 5.2.1; aqueles com período ambíguo são apresentadas na Subseção 5.2.2. Apresentaremos na Seção 5.3 objetos com outros tipos de variabilidade. Dentre eles estão alguns candidatos a variável tipo eclipse (Subseção 5.3.2), variáveis tipo *flare* (Subseção 5.3.1) e uma coletânea de objetos visivelmente variáveis cuja resolução dos nossos dados não foi suficiente para uma classificação tentativa (Subseção 5.3.3).

¹As estrelas selecionadas como interessantes equivalem a 2,23% de toda a amostra; Quando consideramos os objetos da amostra com pelo menos 23 noites de observação válidas, elas equivalem a 4,41% da amostra.

5.1 Constantes

Selecionamos na Seção 3.3 os objetos mais constantes da amostra segundo os critérios de desvios geométrico e padrão mínimos. Naquele capítulo, vimos que de acordo com os valores de desvio padrão que não era vantajoso utilizar fotometria diferencial nos dados.

Já apresentamos ao decorrer da dissertação dois dos dez objetos selecionados como mais constantes da amostra: #15574, cuja curva de luz foi apresentada na Figura 3.10 (página 33) e #6257, cuja curva de luz foi mostrada na Figura 4.2 (página 38) e cujas curvas de correlação e desvio cruzado entre filtros foram apresentadas na Figura 4.14 (página 53). Como último exemplo de tais objetos, apresentamos a estrela #13465, cuja curva de luz composta é mostrada na Figura 5.1. Apresentamos na Figura 5.2 as curvas de correlação e desvio cruzado entre filtros e na Figura 5.3 o periodograma normalizado de Lomb para tal objeto.

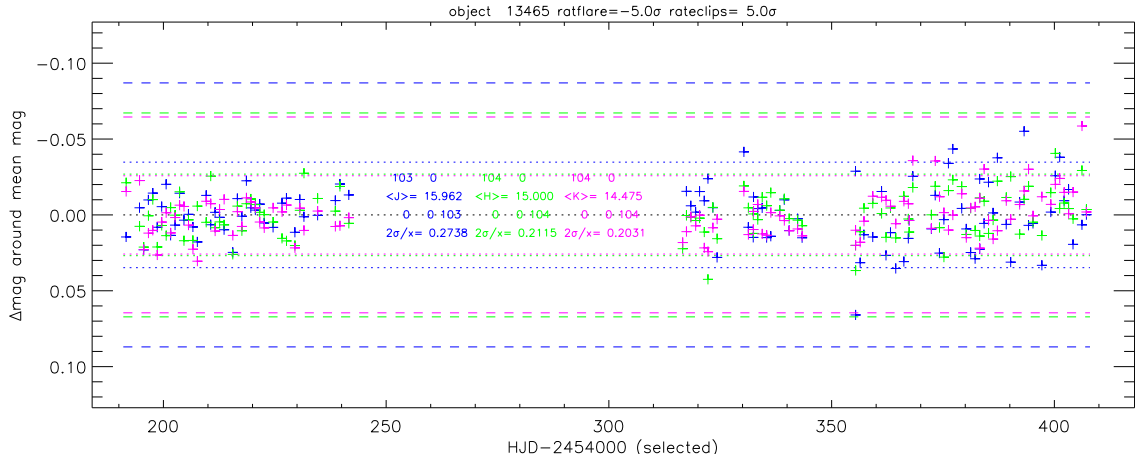


Figura 5.1: Curva de luz composta do objeto #13465, selecionado como a sétima estrela mais constante da amostra.

Apesar de o objeto ser claramente inconstante fotometricamente segundo a curva de luz, a variação é aleatória tal que os gráficos de CCF, DCF e LNP não fornecem informações úteis sobre a variabilidade da estrela. Vê-se que existe alguma correlação entre os filtros, mas esta é fraca e nunca ultrapassa o valor de 0,5. Já o periodograma apresenta picos descorrelacionados entre os filtros, com nenhum ultrapassando o nível de de 13,86, adotado como critério de seleção de períodos segundo a probabilidade de falso alarme menor que 0,1% conforme apresentado na Tabela 4.1 (página 47).

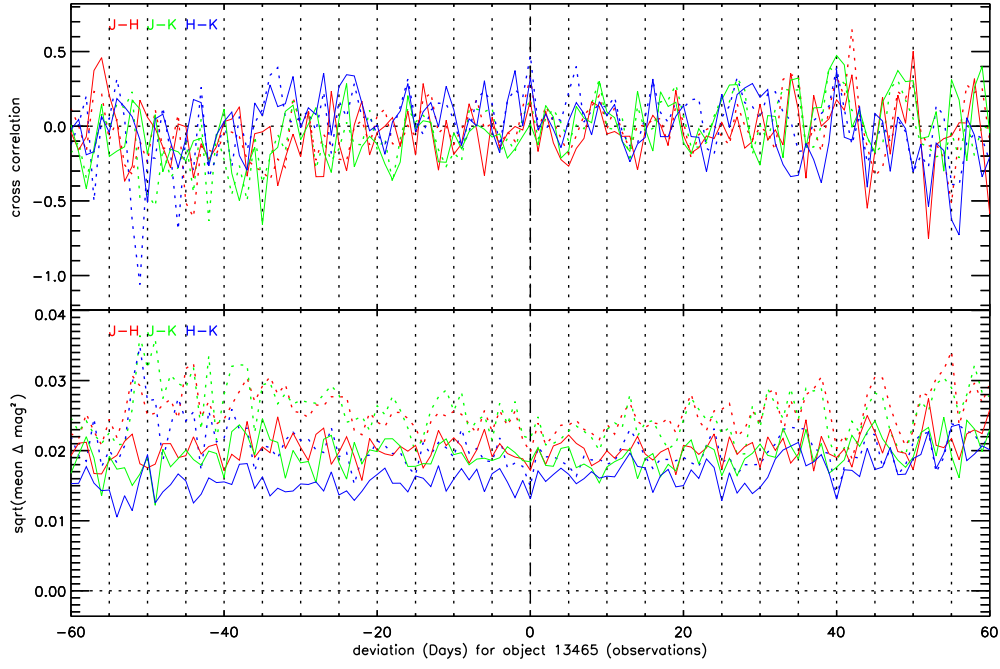


Figura 5.2: Curvas de CCF e DCF entre filtros para o objeto #13465, considerado constante segundo valores limítrofes de desvio padrão e geométrico.

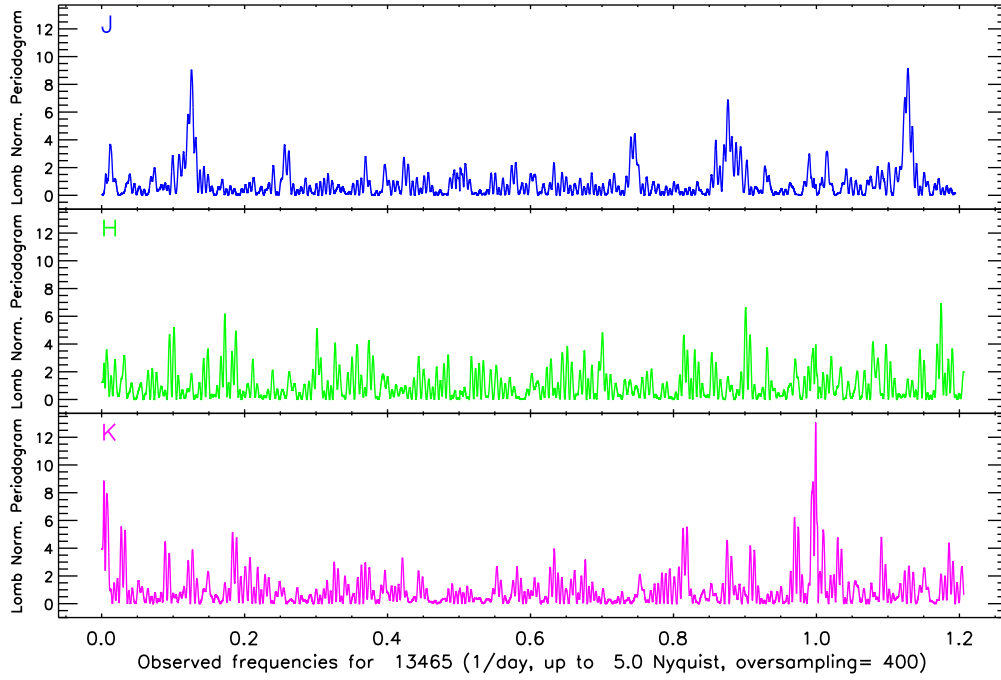


Figura 5.3: Periodograma Normalizado de Lomb para o objeto #13465, considerado constante segundo valores limítrofes de desvio padrão e geométrico.

5.2 Variáveis Senoidais

Consideramos variáveis senoidais os objetos para os quais foi possível aplicar o modelo descrito na Seção 4.4. Dentre estes, consideramos tentativamente a classificação tipo mancha para aqueles objetos cuja variabilidade possuía baixa amplitude e cujas curvas de luz e de

correlação apresentassem um caráter senoidal. Considerando a simplicidade do modelo, estrelas pulsantes também se enquadrariam nesses critérios, mas consideramos improvável a detecção de tais objetos devido ao caráter rápido desse tipo de variabilidade (períodos menores que um dia) combinado com a nossa resolução temporal.

5.2.1 Curvas de luz com Período Determinado:

Tipo I:

De acordo com a descrição da Seção 2.2.1 e com os parâmetros acessíveis através da curva de luz, consideramos como variável Tipo I (Manchas Frias) objetos em que:

- (a) Existia periodicidade;
- (b) as amplitudes sejam baixas, menores que alguns décimos em J;
- (c) apresente amplitudes decrescentes de J para K;
- (d) Existia estacionariedade (i.e., a curva de luz era periódica em todos os ciclos com pouca (ou nenhuma) alteração em sua amplitude e período).

Como exemplo apresentaremos em detalhe dois objetos que se enquadraram em tais critérios: #4272 e #11317. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram as curvas de luz compostas para ambos. A partir delas podemos inferir visualmente períodos da ordem de 14 dias e 12 dias respectivamente. Além disso, observamos que a estrela #4272 é estacionária, enquanto a periodicidade da estrela #11317 fica “turva” após alguns ciclos, colocando a condição (d) em pauta.

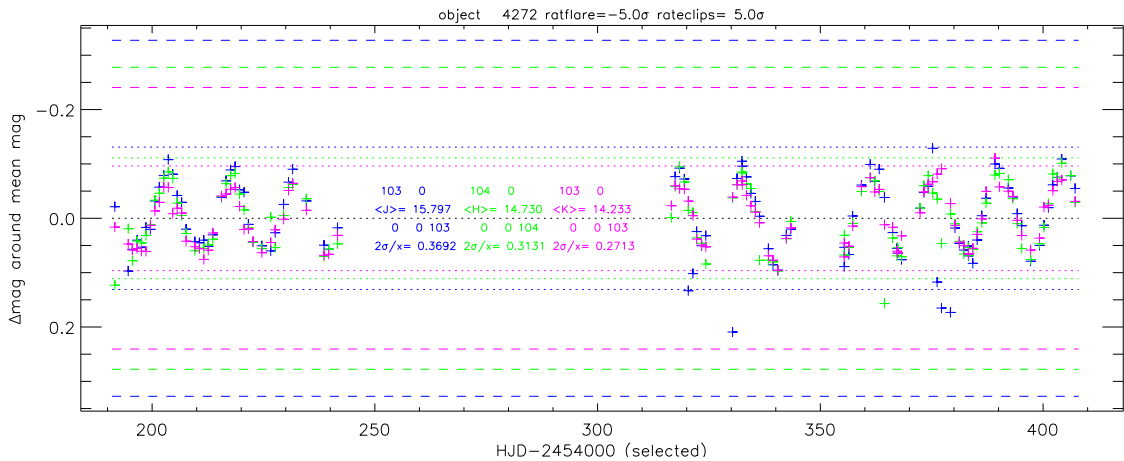


Figura 5.4: Curva de luz composta do objeto #4272, candidato à classificação Tipo I.

Apresentamos na Tabela 5.1 os parâmetros fotométricos e astrométricos obtidos para ambos. Os erros de medidas fotométricas dos dados são $< 0,020$ magnitudes (Casali et al. 2007). O período apresentado foi obtido tomando-se a média do período determinado para

cada filtro via LNP (Figuras 5.8 e 5.9, página 65). Além disso, apresentamos o desvio médio da média, que dá uma noção da amplitude da variabilidade. Note que, conforme imposto em (c), esse valor é decrescente com o avermelhamento do filtro (de J para K).

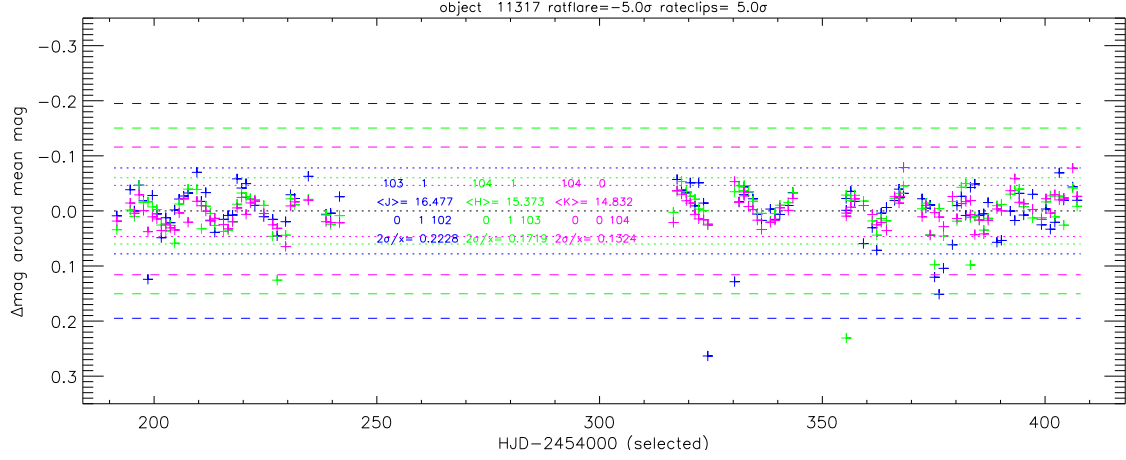


Figura 5.5: Curva de luz composta do objeto #11317, candidato à classificação Tipo I.

ID	α	δ	$\langle P \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
4272	20:33:23,588	41:23:47,433	14,355d	15,797	14,730	14,233
Não				0,060	0,051	0,044
11317	20:33:43,963	41:24:42,760	12,323d	16,477	15,373	14,831
Não				0,033	0,028	0,021

Tabela 5.1: Dados fotométricos e astrométricos dos objetos #4272 e #11317, candidatos à classificação Tipo I.

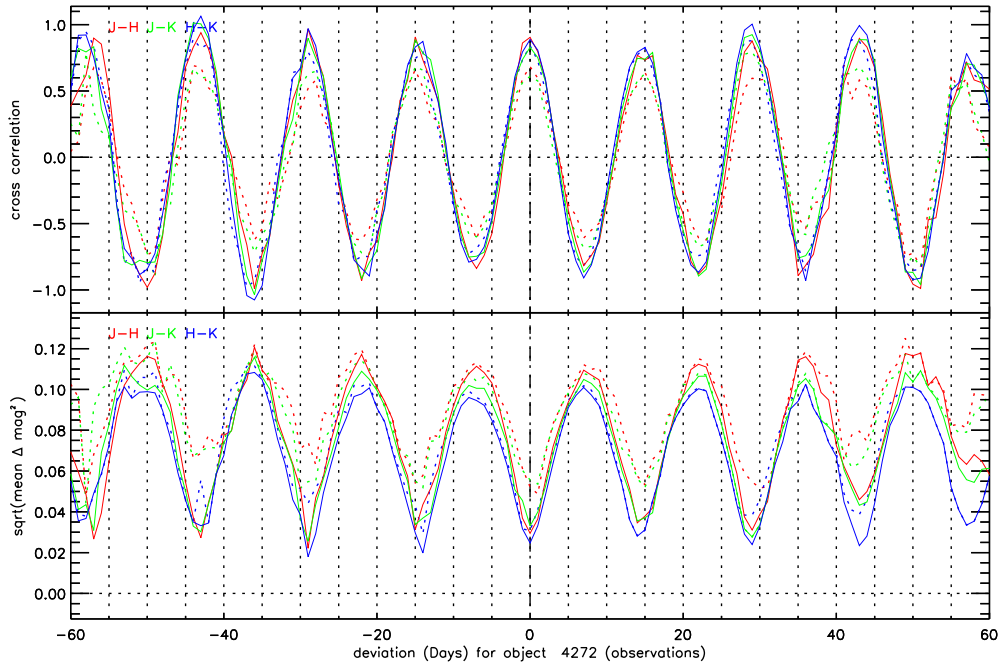


Figura 5.6: Curvas de CCF e DCF para o objeto #4272 (Figura 5.4, página 62).

As curvas de CCF e DCF são apresentadas nas Figuras 5.6 e 5.7. Ao compará-las, nos deparamos novamente com a questão da estacionariedade: No caso da estrela #4272, período, correlação e amplitude máxima permanecem constantes em todos os ciclos; na curva da estrela #11317 há perda de resolução decorrente da incerteza nos últimos ciclos da curva de luz. A incerteza no período dos últimos ~ 40 dias de observação é refletida na desfiguração dos dois últimos ciclos da curva de correlação entre filtros (τ entre 20 e 60 dias).

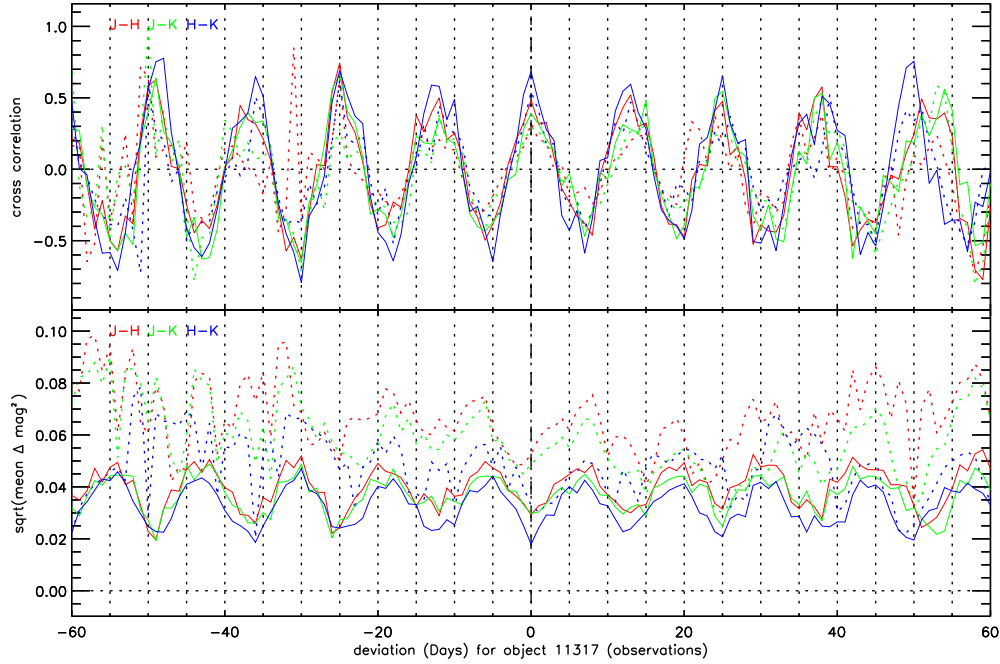


Figura 5.7: Curvas de CCF e DCF para o objeto #11317 (Figura 5.5, página 63).

Os periodogramas são apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9 (página 65). Neles confirmamos os períodos inferidos via curva de luz e curva de CCF. Note que o periodograma da estrela #11317 tem mais ruído que o da estrela #4272.

As curvas de luz dobradas em fase para os períodos obtidos em cada filtro através do LNP são apresentadas na Figura 5.10 (página 66). Nelas é possível confirmar graficamente os valores para o desvio médio da média apresentados na Tabela 5.1.

Por último apresentamos nas Figuras 5.11 e 5.12 (páginas 67) as curvas de luz sintéticas para ambos os objetos, ajustadas às curvas de luz observacionais via mínimos quadrados. Através delas, verificamos mais uma vez a questão da estacionariedade: O objeto #4272 segue bem a curva senoidal por todos os ciclos, já o objeto #11317 dispersa bastante do modelo senoidal nos quatro últimos ciclos. Os parâmetros do ajuste, incluindo a fase, são apresentados na Tabela 5.2 (página 65).

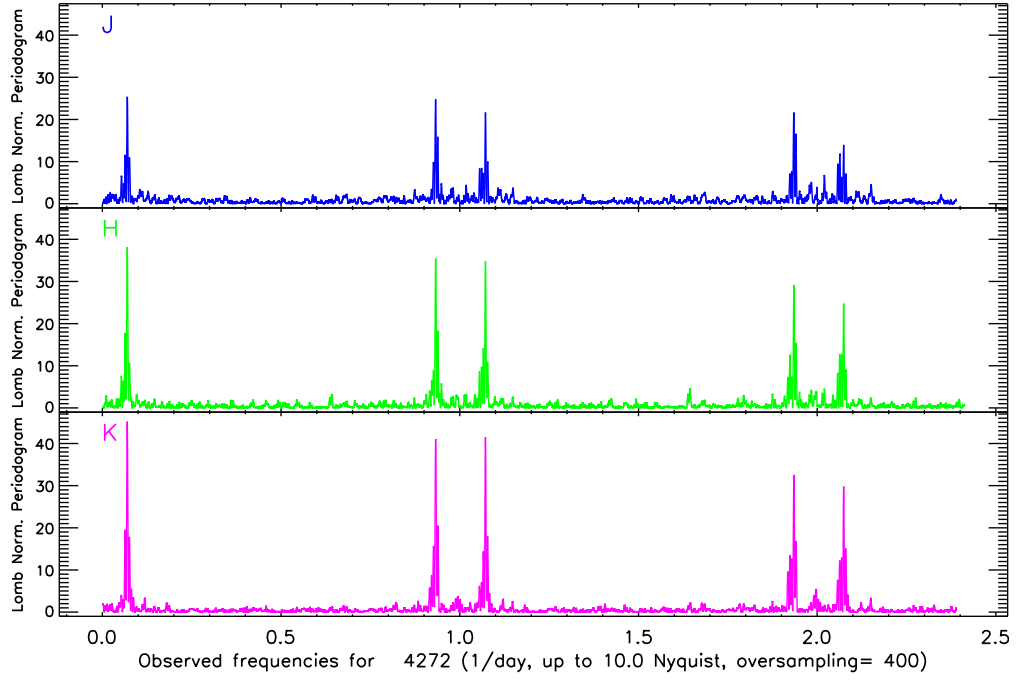


Figura 5.8: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #4272 (Figura 5.4, página 62) foi medido.

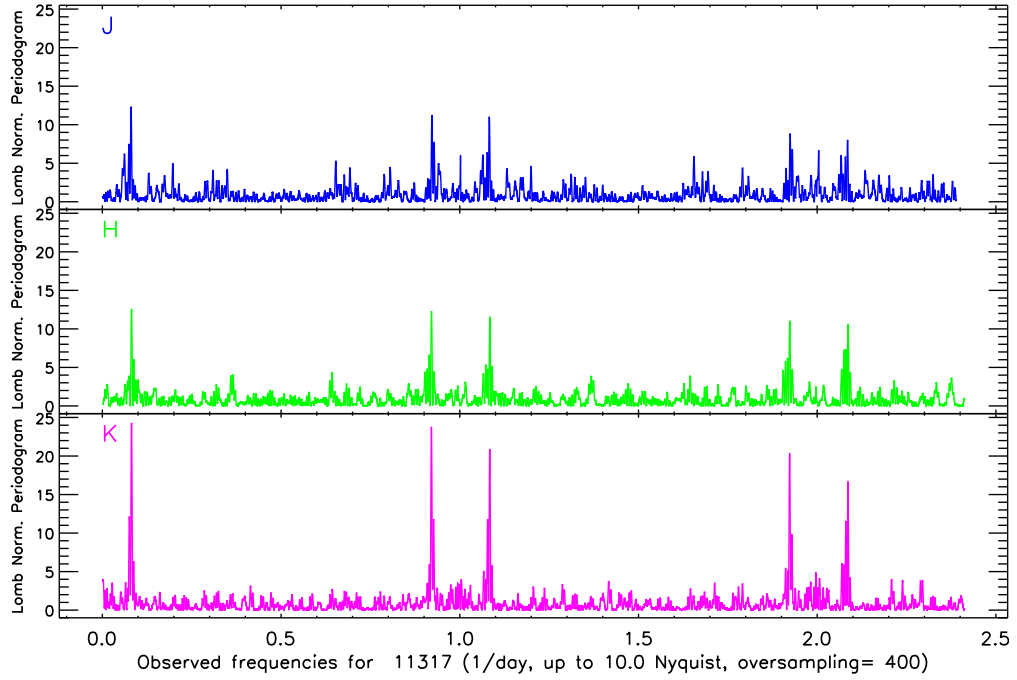


Figura 5.9: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #11317 (Figura 5.5, página 63) foi medido.

ID	P	A_J	A_H	A_K	Fase
4272	14,4021(89)d	0,0677(49)	0,0691(49)	0,0647(49)	0,329(22) π rad
11317	12,337(16)d	0,0306(47)	0,0257(47)	0,0234(47)	0,688(57) π rad

Tabela 5.2: Parâmetros do ajuste de curva senoidal aos objetos #4272 (Figura 5.4, página 62) e #11317 (Figura 5.5, página 63).

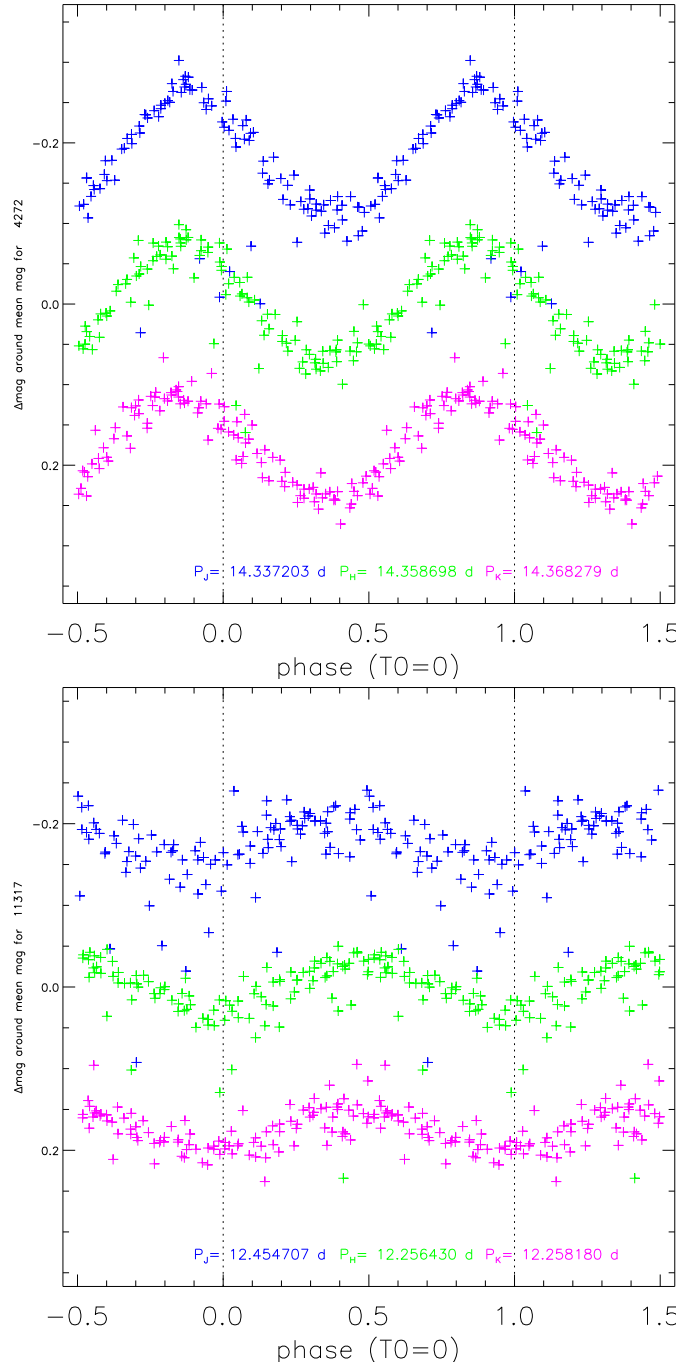


Figura 5.10: Curvas de luz dobradas em fase para os objetos #4272 (Figura 5.4, página 62), com período médio de 14,355d, e #11317(Figura 5.5, página 63), com o período médio de 12,323d.

Além dos dois objetos aqui apresentadas e do objeto #8019 (Figura 4.4, página 38) apresentado como exemplo no Capítulo 4, outros 56 objetos foram selecionados como candidatos a estrela com mancha tipo I. O maior período determinado sem ambiguidades foi 33,719(54)d, referente à estrela #21764 e o menor período determinado individualmente foi 2,43449(39), referente à estrela #21249; os dados fotométricos e astrométricos de ambos objetos, assim como dos demais objetos com período determinado estão disponíveis no Apêndice A.

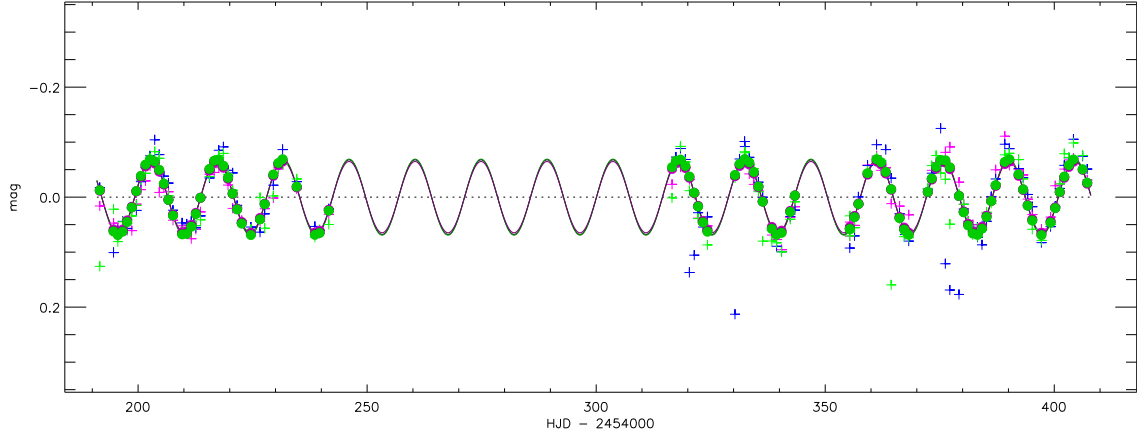


Figura 5.11: Curva de luz sintética composta ajustada por mínimos quadrados para o objeto #4272 (Figura 5.4, página 62).

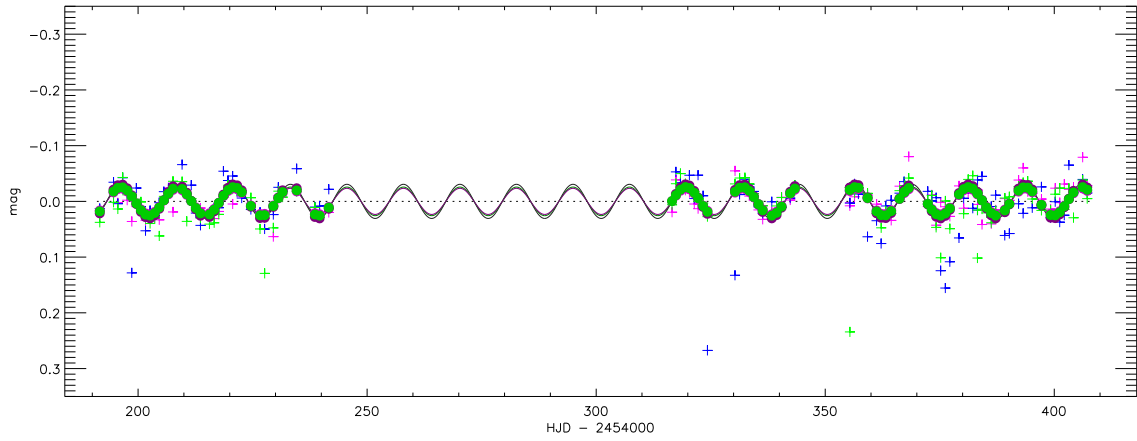


Figura 5.12: Curva de luz sintética composta ajustada por mínimos quadrados para o objeto #11317 (Figura 5.5, página 63).

5.2.2 Curva de Luz com Período Ambíguo

Conforme discutido no Capítulo anterior, um dos principais problemas na busca por períodos em séries temporais discretas (como a curva de luz) é o vazamento espectral. Um simples ponto da série temporal perdido ou uma flutuação de magnitude decorrentes da qualidade da noite, podem levar ao mascaramento do período verdadeiro. Assim, houve casos em que era impossível decidir qual dentre os cinco picos relevantes da análise via LNP era o verdadeiro e quais eram *aliases*. Apresentaremos no restante da presente Seção alguns exemplos de tais casos.

Vazamento Espectral I: Alias

Já apresentamos no Capítulo 4 o objeto #4206 (Figura 4.3, página 38) cujo período considerado correto segundo o LNP e a dispersão em fase era inferior à capacidade de detecção

da curva de CCF. Apresentamos agora uma variação do problema com os *aliases*: o objeto #2639, o qual apresenta um período da ordem de 10 dias tanto visível na curva luz (Figura 5.13), quanto nas curvas de CCF e DCF (Figura 5.14).

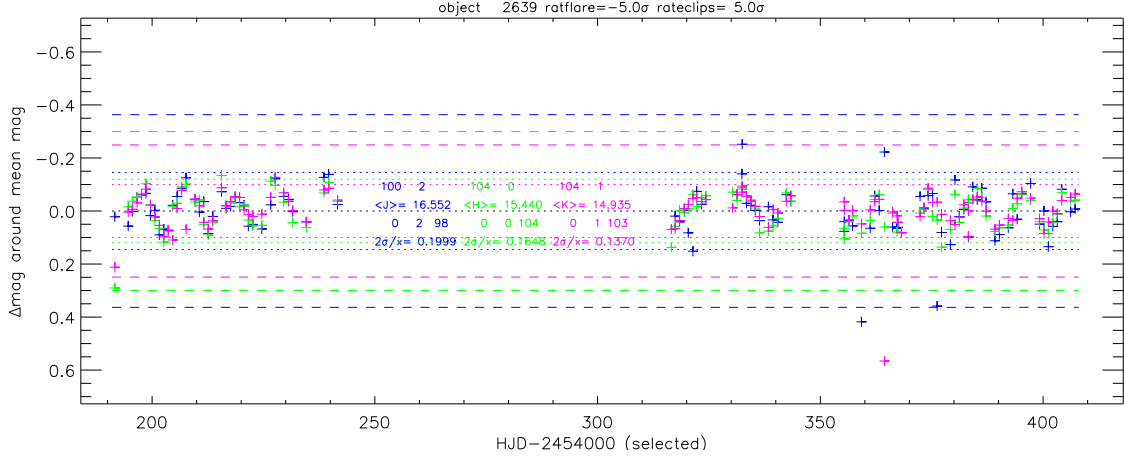


Figura 5.13: Curva de luz composta do objeto #2639, candidato à classificação Tipo I com ambiguidades quanto a determinação do período.

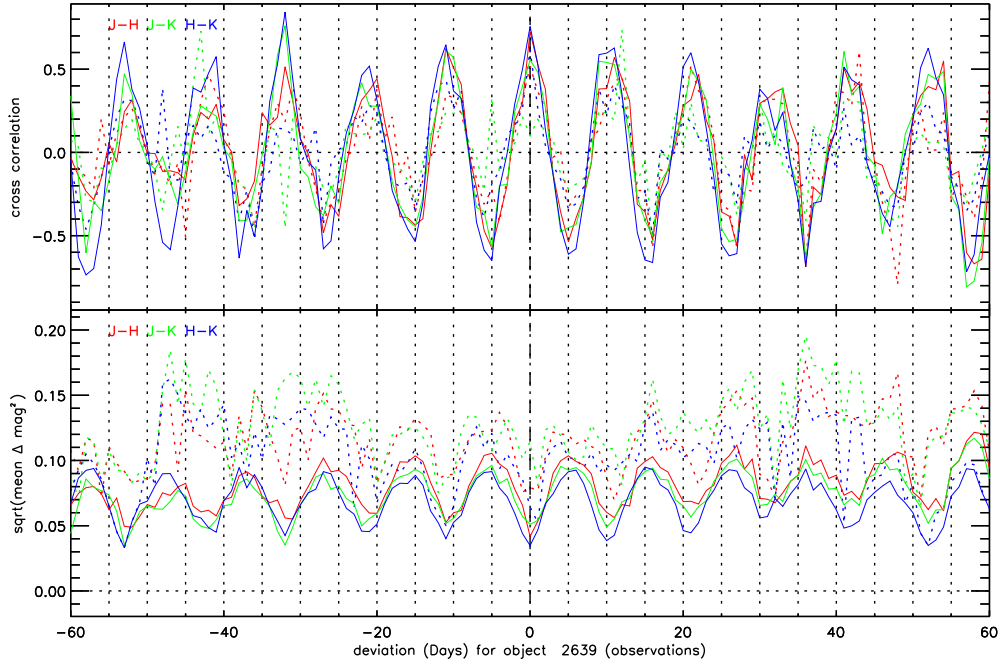


Figura 5.14: Curvas de CCF e DCF para o objeto #2639.

Quando passamos à análise via LNP (Figura 5.15) confirmamos o período 10,404d para os filtros J e H, mas no filtro K o *alias*, correspondente ao período 0,910d, tem potência maior que o período real (com 1% de probabilidade de falso alarme). Uma vez que o período maior (~ 10 d) era evidente tanto na curva de luz, quanto CCF, o adotamos como correto e passamos à análise da curva de luz dobrada em fase (Figura 5.17, página 70). A curva de luz dobrada em fase explica a ambiguidade na determinação do período: o caráter periódico

é confirmado para todos os filtros; no filtro J a dispersão em fase é grande, mas a curva segue satisfatoriamente a trilha senoidal formada pela maior parte dos pontos; já no filtro K observamos 2 pontos (ou 2 noites) com desvio em magnitude maior que 0,4 magnitudes os quais, num modelo de composição de curva por séries senoidais, fazem com que a curva de luz seja melhor reproduzida por um período curto.

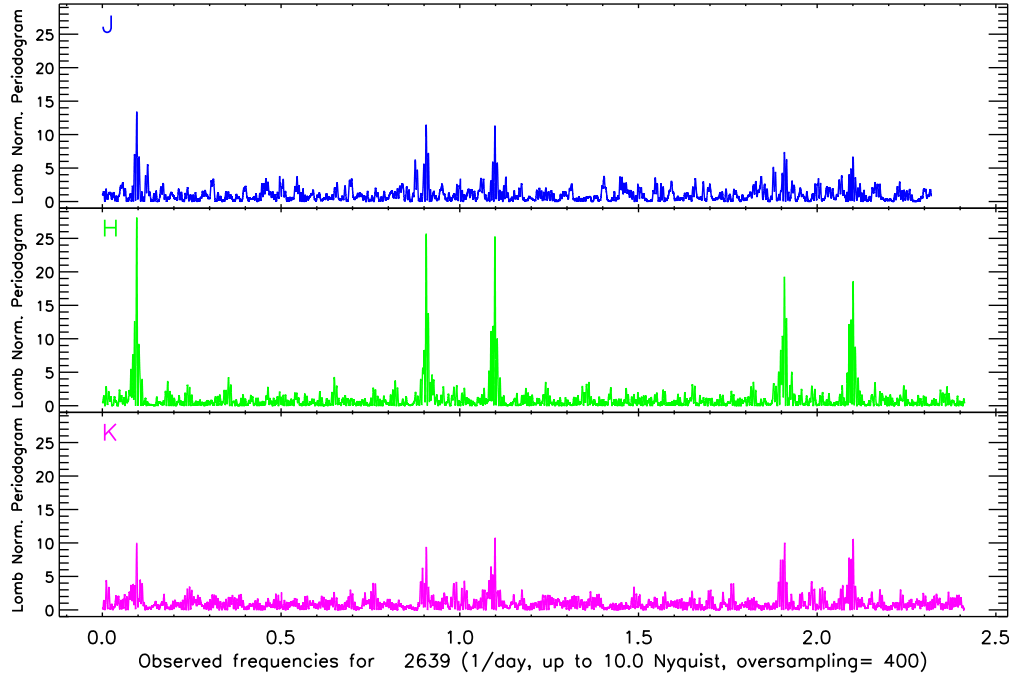


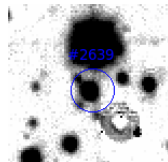
Figura 5.15: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #2639 (Figura 5.13, página 68) foi medido.

Os dados astrométricos e fotométricos do objeto #2639 são apresentados na Tabela 5.3.

ID	α	δ	$\langle P \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
2639	20:33:19,220	41:19:06,582	10,404d	16,552	15,440	14,935
não				0,064	0,055	0,049

Tabela 5.3: Dados fotométricos e astrométricos do objeto #2639 (Figura 5.13, página 68).

Figura 5.16: Estrela #2639 (Figura 5.13, página 68) no filtro K.



Quando checamos a localização do objeto #2639 na imagem original (Figura 5.16), constatamos que essa estrela encontra-se próxima a uma estrela muito brilhante. Essa proximidade é uma possível explicação para os pontos ruins no filtro K: em noites muito boas o

objeto é contaminado pela estrela muito brilhante na vizinhança; como o filtro K é o mais sensível, a contaminação é maior nele.

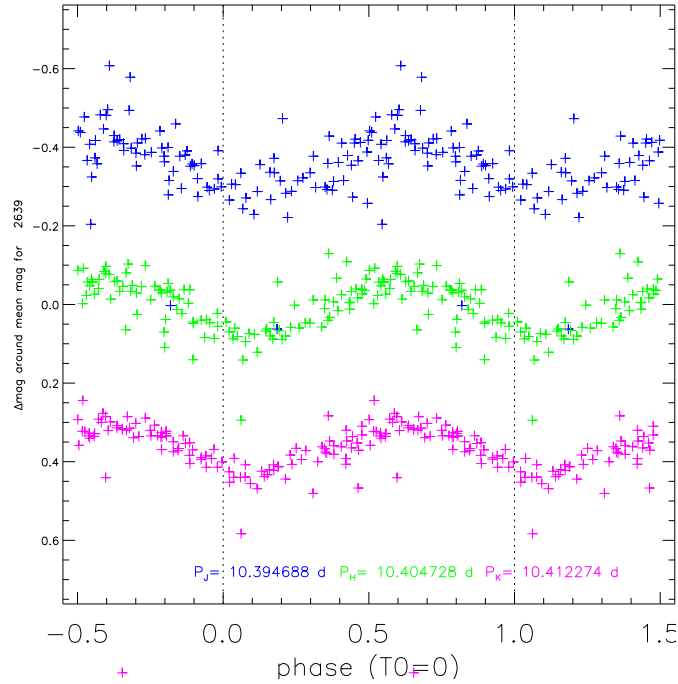


Figura 5.17: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #2639 (Figura 5.13, página 68) com o período médio de 10,404d.

Vazamento Espectral II: Formação de *Alias* em Torno de 1,0d

A curva de luz composta do objeto #13446, é apresentada na Figura 5.18, seus dados astrométricos e fotométricos são apresentados na Tabela 5.4 e suas curvas de CCF e DCF são apresentadas na Figura 5.19. Um período na ordem de 10d pode ser inferido a partir das curvas de luz, CCF e DCF e a última não difere estruturalmente daquelas apresentadas como exemplo na Subseção 5.2.1.

ID	α	δ	$\langle P \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
13446	20:33:50,556	41:27:20,362	9,200	16,875	15,625	14,939
não				0,048	0,050	0,048

Tabela 5.4: Dados fotométricos e astrométricos do objeto #13446.

Quando passamos à análise via LNP (Figura 5.20), um período de 9,2d é obtido, porém, observamos o aparecimento de picos largos em torno de múltiplos da frequência de observação ($1\frac{1}{d}$) para os filtros H e K. No filtro K tais picos ultrapassam até mesmo o limiar de 0,1% de probabilidade de falso alarme.

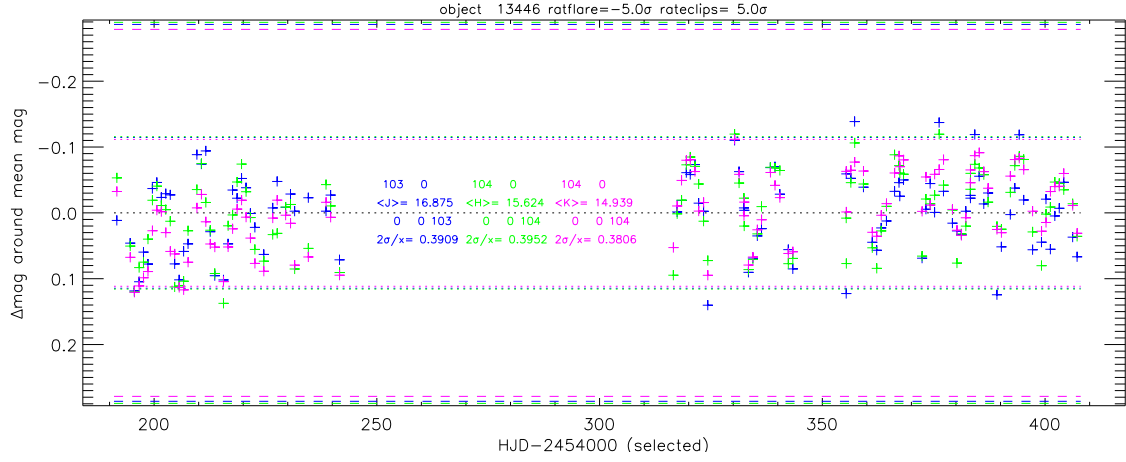


Figura 5.18: Curva de luz composta do objeto #13446, candidato à classificação Tipo I com ambiguidades quanto a determinação do período.

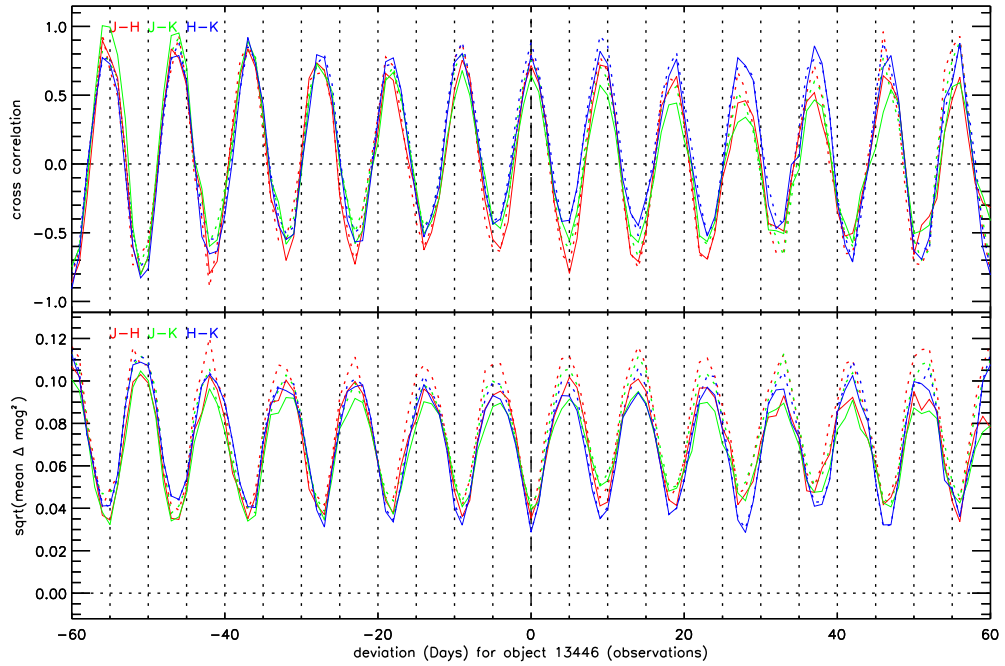


Figura 5.19: Curvas de CCF e DCF para o objeto #13446.

Este é um caso típico de vazamento espectral e interferência entre *aliases*. Apesar de não haver indícios de um período mais longo que 10d nas curvas de CCF e DCF, podemos inferir a existência de um para os filtros H e K através da curva de luz composta. Acompanhando as linhas pontilhadas em $\pm\sigma$ notamos que para tais filtros existe uma ligeira inclinação na curva de luz. Períodos muito longos resultam frequências muito próximas de zero, *e.g.*, um período de ~ 1100 d (primeiro pico significativo no filtro K) equivale a uma frequência de $\sim 0,0009\frac{1}{d}$. Em tal caso, a formação de *alias* (Equação (4.10) para $k=1,2$) inerente à distribuição temporal dos dados, resulta em dois *aliases* muito próximos à frequência 1,0 ($1,0 \pm 0,0009$) os quais interferem, resultando em um pico centrado em 1,0 com largura a

meia altura superior àquela das potências “normais”.

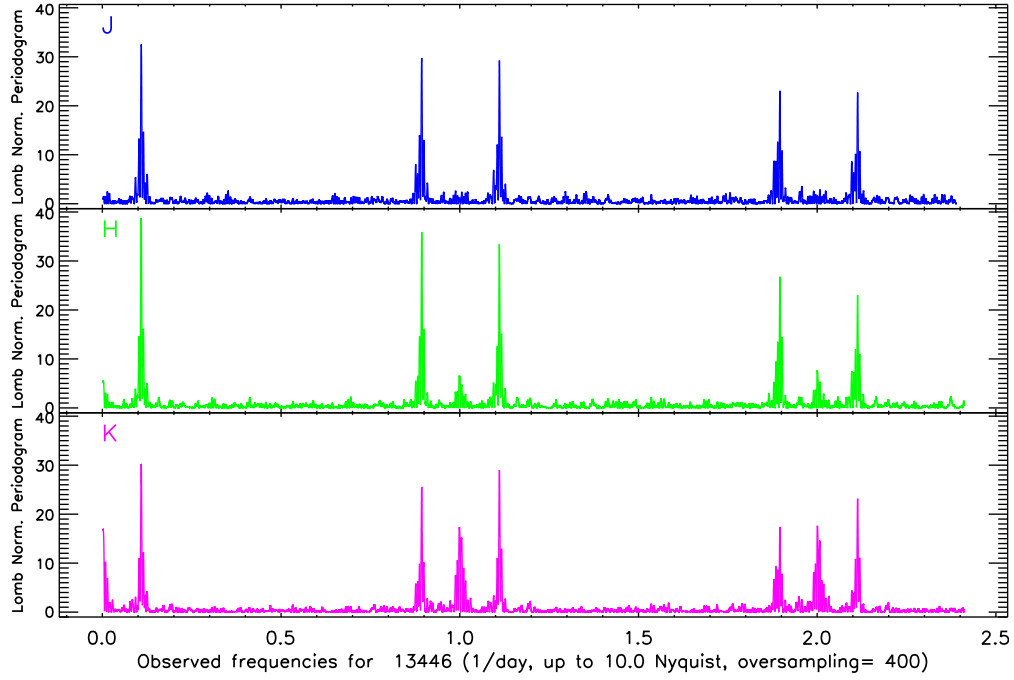


Figura 5.20: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #13446 foi medido.

Filtro Sem Períodos

Em alguns casos, um dos filtros não apresenta picos de períodos no LNP. Um exemplo é o objeto #4666, cuja curva de luz composta é apresentada na Figura 5.21. Através dela é possível inferir um período de ~ 10 d, o qual é confirmado qualitativamente na curva de CCF.

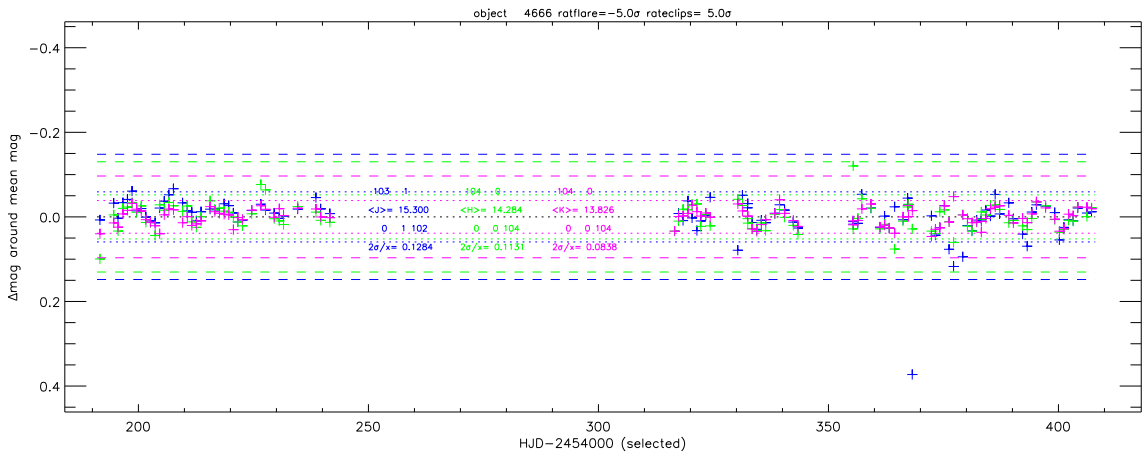


Figura 5.21: Curva de luz composta do objeto #4666, candidato à classificação Tipo I com ambiguidades quanto a determinação do período.

Quando passamos à análise do periodograma (Figura 5.22) observamos a não existência de picos significativos para o filtro J. Apesar disso, o período da ordem de uma dezena de

dias foi confirmado para os filtros H e K.

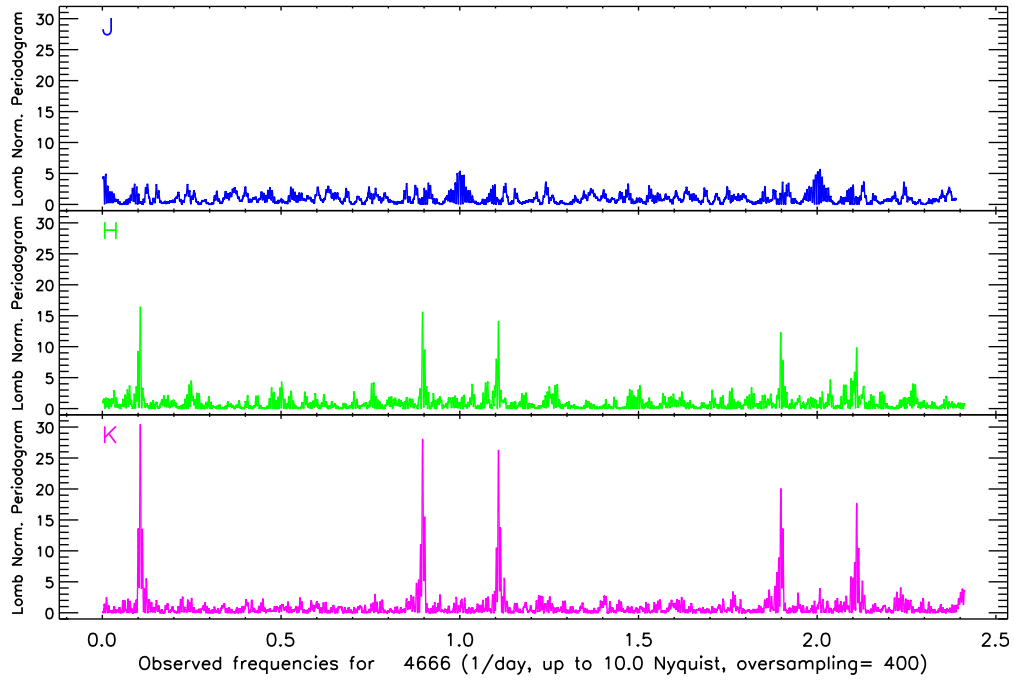


Figura 5.22: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #4666 foi medido.

Os dados astrométricos e fotométricos para tal objeto são apresentados na Tabela 5.5 e as curvas de luz dobradas em fase para o período médio de 9,411d obtidos via periodograma para os filtros H e K são mostradas na Figura 5.23

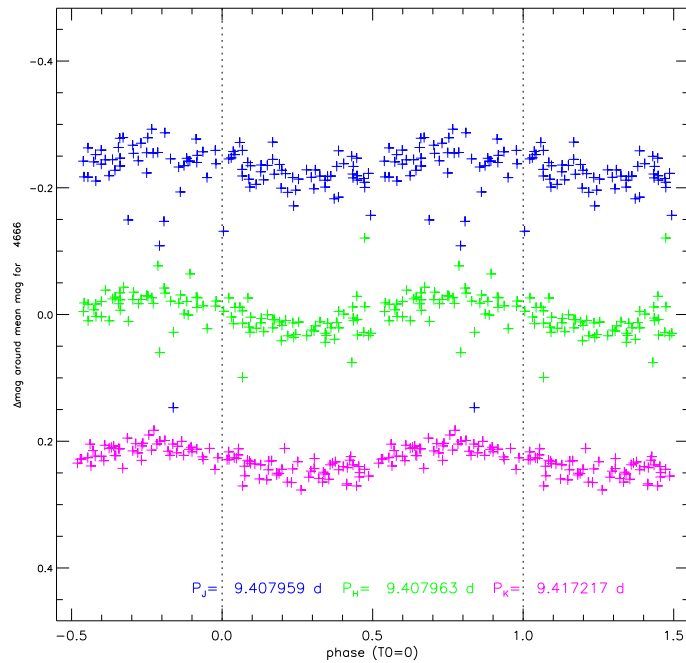


Figura 5.23: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #4666 foi medido, com período de 9,411d.

ID	α	δ	$\langle P \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
4666	20:33:24,658	41:19:07,886	9,411	15,300	14,284	13,826
2MASS J20332463+4119081 CXOCyg J203324.58+411907.9 - [AFM2007]748				0,028	0,023	0,016

Tabela 5.5: Dados fotométricos e astrométricos do objeto #4666.

Uma justificativa possível para a o periodograma sem picos significativos no filtro J é a baixa amplitude da variabilidade no objeto #4666, muito próxima dos valores limítrofes de desvio padrão. Além disso, diversos pontos no filtro J apresentaram desvio da média muitas ordens de grandeza acima da amplitude de oscilação.

Batimento

Em alguns casos foi observado batimento nas curvas de CCF e DCF. Batimento ocorre quando duas ondas com frequências ligeiramente diferentes interferem resultando em uma onda de amplitude variável com frequência igual à diferença das frequências das ondas originais. Notamos que em todos os casos de ocorrência, o batimento era devido à frequência de variabilidade do objeto ser muito próxima à frequência de Nyquist da CCF, e não devido à existência de dois períodos reais muito próximos.

O objeto #2488, cuja curva de luz é apresentada na Figura 5.24 é um exemplo desse fenômeno. Suas curvas de CCF e DCF são mostradas na Figura 5.25 (página 75).

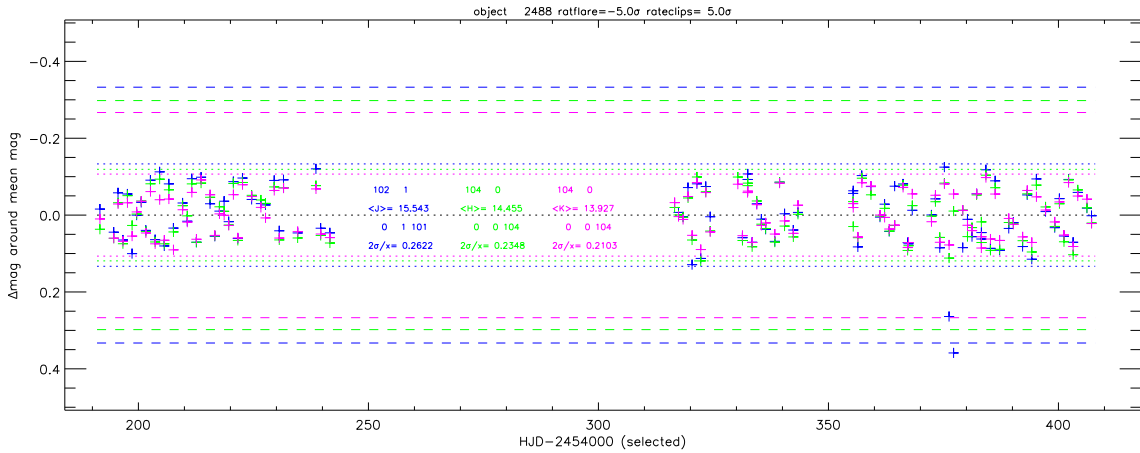


Figura 5.24: Curva de luz composta do objeto #2488, candidato à classificação tipo I, com batimento nas curvas de CCF e DCF (Figura 5.25).

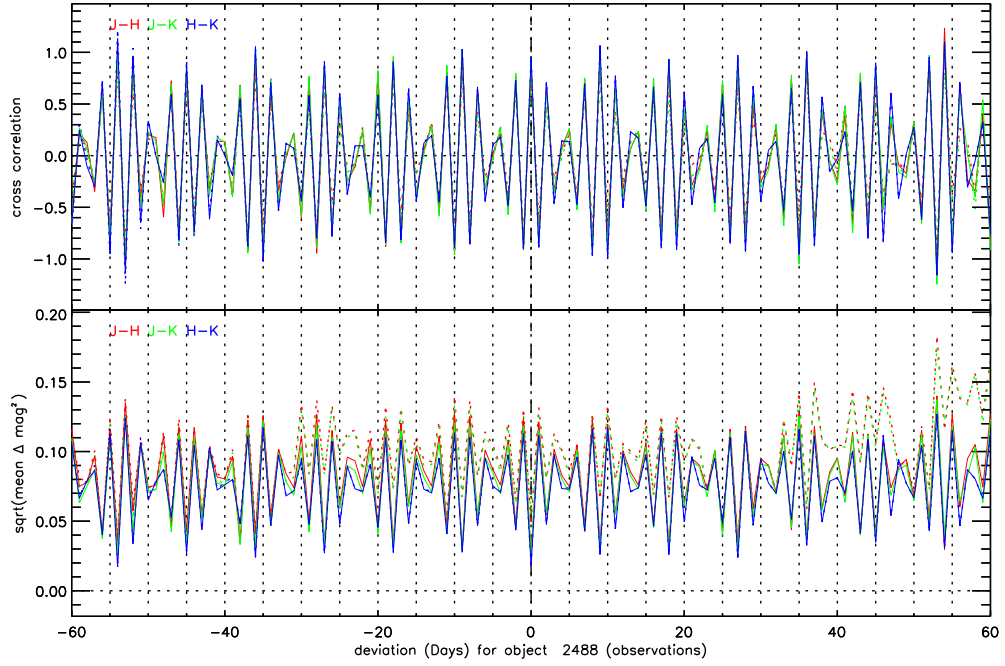


Figura 5.25: Curvas de CCF e DCF para o objeto #2488.

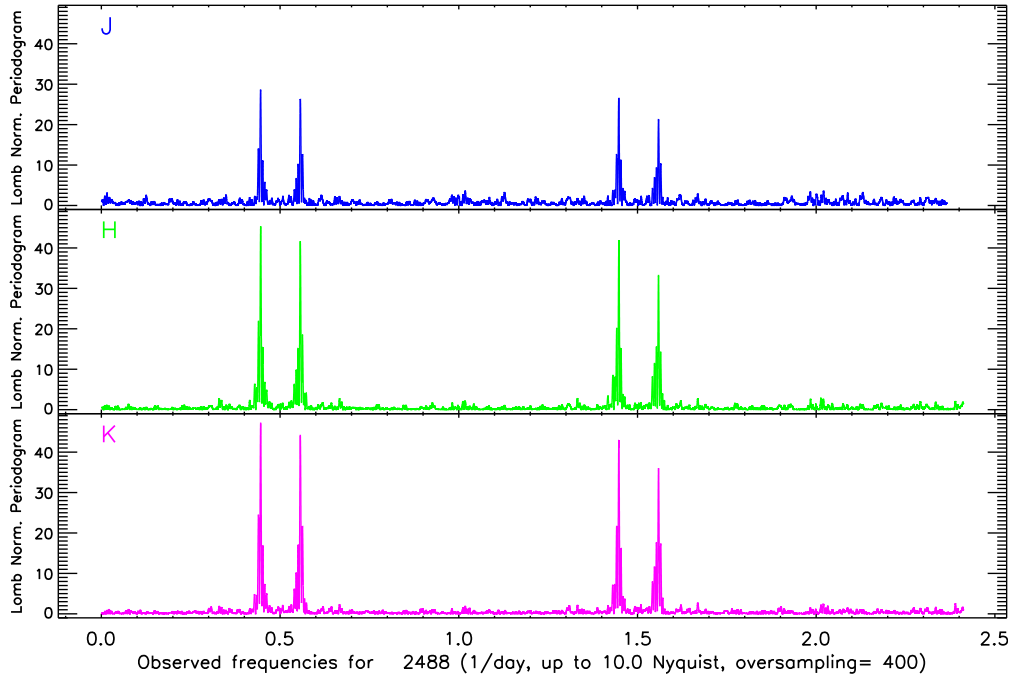


Figura 5.26: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #2488 foi medido.

A Figura 5.26 mostra o periodograma do objeto #2488 onde são visíveis apenas 4 picos relevantes, *i.e.*, o pico referente ao período verdadeiro e 3 *aliases* e não 4 como esperado de acordo com o Capítulo 4. Isso ocorre por que o próximo *alias* seria formado muito próximo à frequência $2,5\frac{1}{d}$ e a análise via LNP é finalizada antes de tais frequências. Dessa forma,

em todos os casos em que foi observado batimento na curva de CCF, o período causador de tal fenômeno contaminava o periodograma apenas com 3 picos além do verdadeiro.

Os dados fotométricos e astrométricos do objeto #2488 são apresentados na Tabela 5.6. A curvas de luz dobrada em fase para o período causador de batimento é apresentada na Figura 5.27.

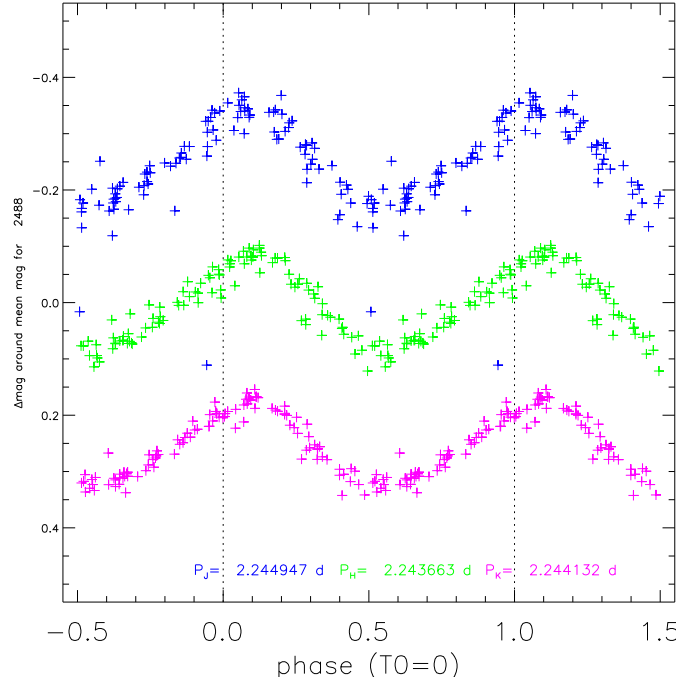


Figura 5.27: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #2488 com o período médio de 2,244d obtido via LNP.

ID	α	δ	$\langle P1 \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?			$\langle P2 \rangle$	$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
2488	20:33:18,812	41:21:17,578	2,224d	15,543	14,455	13,927
não			-	0,062	0,054	0,048

Tabela 5.6: Dados fotométricos e astrométricos do objeto #2488.

O ajuste por mínimos quadrados mostrou-se eficiente para confirmação de que o batimento nas curvas de CCF e DCF não era causado por multiperiodicidade. Na Figura 5.28 apresentamos a curva de luz sintética para o o objeto #2488 (Figura 5.24) com o período obtido via LNP (Figura 5.26) e amplitudes ajustadas aos dados observacionais via mínimos quadrados. A Tabela 5.7 apresenta os resultados de tal ajuste. Note que os valores de amplitude obtidos via ajuste por mínimos quadrados são mais compatíveis com as amplitudes das curvas de luz em fase do que o desvio médio da média apresentado na Tabela 5.6.

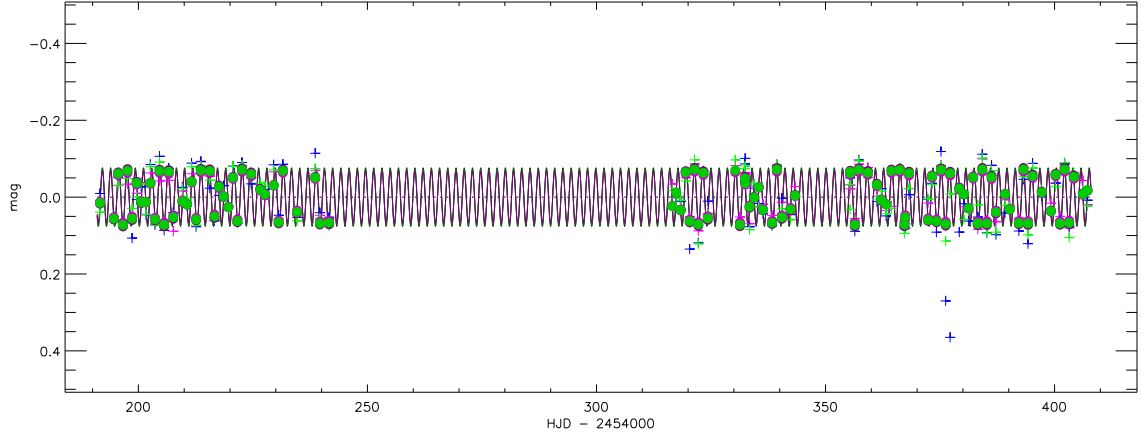


Figura 5.28: Curvas de luz sintéticas ajustadas à curva de luz do objeto #2488 (Figura 5.24, página 74) para obtenção das amplitudes e fase.

#2488		Amplitudes		
Período (dias)	Fase (rad)	J	H	K
(magnitudes no filtro)				
2,24625(20)d	$1,378(21)\pi$	0,0808(49)	0,0760(48)	0,0699(48)

Tabela 5.7: Resultados do ajuste por mínimos quadrados de uma senoide de período 2,245d à curva de luz do objeto #2488 (Figura 5.24, página 74).

Um outro exemplo da ocorrência de batimento é o objeto #17326 (Curva de luz apresentada na Figura 5.29). Multiperiodicidade pode ser inferida a partir de uma rápida análise do periodograma (Figura 5.30): nele observamos os 4 picos decorrentes do período ~ 2 d e 5 picos muito fracos decorrente de um segundo período. O batimento nas curvas de CCF e DCF (Figura 5.31, página 78), porém, não é decorrente desse segundo período e sim do mesmo fenômeno de batimento descrito no objeto #2488. Voltaremos à análise via LNP da Figura 5.30 na Seção 5.2.3.

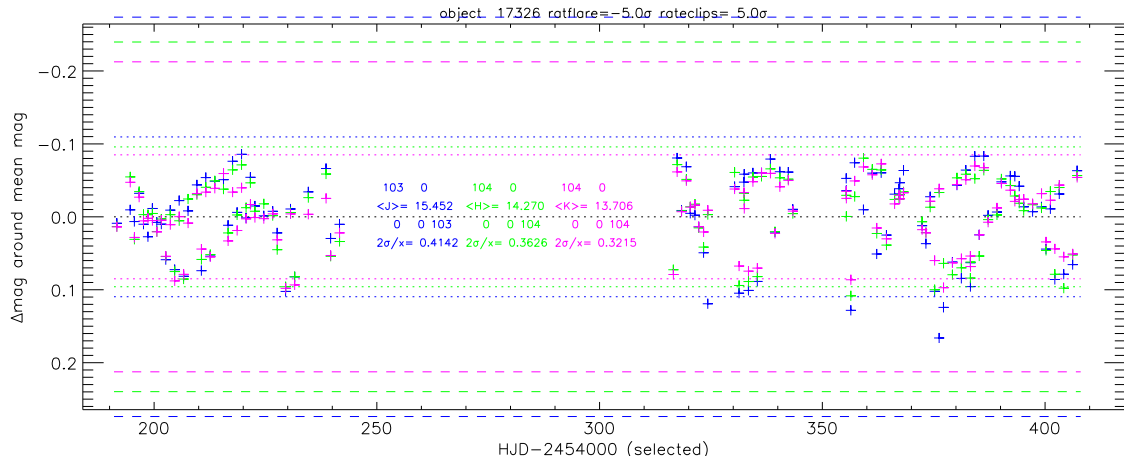


Figura 5.29: Curva de luz composta do objeto #2488, candidato à classificação tipo I, com batimento nas curvas de CCF e DCF (Figura 5.31).

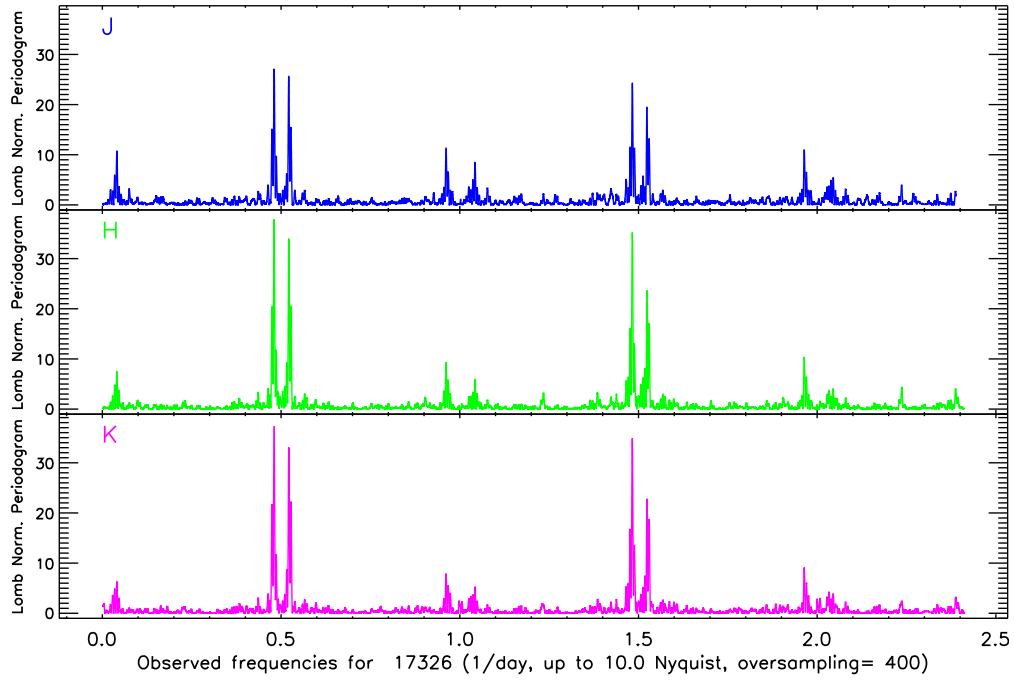


Figura 5.30: Periodograma Normalizado de Lomb para cada um dos filtro em que o objeto #17326 (Figura 5.29) foi medido.

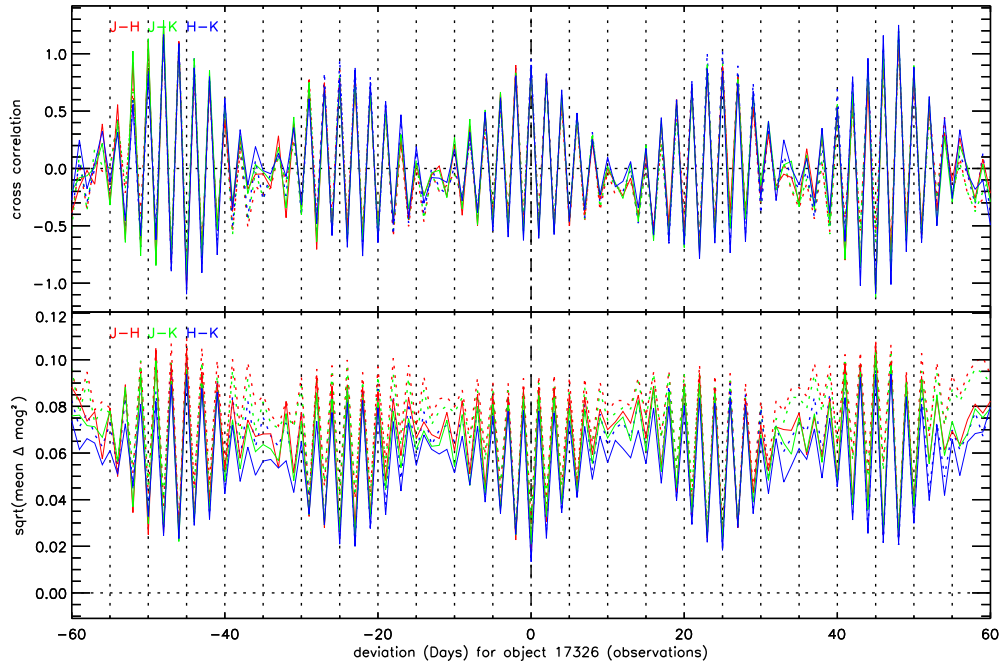


Figura 5.31: Curvas de CCF e DCF para o objeto #17326(Figura 5.29).

Os dados fotométricos e astrométricos do objeto #17326 são apresentados na Tabela 5.8. A curva de luz dobrada em fase para o período causador de batimento é apresentadas na Figura 5.32. Note que a curva de luz em fase é visivelmente uma mistura de senoides com amplitudes distintas, o que é mais um indicio de sua multiperiodicidade.

ID	α	δ	$\langle P1 \rangle$	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?			$\langle P2 \rangle$	$\langle \Delta J \rangle$	$\langle \Delta H \rangle$	$\langle \Delta K \rangle$
17326	20:34:01,029	41:27:58,886d	2,081d	15,452	14,270	13,706
não			1,040d	0,047	0,041	0,037

Tabela 5.8: Dados fotométricos e astrométricos do objeto #17326 (Figura 5.29).

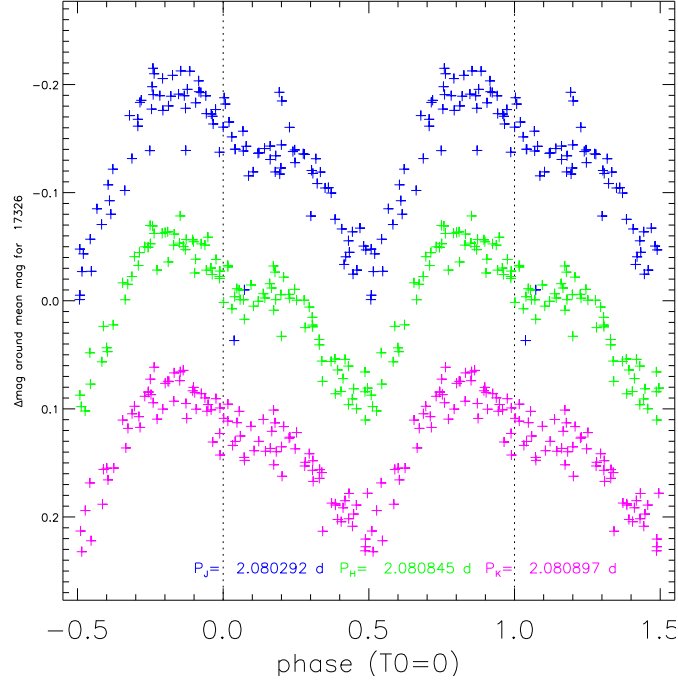


Figura 5.32: Curva de luz dobrada em fase para o objeto #17326 (Figura 5.29) com o período médio de 2,081d.

5.2.3 Multiperiodicidade

Como dito antes, uma estrela variável pode apresentar vários tipos de variabilidade simultaneamente, assim não é surpresa encontrar estrelas com mais de um período. O objeto #17362 (Figura 5.29, página 77), apresentado na Seção anterior como exemplo da ocorrência de batimento nas curvas de CCF e DCF é também um bom exemplo da existência de multiperiodicidade.

A análise via LNP de tal objeto, apresentada na Figura 5.30 (página 78), já continha indícios de um segundo período, já que além dos 4 picos referentes ao período de ~ 2 d causador do batimento na curva de CCF, existia uma sequência de 5 picos secundários com probabilidade de falso alarme por volta de 11% em J e 50% nos demais filtros. Uma análise automática dos periodogramas nos levaria a não considerar tais períodos, porém, ao simular uma curva de luz sintética com o período de 2,081d (pico de maior potência no periodograma) e ajustá-la aos dados observacionais, obtivemos um ajuste insatisfatório, mostrado na Figura 5.33.

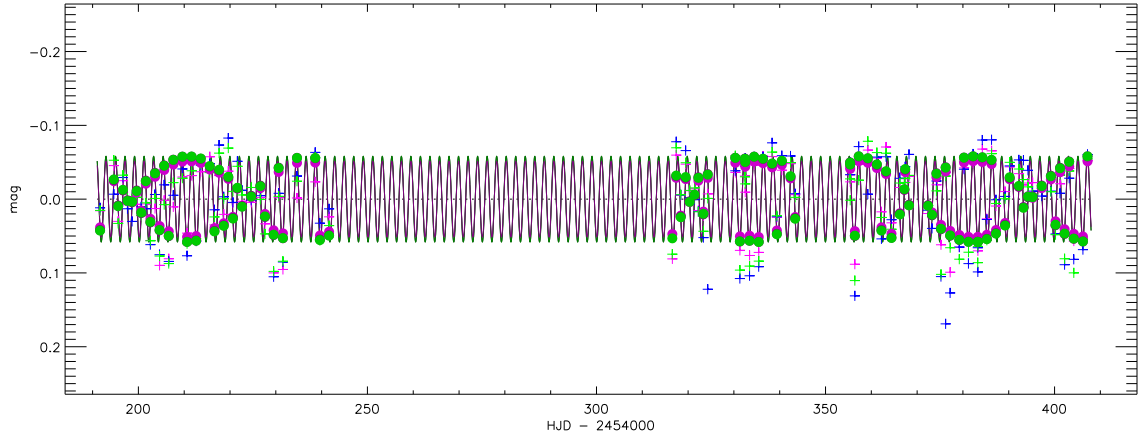


Figura 5.33: Curva de luz sintética monoperiódica ajustada à curva de luz do objeto #17326 (Figura 5.29) para obtenção das amplitudes e fase.

Quando optamos por analisar os picos secundários, encontramos um período de $1,03d^2$. Repetimos o ajuste por mínimos quadrados, utilizando uma curva de luz sintética com dois períodos, obtivemos um ajuste mais fiel, mostrado na Figura 5.34.

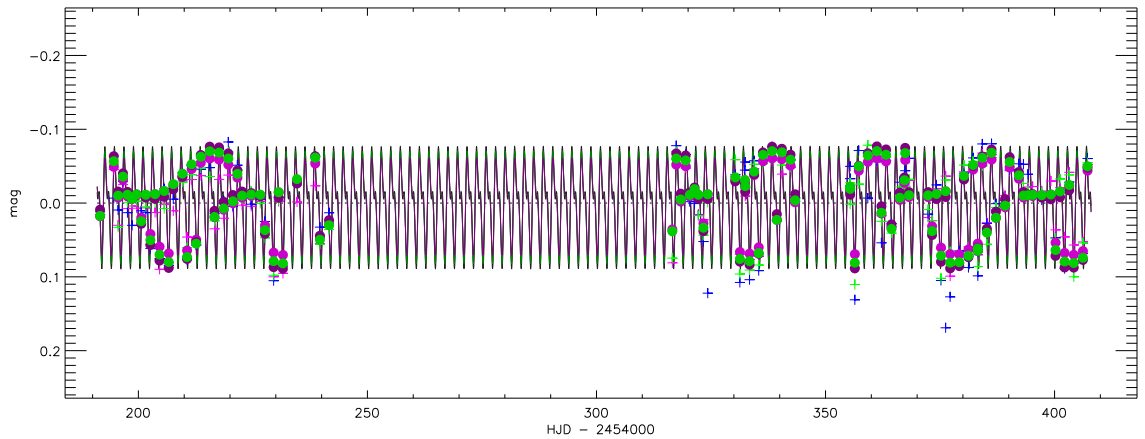


Figura 5.34: Curva de luz sintética multiperiódica ajustada à curva de luz do objeto #17326 (Figura 5.29) para obtenção das amplitudes e fase.

Os valores para amplitude e fase para cada um dos períodos obtidos através do ajuste por mínimos quadrados são apresentados na Tabela 5.9. Observe mais uma vez que os valores de amplitude obtidos via mínimos quadrados representam melhor a amplitude da curva de luz dobrada em fase do que os valores de desvio médio da média apresentados na Tabela 5.6 (página 76).

A multiperiodicidade é confirmada ao analisar-se os periodogramas para as curvas de luz

²Caímos aqui no problema de ambiguidade na determinação de períodos descrito no início da presente Subseção em que há dificuldade em decidir qual dos 5 picos é o verdadeiro. Nesse caso, a potência do pico de $24,671d$ tinha probabilidade de falso alarme 1%, ligeiramente maior que a PFA do período de $1,03$ determinado como verdadeiro segundo o LNP; Como o seu ajuste ficava pior, confiamos na escolha do LNP.

sinéticas mono e multiperódica apresentadas na Figura 5.35 e compará-las com o periodograma original (Figura 5.30, página 78): sem a utilização do período menor para gerar a curva de luz sintética, a série secundária de picos do periodograma não é reproduzida. Note ainda que apesar da curva de luz sintética ser um sinal sem ruídos, os picos decorrentes do seno de menor amplitude continuam abaixo do nível definido pela probabilidade de falso alarme 0,1%, conforme observado no LNP dos dados observacionais.

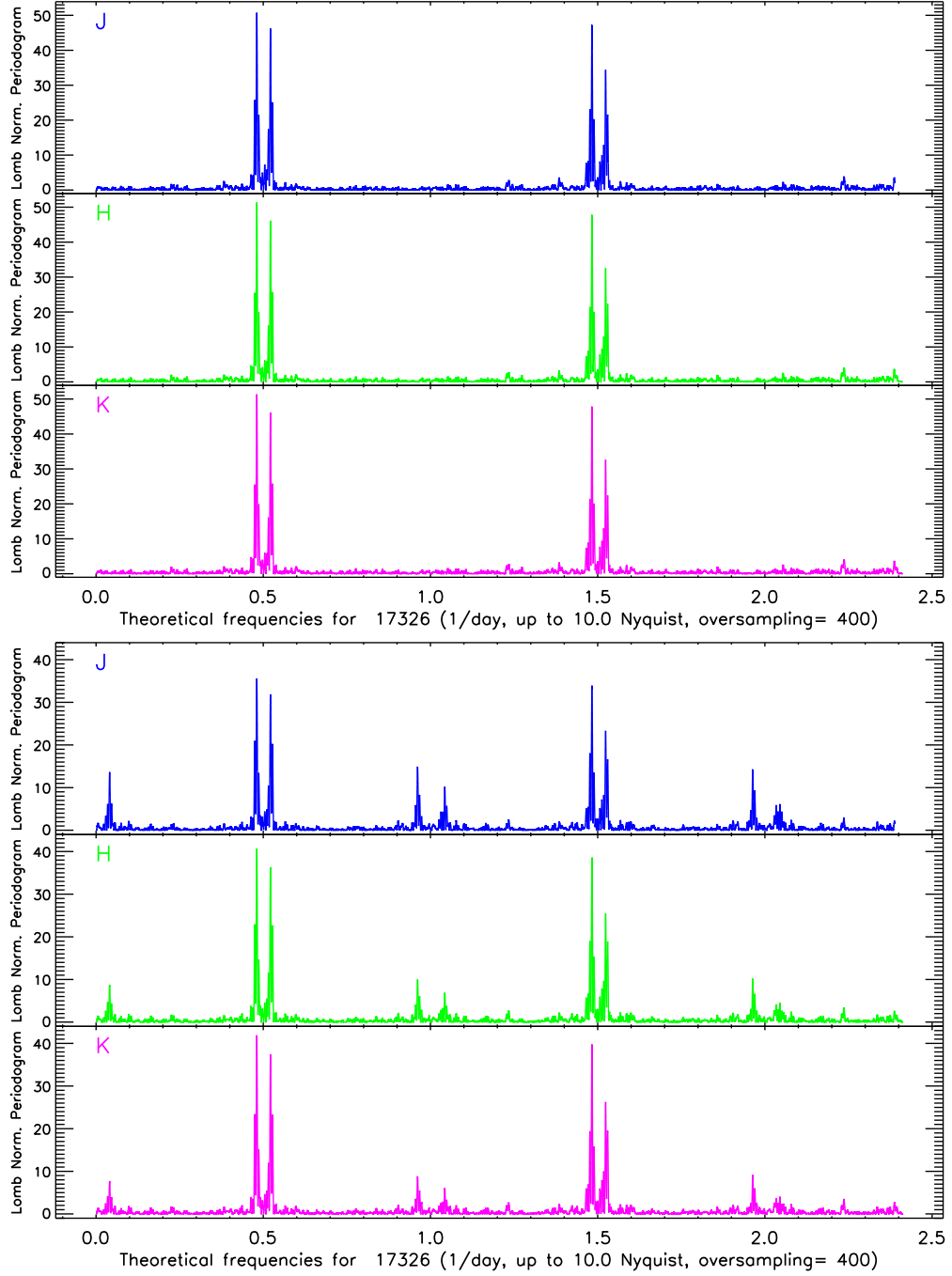


Figura 5.35: Periodogramas Normalizados de Lomb para curvas de luz sintéticas mono (acima) e multiperódica (abaixo) geradas para o objeto #17326 (Curva de luz: Figura 5.29; Periodograma observacional: Figura 5.30; ambos na página 78) com os períodos 2,081d e 1,039d.

#17326		Amplitudes		
Período (dias)	Fase (rad)	J	H	K
2,081(95)	$1,01\pi$	0,0583(29)	0,0378(28)	0,0587(29)
1,040255(61) (24,671)	$1,219\pi$	0,030(49)	0,05186(13)	0,(024429)

Tabela 5.9: Resultados obtidos via ajuste por mínimos quadrados de duas senoides, equação (4.21), à curva de luz do objeto #17326 (Figura 5.29) com os períodos médios obtidos via LNP.

Chama a atenção o fato que o período secundário é a metade do período primário, o que levanta a hipótese de que a estrela #17326 seja uma estrela pulsante, pulsando em dois modos normais. Apesar de atrativa, tal hipótese deve ser considerada com cuidado devido à pouca quantidade de dados e baixa frequência de observações já que não só o período principal está muito próximo da frequência de Nyquist, como o secundário está abaixo dela. O fato de que ambos existem significativamente no periodograma, porém, reforça a seleção do objeto como alvo de um futuro monitoramento fotométrico mais preciso.

Tendo em mente as informações obtidas a partir dos periodogramas das curvas sintéticas mono e multiperódicas para o objeto #17326, voltamos agora ao objeto #1529 apresentado no Capítulo anterior (Curva de luz: Figura 4.5, página 39; Curvas de CCF e CDF: Figura 4.18, página 55) e apresentamos na Figura 5.36 o seu periodograma.

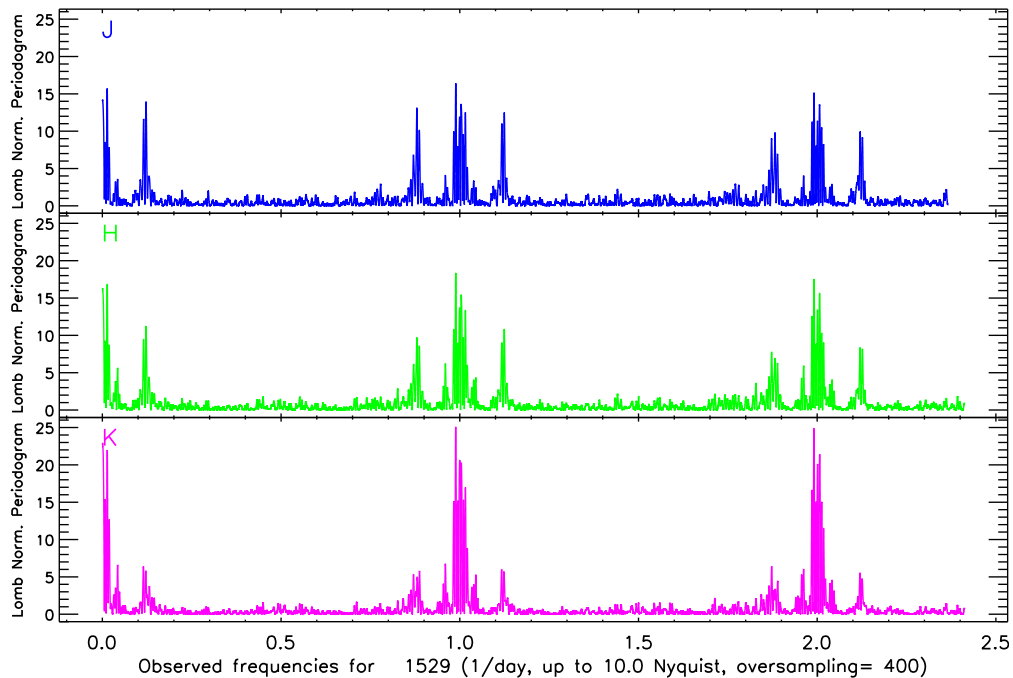


Figura 5.36: Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz do objeto #1529.

Em uma análise que considera válidos apenas períodos com baixa probabilidade de falso alarme, encontramos apenas dois períodos para aquela curva de luz, com amplitudes obtidas

por mínimos quadrados conforme a Tabela 4.4 (página 57). O periodograma para a curva de luz sintética gerada com dois períodos (Figura 4.20, página 57) é apresentada na Figura 5.37.

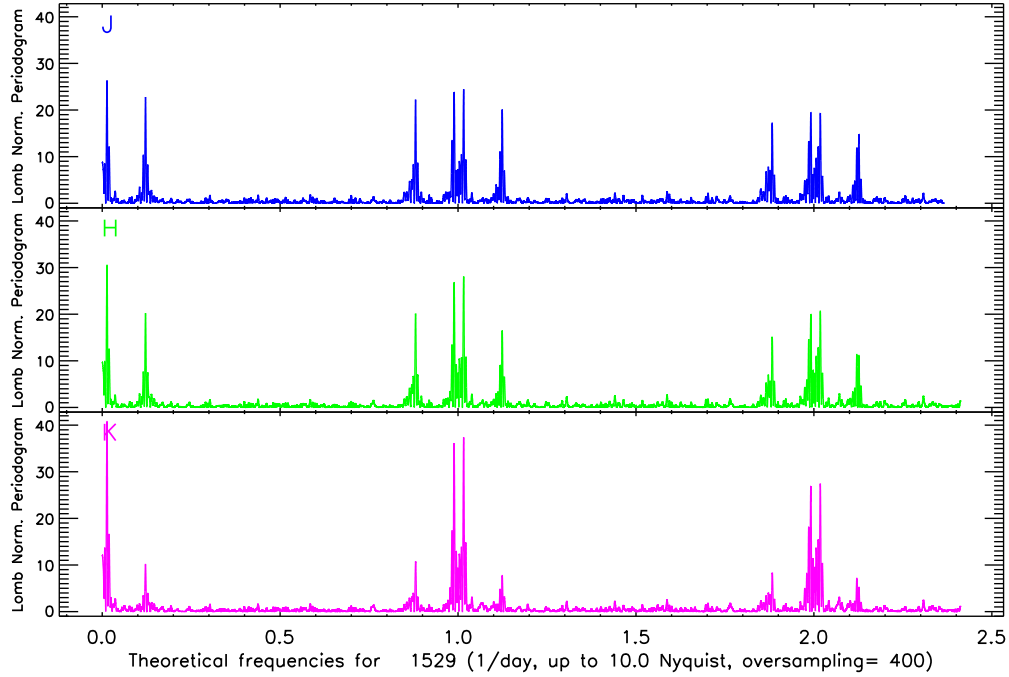


Figura 5.37: Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz sintética composta por dois períodos do objeto #1529.

Quando comparamos o periodograma dos dados observacionais com o periodograma da curva de luz sintética composta por dois períodos notamos que o alargamento dos *aliases* em torno de $n\frac{1}{d}$ parece ser causado pela existência de um segundo período longo. Além disso, existe uma terceira série de picos de período com probabilidade de falso alarme $\sim 50\%$ decorrente de um período de 23,481d. Eles estão bem abaixo dos limites seguros de detecção e no caso de análise de um filtro só, tais picos seriam descartados. No presente caso, porém, estamos trabalhando com três filtros medidos simultaneamente (com distribuição temporal de dados muito parecida) e dado que tais picos ocorrem pontualmente em todos os filtros, vemos a necessidade de uma técnica mais apropriada ao trato de objetos multiperódicos.

Uma possibilidade seria subtrair a curva de luz sintética com o período mais significativo da curva de luz observacional e repetir toda a análise para a curva de luz resultante. Horne & Baliunas (1986) sugerem tal técnica como método de verificação da escolha correta do período entre os seus *aliases*, já que se o período subtraído for o correto é esperado que os quatro picos de *alias* que ele induz no periodograma sumam da análise via LNP subsequente. Uma vez que o LNP é normalizado pela variância total dos dados (Horne & Baliunas 1986), a análise após subtração do sinal sintético deve ser refeita com a variância da curva de luz resultante, o que pode vir a melhorar o sinal/ruído dos componentes senoidais de menor amplitude

do sinal original, servindo assim para confirmar a veracidade dos sinais secundários. A implementação de tal técnica pode ainda nos levar a entender a relação entre os valores das potências do periodograma com a amplitude do sinal que a gerou.

5.3 Miscelânea

Apresentamos na presente Seção exemplos de objetos com variabilidade não senoidal selecionados.

5.3.1 Tipo *Flare*

Encontramos três objetos candidatos à classificação de estrela variável tipo *flare*: #7498, #9524 e #10194. As curvas de luz de tais objetos são apresentadas nas Figuras 5.38 e 5.39. Vale ressaltar que denominação da classificação provisória faz referência à morfologia da curva de luz, *i.e.*, a estrela passa a maior parte do tempo num mínimo de brilho e apresenta máximos de brilho esporádicos com alta correlação entre filtros. Os dados astrométricos e fotométricos para tais objetos são listados na Tabela 5.10.

ID	α	δ	$\langle J \rangle$	max ΔJ	$\langle H \rangle$	max ΔA	$\langle K \rangle$	max ΔK
7498	20:33:32,586	41:18:49,760	14,362	-0,121	13,576	-0,290	13,115	-0,144
9524	20:33:38,507	41:19:28,718	13,359	-0,121	12,972	-0,235	12,818	-0,144
10194	20:33:40,539	41:19:47,381	15,397	-0,270	14,305	-0,372	13,688	-0,280

Tabela 5.10: Parâmetros das 3 estrelas tipo *flare* identificadas no estudo.

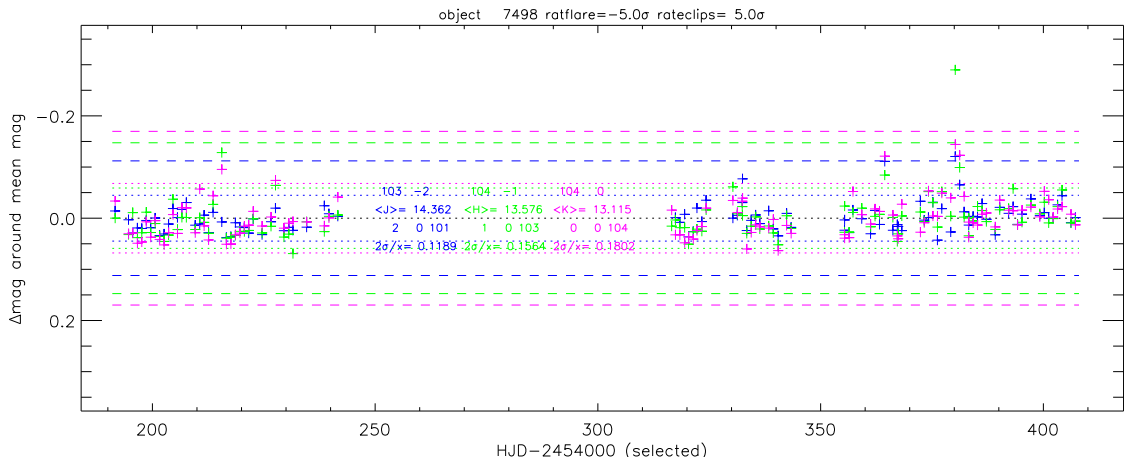


Figura 5.38: Curvas de luz do objeto tipo *flare* #7498 encontrada no presente estudo.

Em nenhum dos objetos existia periodicidade quanto aos máximos de magnitude. Como exemplo dessa constatação, apresentamos na Figura 5.40 a curva de CCF do objeto #10194. Note que a correlação é máxima quando $\tau = 0$, mas é aleatória fora disso.

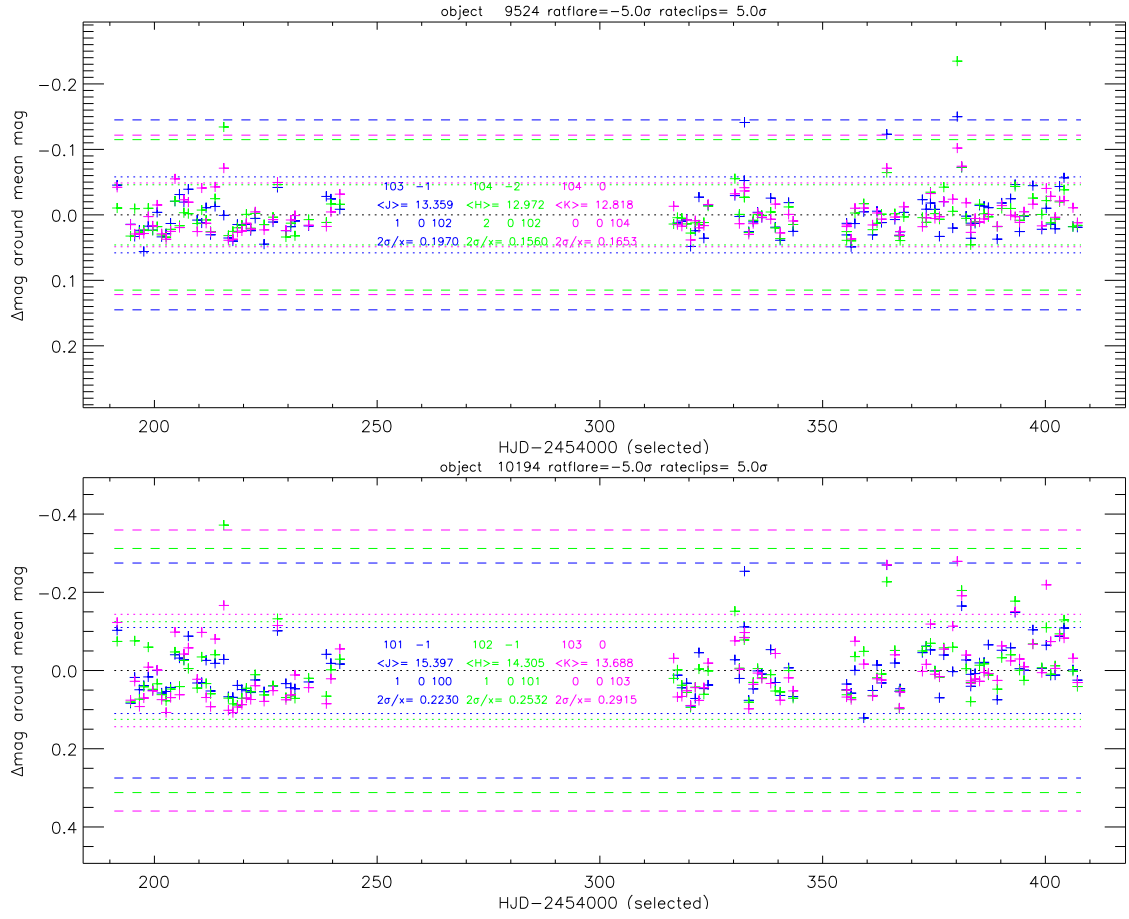


Figura 5.39: Curvas de luz dos objetos tipo *flare* #9524 e #10194 encontradas no presente estudo.

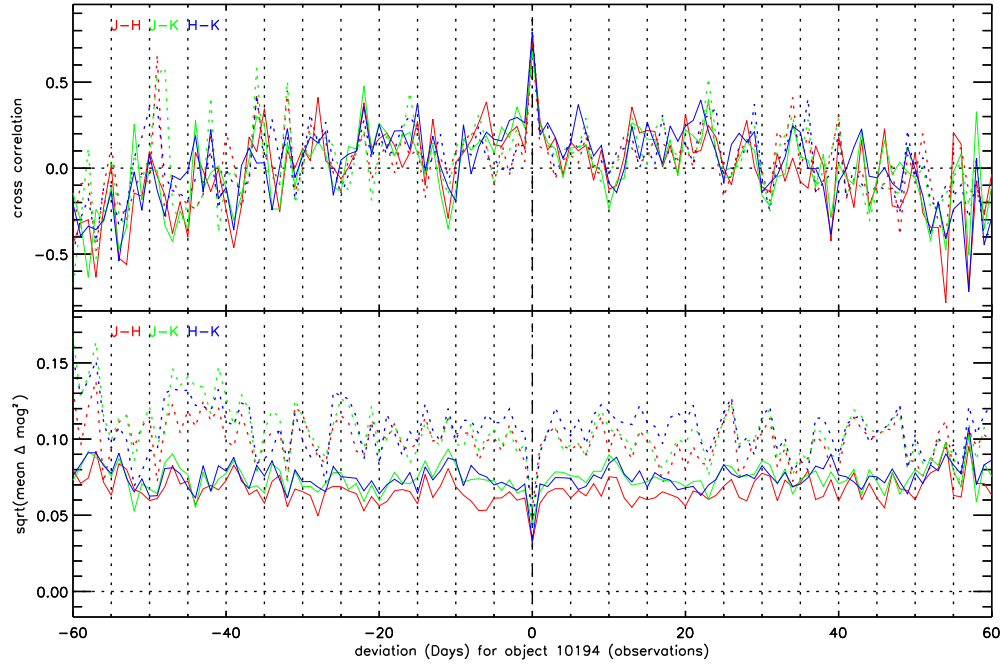


Figura 5.40: Curvas de CCF e DCF para o objeto #10194.

Ao checar a localização de tais objetos na imagem medida em K, notamos que todos os três estavam localizados próximos a estrelas OB da associação e, conseqüentemente, sujeitos a contaminação fotométrica devido ao estado saturado de tais estrelas em nossas imagens.

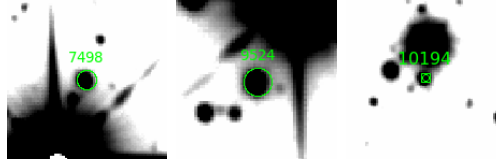


Figura 5.41: Estrelas tipo flare encontradas no presente estudo.

5.3.2 Tipo Eclipse

Selecionamos 52 estrelas como candidatas à classificação de variabilidade tipo eclipse. Essa seleção foi feita majoritariamente através da incidência sistemática de mínimos correlacionados (*i.e.*, mínimos nos três filtros simultaneamente) nas curvas de luz. Apesar de ser eficiente em selecionar candidatos à estudos futuros, tal critério é insuficiente para inferir possíveis causas da variabilidade.

Primeiramente trataremos os objetos “puro eclipse”, *i.e.*, aqueles que, à exceção dos mínimos, passavam todo o tempo num máximo de brilho. Exemplos são os objetos #13732, #1478, #7342 e #14754 cujas curvas de luz compostas são apresentadas na Figura 5.42, na próxima página.

Os dados fotométricos e astrométricos de tais objetos são apresentados na Tabela 5.11 e a localização dos objetos na imagem real no filtro K são mostradas na Figura 5.43. Chamamos atenção para o objeto #14754 que parece fazer parte do aglomerado [BDB2003] G080.35+00.73 (Bica et al. 2003), um dos aglomerados presentes em nossas imagens.

ID	α	δ	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$	$\langle P \rangle$
13732	20:33:51,449	41:24:19,006	15,562	14,484	13,969	3,947d
1478	20:33:16,163	41:29:39,621	15,525	14,659	14,099	1,377d
7342	20:33:32,118	41:20:18,204	15,745	14,680	14,149	0,866d
14754	20:33:54,432	41:22:47,045	16,058	13,890	12,480	1,127d
11829	20:33:45,491	41:20:17,625	14,781	13,698	13,209	12,065d
15069	20:33:55,227	41:20:00,991	15,015	13,729	12,870	Irr

Tabela 5.11: Dados astrométricos e fotométricos para 6 estrelas tipo eclipse.

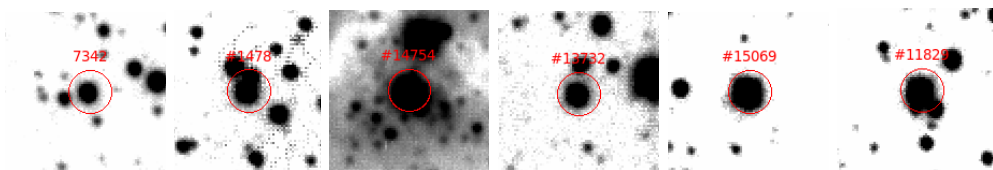


Figura 5.43: Estrelas tipo eclipse encontradas no presente estudo.

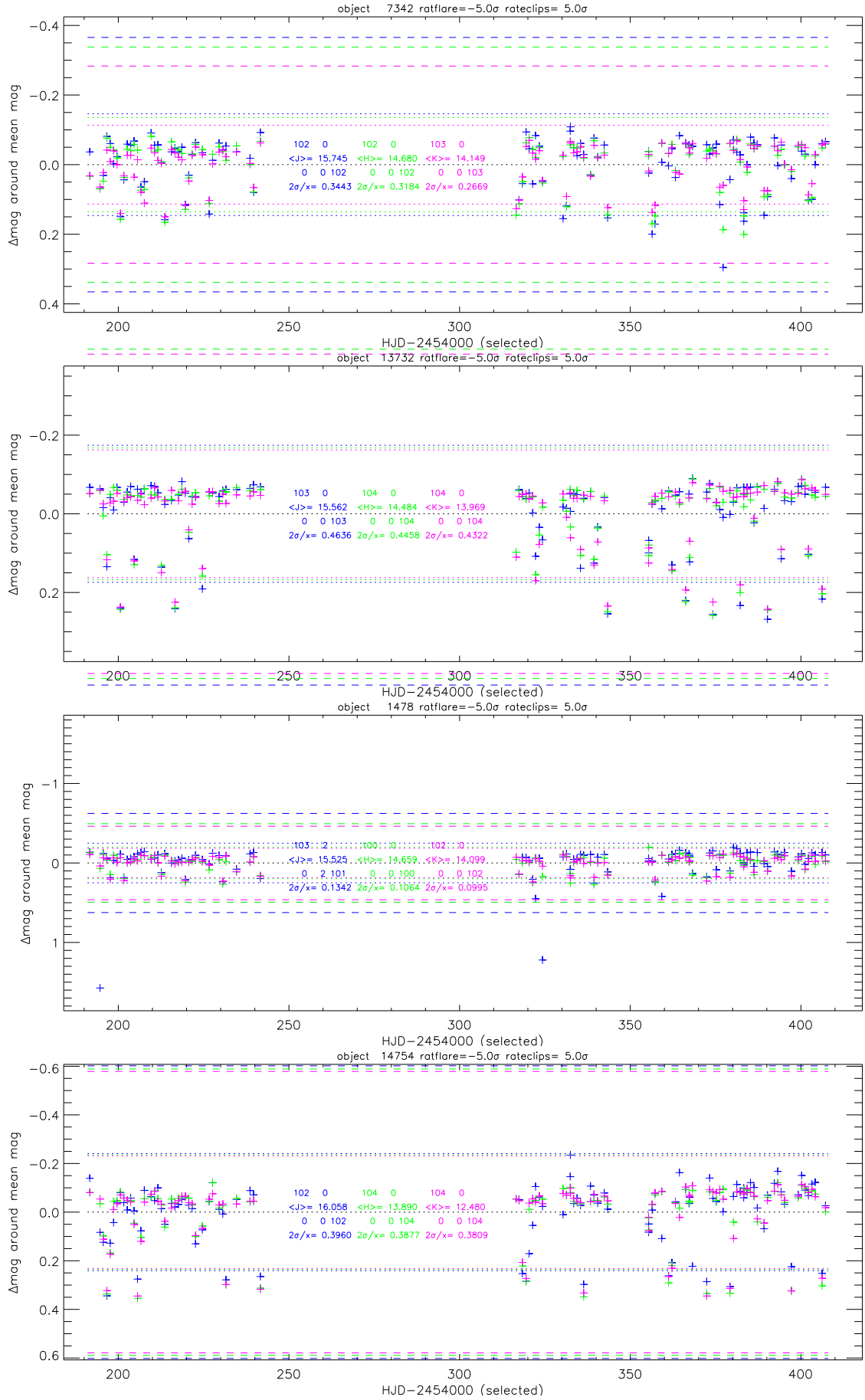


Figura 5.42: Curvas de luz dos objetos tipo eclipse encontradas no presente estudo.

A Figura 5.44 mostra as curvas de CCF e DCF do objeto #13732 (Segunda curva de luz na Figura 5.42). Note que elas são estruturalmente distintas daquelas apresentadas na Seção 5.2³: enquanto as curvas de CCF das variáveis senoidais eram senoides centradas na linha de correlação cruzada nula ($\Phi(\tau) = 0, 0$), as variáveis tipo eclipse puro têm essa linha como um limite inferior de correlação.

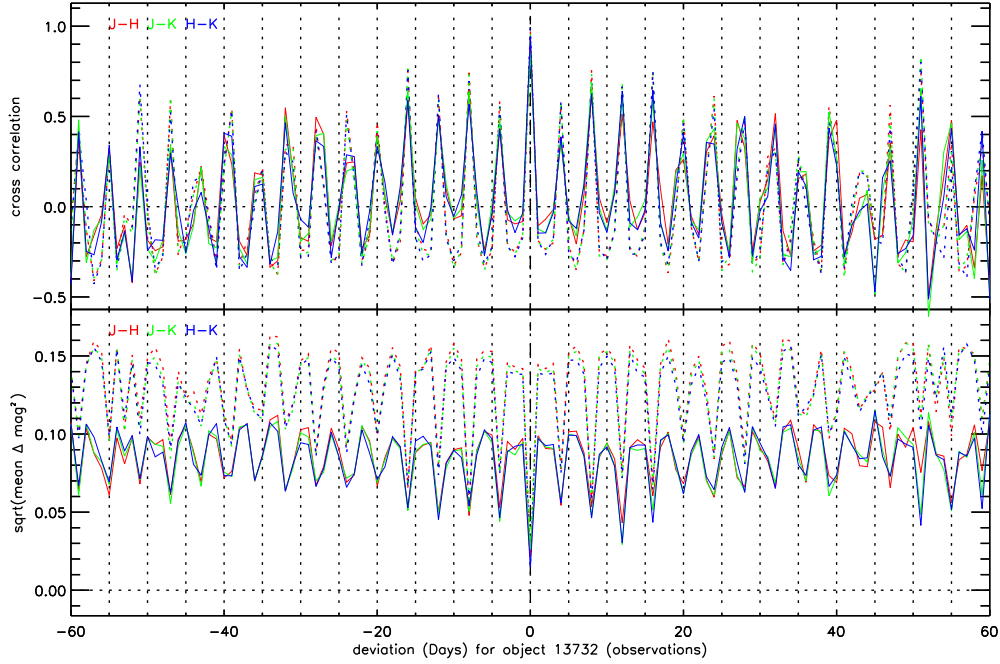


Figura 5.44: Curva de correlação e desvio cruzado entre filtros para o objeto tipo eclipse #13732.

Ao tentar analisar tais objetos da mesma forma que fizemos com as variáveis senoidais notamos que, apesar de útil em detectá-las, o método e a distribuição de dados não servem para um estudo prévio das variáveis tipo eclipse.

Para exemplificar isso, apresentamos a análise para o objeto #13732. Seu periodograma, apresentado na Figura 5.45, fornece um período de 0,571d. O período ~ 4 d sugerido pela curva de CCF e curva de luz composta aparece no periodograma como um *alias* (4,037d). Além da sequência de picos principais, existe uma sequência secundária correspondente a um período de ~ 2 d (contaminados pelo problema de vazamento espectral II descrito anteriormente) para a qual as curvas de luz em fase não fazem sentido e acreditamos ser um tipo de *alias* diferente daqueles formados por sinais senoidais descritos no Capítulo 4, consequente da nova forma de curva de luz com que estamos lidando. O periodograma do objeto #13732 deixa claro que simulações apropriadas às curvas de luz tipo eclipse são necessárias para o entendimento de tais objetos.

³Para comparação vide Figuras 5.6 (página 63), 5.7 (página 64), 5.14 (página 68), 5.25 (página 75), 5.31 (página 78) e 4.17 (página 54).

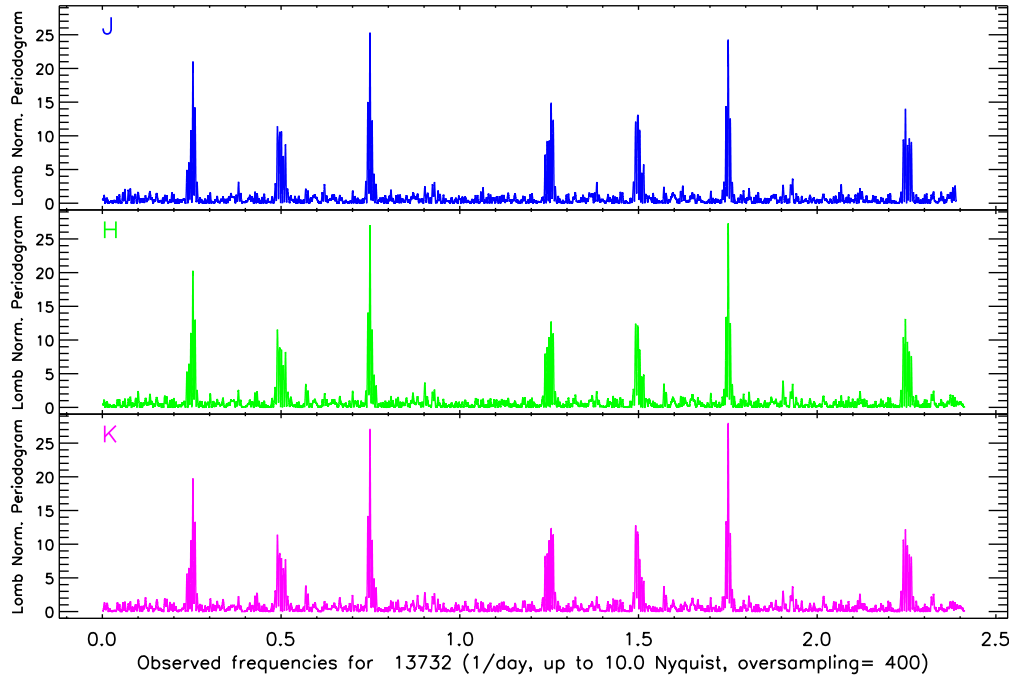


Figura 5.45: Periodograma Normalizado de Lomb para curva de luz do objeto #13732.

Apresentamos nas Figuras 5.46 e 5.47 curvas de luz dobradas em fase para ambos os períodos. Note que, segundo o critério de dispersão em fase, o período menor é mais apropriado, mas ele está muito abaixo do nosso limite de detecção e deve ser considerado com muito cuidado.

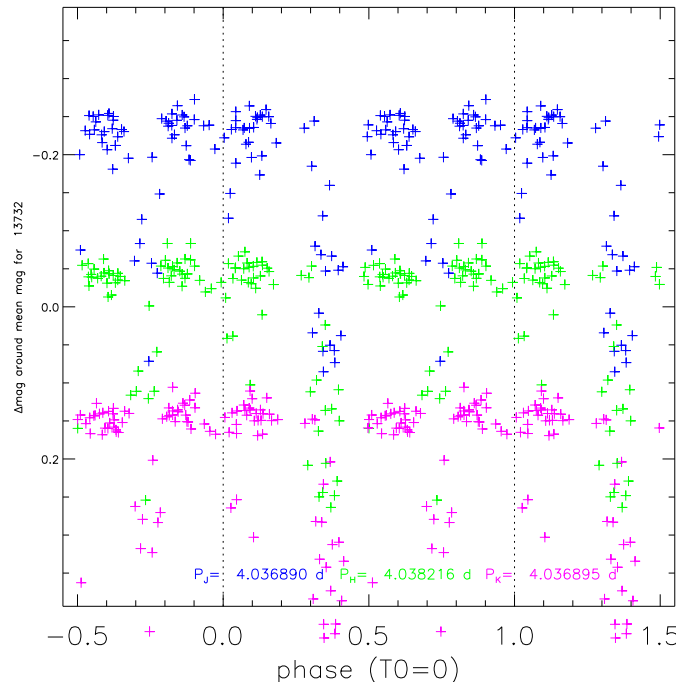


Figura 5.46: Curvas de luz dobradas em fase para o objeto #13732 com período 4,037d.

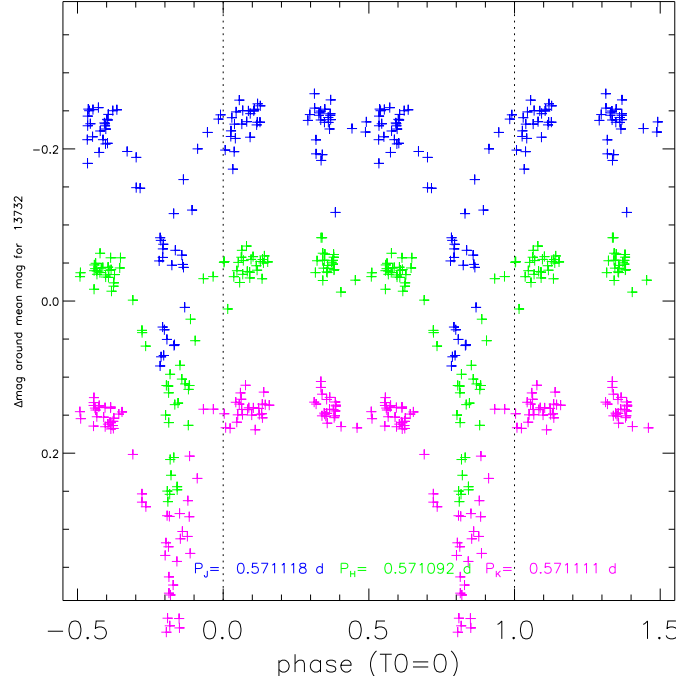


Figura 5.47: Curvas de luz dobradas em fase para o objeto #13732 com período 0,571d.

Apresentamos nas Figuras 5.48, 5.49 e 5.50 as curvas de luz em fase dos demais objetos escolhidos como exemplo de “eclipse puro”, dobrados em fase para os períodos obtidos via LNP. Note que à exceção do *alias* do objeto #13732 (descartado pela alta dispersão em fase), em nenhum outro caso ocorre um mínimo secundário.

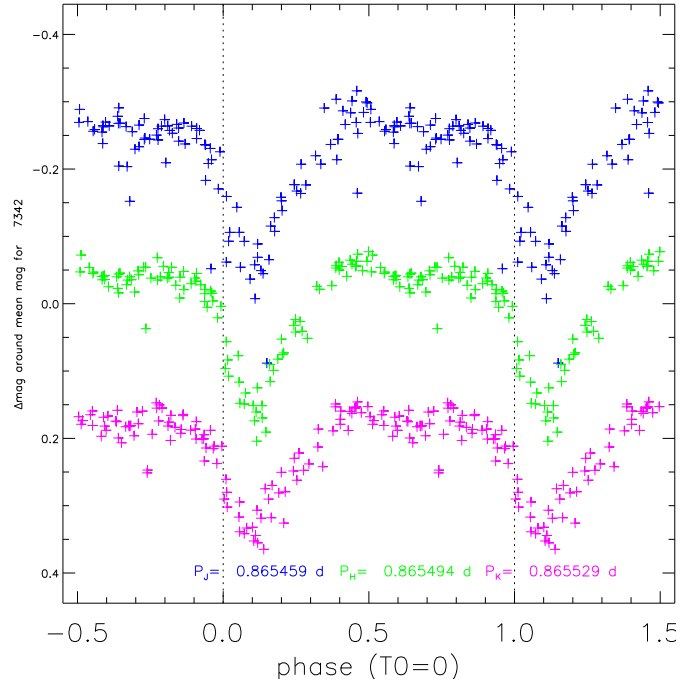


Figura 5.48: Curva de luz dobrada em fase para o objeto tipo eclipse #7342.

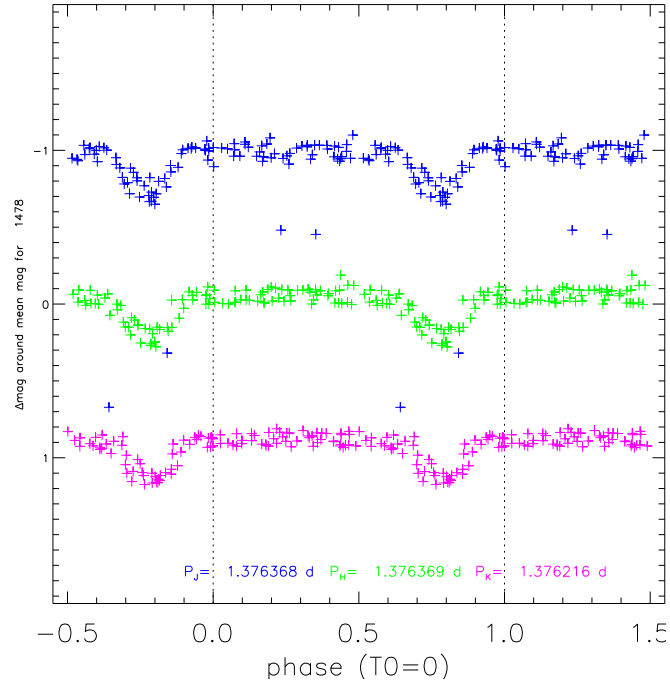


Figura 5.49: Curva de luz dobrada em fase para o objeto tipo eclipse #1478.

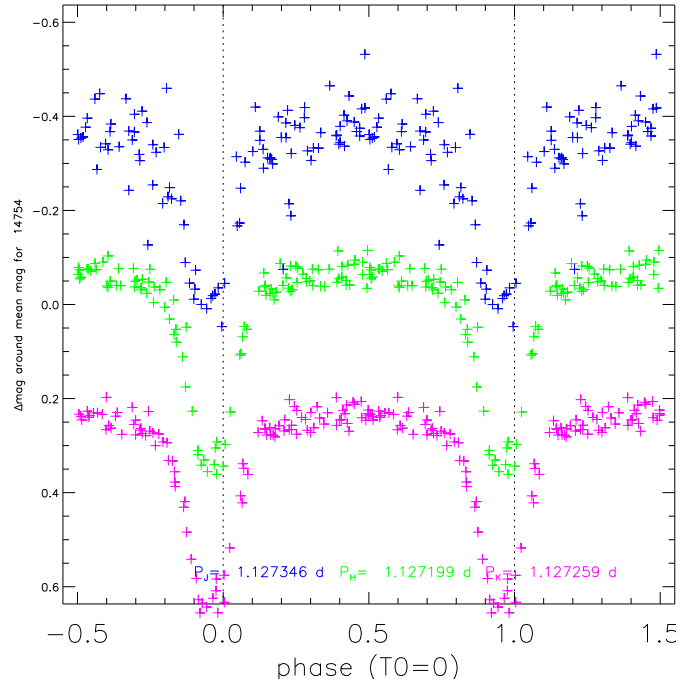


Figura 5.50: Curva de luz dobrada em fase para o objeto tipo eclipse #14754.

Existem casos em que a variação tipo eclipse não é a única presente na curva de luz. Um primeiro exemplo disso é o objeto #11829 cuja curva de luz é apresentada na Figura 5.51.

O objeto apresenta variabilidade tipo mancha com período de 12d muito bem resolvido e, na segunda temporada de observações apresenta mínimos correlacionados fora de fase com os mínimos da variação tipo mancha. Sua curva de CCF (Figura 5.52) é uma boa ilustração das diferenças morfológicas de uma curva com eclipse e sem eclipse: A curva de

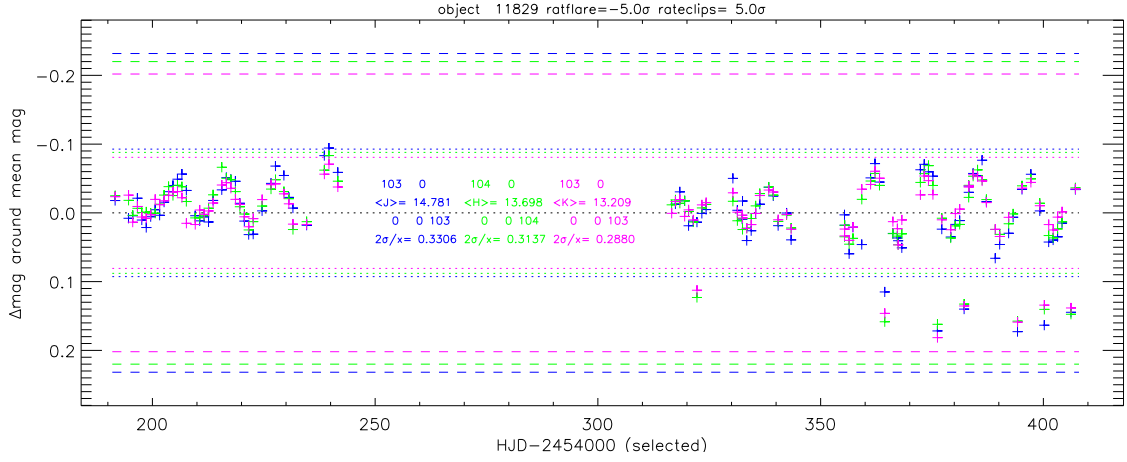


Figura 5.51: Curva de luz do objeto tipo mancha e eclipse #11829.

CCF pontilhada é feita utilizando todos os pontos da curva de luz composta enquanto a curva de CCF em linha contínua é feita excluindo os pontos em que a diferença da medida à média era $\geq \pm\sigma$ (linhas pontilhadas na curva de luz da Figura 5.51), *i.e.*, excluindo os pontos afetados pelo eclipse. Note que o ato de excluir os pontos do eclipse suaviza a curva de CCF, transformando-a em uma senoide centralizada em torno da linha $\Phi(\tau) = 0$.

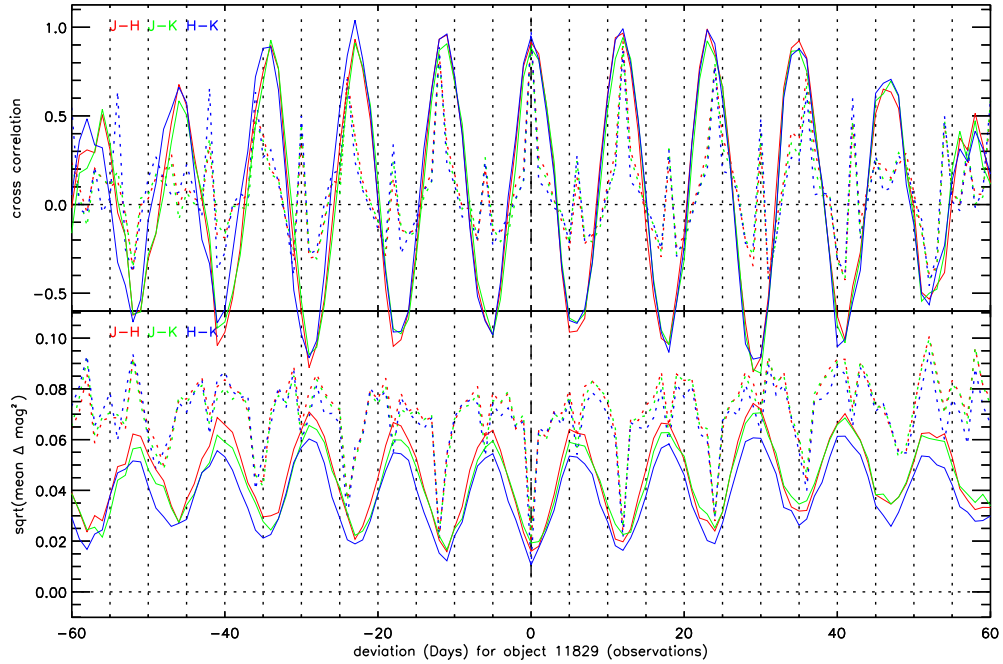


Figura 5.52: Curva de CCF e DCF para o objeto tipo eclipse e mancha #11829.

Outro exemplo de variabilidade tipo eclipse somada à outro tipo de variabilidade é o objeto #15069 que apresenta variabilidade irregular misturada à mínimos correlacionados. Sua curva de luz é apresentada na Figura 5.53 e apresenta variabilidade irregular com amplitude de vários décimos de magnitude misturados a mínimos esporádicos correlacionados.

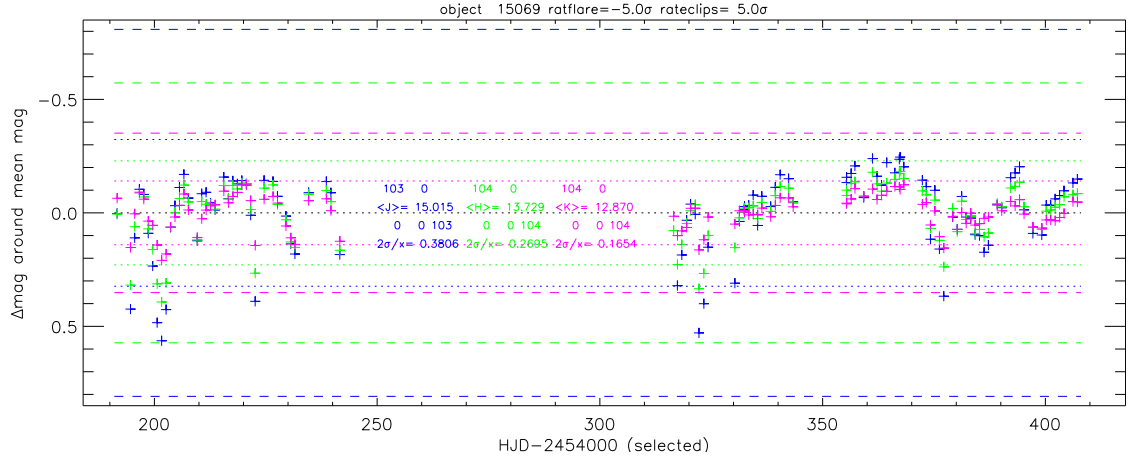


Figura 5.53: Curva de luz do objeto tipo irregular e eclipse #15069.

5.3.3 Outras

Apresentaremos nessa seção algumas curvas de luz de objetos selecionados como interessantes não passíveis de classificação. Dentre eles estão objetos com grande amplitude de variação como os objetos #13342, #19323 e #9469 cujas curvas de luz são apresentadas nas Figuras 5.54 e 5.55.

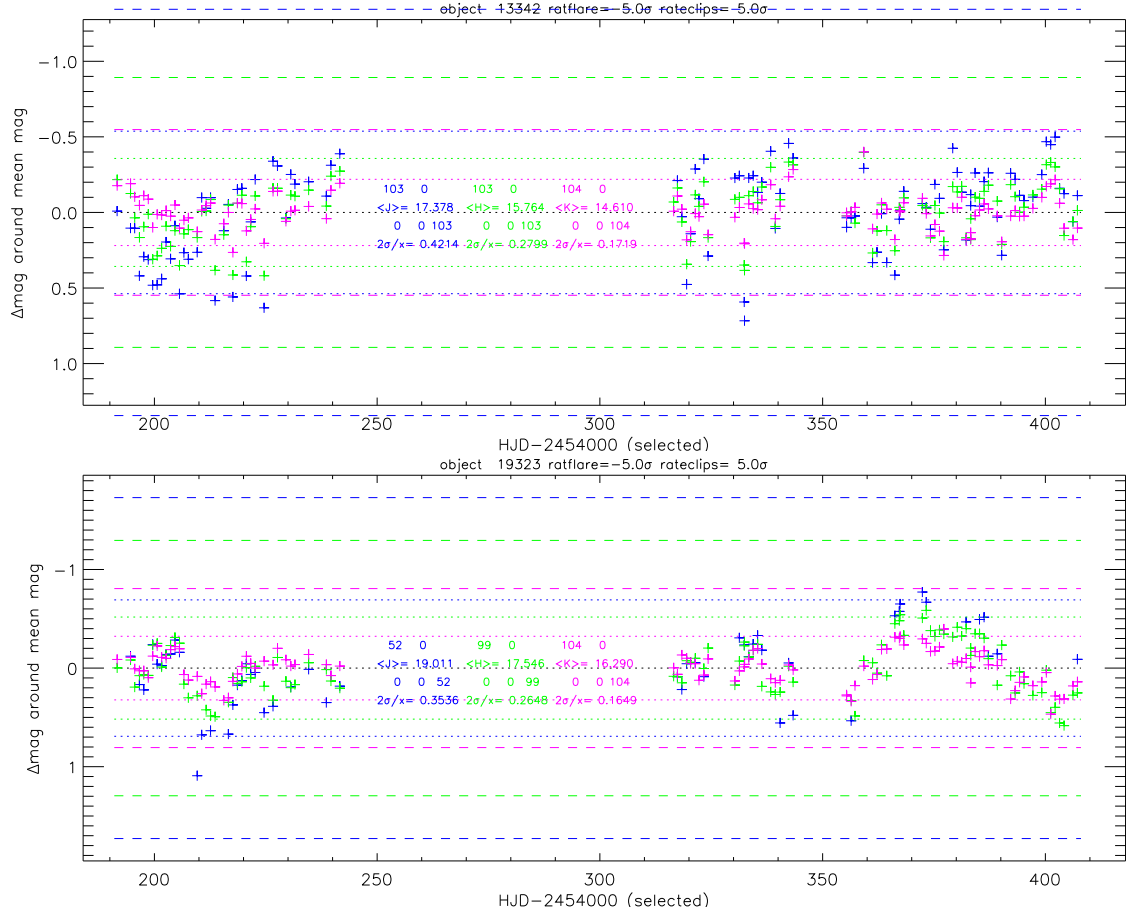


Figura 5.54: Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.

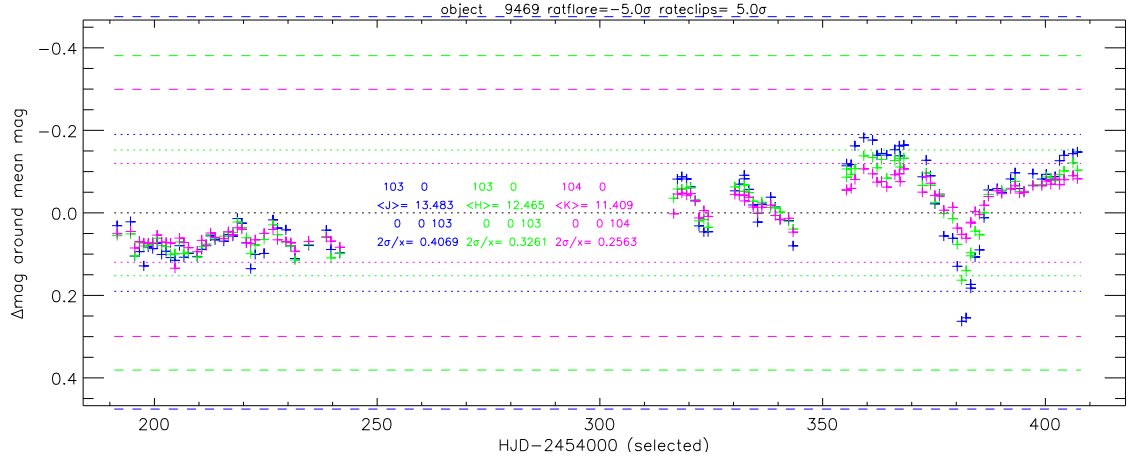


Figura 5.55: Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.

Além destes, encontramos alguns objetos com variabilidade de longo período (maior que nossa resolução) em que há inversão de filtros na curva de luz composta. Como exemplos apresentamos nas Figuras 5.56 e 5.57 as curvas de luz compostas dos objetos #22983, #9163 e #5750.

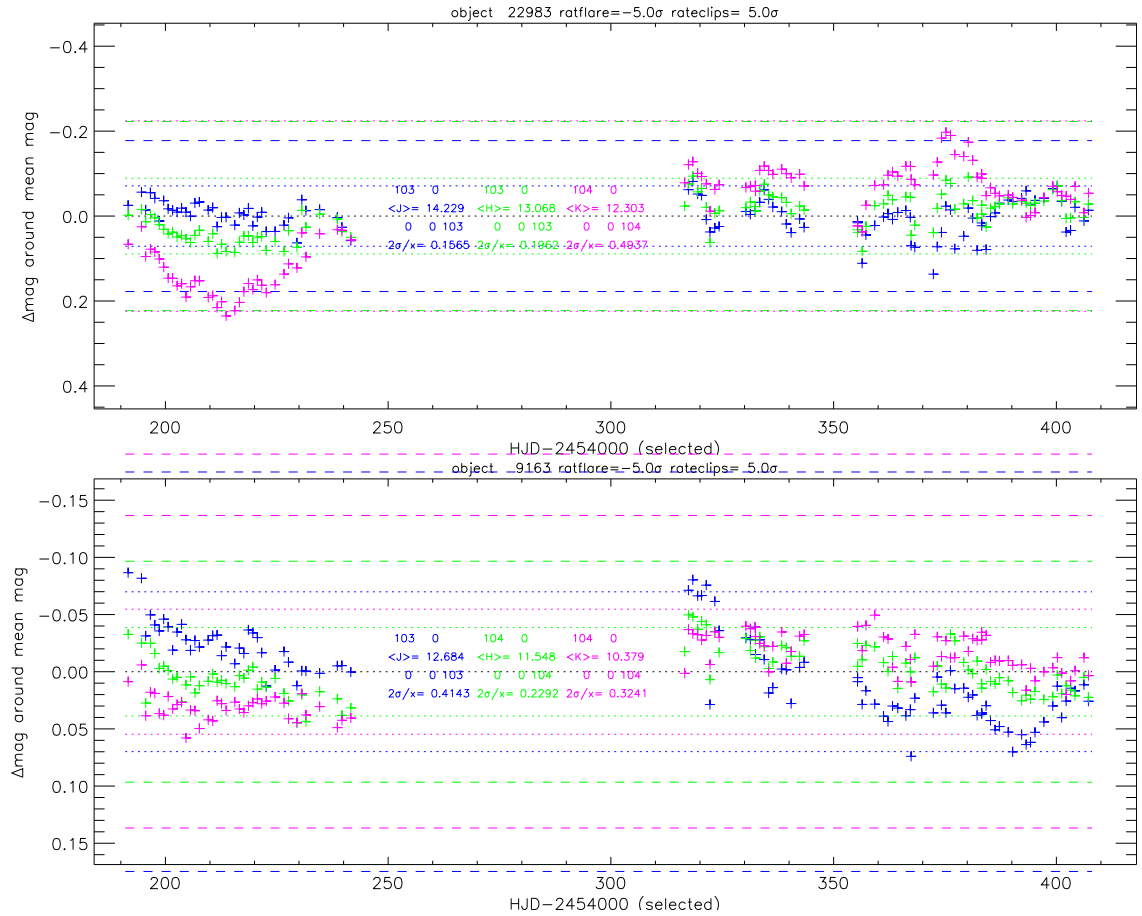


Figura 5.56: Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.

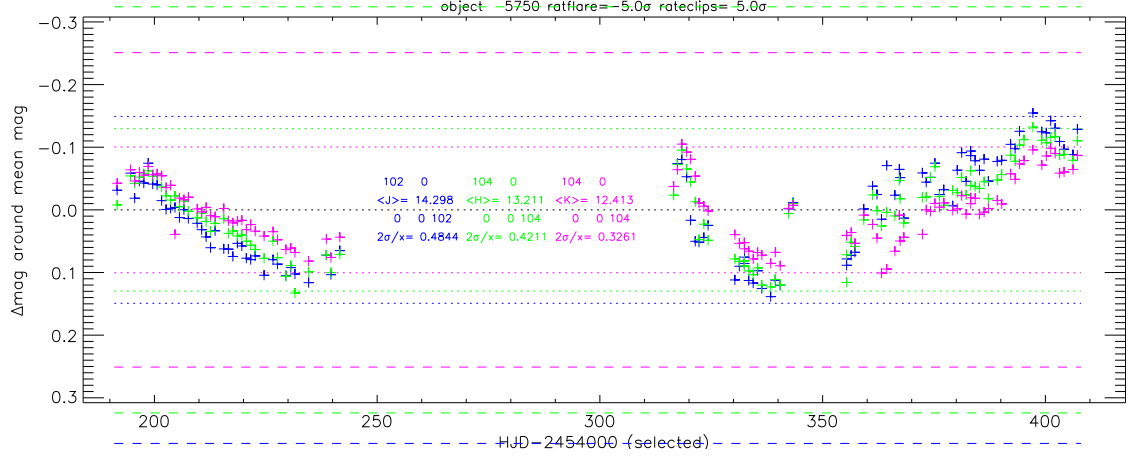


Figura 5.57: Curvas de luz de objetos variáveis sem classificação tentativa.

Por último, apresentamos na Figura 5.58 a curva de luz do objeto #2407 e, na Figura 5.59, sua curva de CCF e DCF. Note que o objeto parece estar lentamente diminuindo de brilho. A variação ocorre altamente correlacionada em todos os filtros e a curva de CCF permanece continuamente muito próxima de 1,0 mesmo para valores de $\tau \neq 0$.

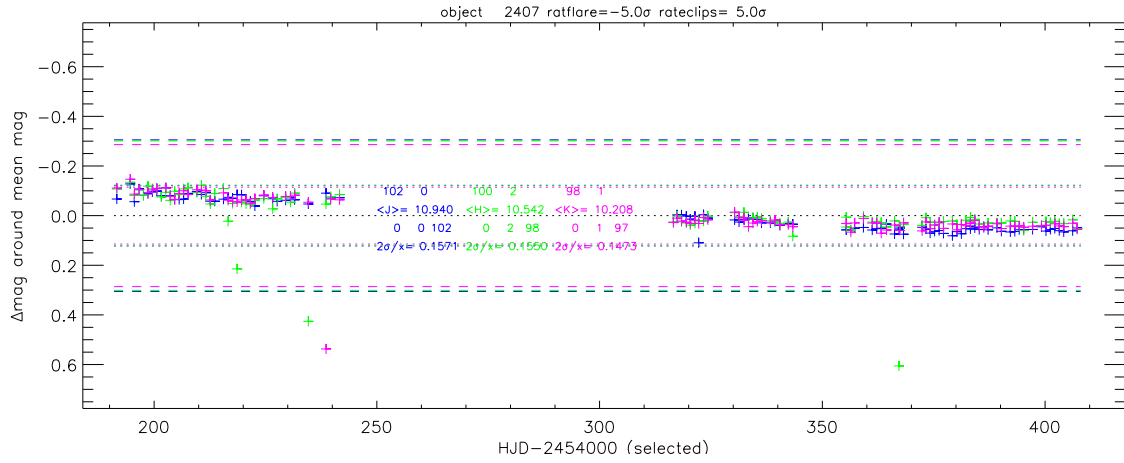


Figura 5.58: Curva de luz do objeto #2407, não passível de classificação.

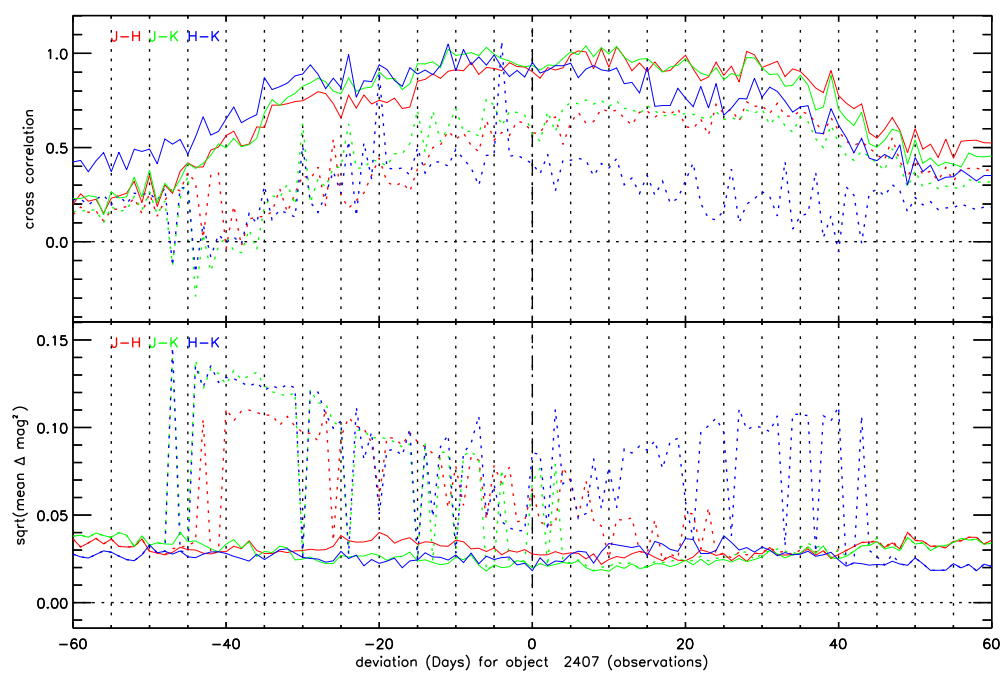


Figura 5.59: Curva de CCF e DCF do objeto #2407, não passível de classificação.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação, estudamos a variabilidade fotométrica de estrelas jovens e as principais ferramentas para sua análise. Foram revistos os sistemas de classificação de estrelas variáveis existentes na literatura e algumas técnicas para a análise de séries temporais discretas, apropriadas à busca por tais objetos, como a transformada de Fourier, o periodograma normalizado de Lomb e técnicas de comparação de sinais envolvendo curvas de correlação cruzada.

Utilizamos tais técnicas para analisar uma (de dezesseis) sub-região de Cygnus OB2, monitoradas em JHK pelo UKIRT. Uma vez que não foram encontrados objetos suficientemente constantes na sub-região analisada, decidimos não realizar fotometria diferencial e mantivemos os dados calibrados via 2MASS. Confeccionamos curvas de luz para todos os objetos da amostra e a partir da análise de parâmetros estruturais de tais curvas selecionamos os objetos mais interessantes e os organizamos segundo uma classificação tentativa. Os objetos foram classificados como: Constantes, Tipo Mancha, Tipo Flare, Tipo Eclipse e Outras. Vimos que a frequência de observação era insuficiente para uma classificação definitiva dos objetos variáveis. Apesar disso, consideramos os objetos aqui selecionados como bons alvos para um estudo mais detalhado, principalmente aqueles selecionados como possíveis variáveis tipo Mancha, os quais podem ser utilizados para um estudo sobre rotação em estrelas tipo TTauri na região de Cygnus OB2.

Uma vez que temos em mãos um poderoso conjunto de ferramentas, passaremos a seguir à organização em catálogo e análise das 15 sub-regiões restantes. A localização de objetos mais constantes nas demais sub-regiões pode tornar vantajosa a utilização da fotometria diferencial.

Algumas melhorias nas técnicas aqui apresentadas devem ser consideradas. À exemplo de Kearns & Herbst (1998), simulações de Monte Carlo podem ser úteis para aprimorar o

entendimento da probabilidade de falso alarme e podem levar à eliminação das ambiguidades na determinação de períodos apresentadas na Seção 5.2.2.

A implementação de técnicas de subtração da curva sintética em busca de períodos secundários é necessária para uma análise completa dos objetos multiperiódicos e, como discutido na Seção 5.2.3, pode também ajudar a melhor lidar com os *alias* presentes no periodograma.

No presente estudo, nos voltamos apenas às características estruturais das curvas de luz. Um estudo de cores é necessário como complementação do presente estudo, podendo ser utilizado como teste à seleção dos objetos candidatos a tipo mancha. Além disso, estudos de cores podem ser utilizados para julgar quais objetos estão na associação Cygnus OB2 e quais são objetos de campo.

A utilização das curvas de correlação e desvio cruzados entre filtros se mostrou uma ferramenta útil na confirmação qualitativa de períodos. A sua generalização para o caso de dados não igualmente espaçados parece um próximo passo lógico para prover uma confirmação numérica dos períodos fornecidos pelo periodograma de Lomb. Além disso, o estudo das curvas de correlação entre filtros é uma ferramenta em potencial para estudos de variabilidade em cor, a qual não foi muito utilizada na literatura até então.

Por último, como estamos trabalhando com uma associação de estrelas, é preciso estudá-la como um todo. Uma vez terminada a análise das 15 sub-regiões restantes, um estudo sumário do catálogo final pode ajudar a desvendar a população de baixa massa de Cygnus OB2. Entender como as estrelas variáveis se distribuem na associação (que é um estudo inédito na literatura) pode fornecer informações importantes sobre o processo de formação estelar em CygOB2.

Apêndice A

Apêndice: Variáveis tipo Mancha com período determinado

Apresentamos na Tabela A.1 os dados fotométricos e astrométricos para os 56 objetos selecionados como variáveis senoidais (candidatos à classificação tipo mancha) para os quais foi possível calcular períodos sem ambiguidades assim como os períodos e amplitudes obtidos via ajuste por mínimos quadrados.

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#937	20:33:55,713	41:05:16,242	5,0009(46)d	16,990	15,718	15,120
Não				0,0283(61)	0,0206(60)	0,0150(60)
#2053	20:33:17,709	41:29:36,748	4,6901(16)d	17,058	15,950	15,306
Não				0,0316(38)	0,0323(38)	0,0229(38)
#2471	20:33:18,761	41:21:30,956	7,8669(30)	15,473	14,380	13,863
2MASS J20331873+4121313 - CXOCyg J203318.77+412130.5 - [AFM2007] 642				0,0588(39)	0,0419(39)	0,0360(38)
#2927	20:33:20,021	41:20:11,635	7,6256(49)	15,605	14,520	13,989
2MASS J20332000+4120117 - CXOCyg J203320.02+412011.6				0,0470(58)	0,0340(58)	0,0293(58)
#10021	20:33:39,956	41:31:51,822	3,5748(13)	14,757	13,970	13,645
Não				0,0342(51)	0,0306(50)	0,0305(50)

(Continua...)

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#1279	20:33:15,649	41:24:34,024	8,6231(20)	16,383	15,229	14,639
Não				0,1181(56)	0,1221(56)	0,1059(56)
#1371	20:33:15,884	41:21:15,070	8,9083(39)	16,250	15,117	14,582
CXOCyg J203315.84+412115.0 - [AFM2007] 588				0,0587(45)	0,0551(45)	0,0406(45)
#3271	20:33:20,909	41:29:06,728	10,3451(68)	16,869	15,681	15,077
Não				0,0679(66)	0,0622(66)	0,0511(66)
#4034	20:33:22,936	41:18:59,842	3,21455(73)	15,311	14,237	13,735
2MASS J20332290+4119002 - CXOCyg J203322.91+411859.8 - [AFM2007] 718				0,0502(54)	0,0467(54)	0,0366(54)
#4131	20:33:23,194	41:19:09,748	9,1085(36)	15,818	14,711	14,220
[AFM2007] 723 - CXOCyg J203323.22+411909.2				0,577(47)	0,0620(47)	0,0563(46)
#4287	20:33:23,610	41:30:48,853	4,24807(98)	16,126	15,014	14,502
Não				0,0245(24)	0,0246(24)	0,0225(24)
#4487	20:33:24,195	41:29:10,297	11,1668(39)	16,619	15,465	14,886
Não				0,0513(29)	0,0575(29)	0,0573(29)
#4542	20:33:24,323	41:25:38,877	7.1465(33)	16,890	15,562	14,747
Não				0,182(19)	0,166(19)	0,136(19)
#4604	20:33:24,516	41:26:55,069	6,9229(22)	16,115	14,919	14,324
Não				0,0577(48)	0,0567(47)	0,0508(47)
#4972	20:33:25,484	41:26:19,901	6,0008(16)	16,096	14,930	14,335
Não				0,0306(22)	0,0296(22)	0,0250(22)
#5772	20:33:27,752	41:31:32,839	6,0205(13)	16,092	14,961	14,434
Não				0,0468(26)	0,0438(26)	0,0395(26)
#6074	20:33:28,550	41:23:25,856	6,8599(26)	17,075	15,993	15,407
Não				0,0559(73)	0,0861(73)	0,0728(72)

(Continua...)

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#6888	20:33:30,793	41:19:40,615	7,3843(44)	16,056	14,926	14,424
Não				0,04521(57)	0,0377(57)	0,0367(57)
#7753	20:33:33,322	41:24:59,736	8,9698(46)	17,012	15,926	15,354
Não				0,0595(70)	0,0724(70)	0,0754(70)
#8591	20:33:35,782	41:22:2,483	12,302(17)	15,461	14,404	13,916
Não				0,0202(32)	0,0152(32)	0,0105(31)
#8019	20:33:34,123	41:25:25,938	12,1557(35)	15,616	14,542	14,022
Não				0,1116(41)	0,0920(40)	0,0852(40)
#8612	20:33:35,846	41:25:44,219	4,5476(13)	14,696	13,761	13,301
Não				0,0229(21)	0,0194(21)	0,0199(21)
#8805	20:33:36,449	41:29:59,961	2,86401(72)	15,940	14,817	14,222
Não				0,0371(49)	0,0350(49)	0,0276(49)
#9393	20:33:38,125	41:28:39,510	4,80818(91)	15,856	14,754	14,185
Não				0,0582(33)	0,0495(33)	0,0414(33)
#9870	20:33:39,536	41:21:10,155	14,413(16)	15,462	14,303	13,717
Não				0,0353(36)	0,0251(36)	0,0184(35)
#10052	20:33:40,084	41:31:59,060	3,83802(90)	17,681	16,307	15,536
Não				0,167(15)	0,150(15)	0,113(15)
#10978	20:33:42,941	41:25:13,905	6,6677(13)	16,244	15,181	14,612
Não				0,0907(50)	0,0957(50)	0,0782(50)
#11001	20:33:43,012	41:30:00,354	23,255(23)	11,425	10,734	10,449
2MASS J20334299+4130005 – RLP 412				0,0382(27)	0,0335(27)	0,0302(27)
#11055	20:33:43,163	41:25:41,054	8,4088(22)	16,390	15,283	14,751
Não				0,0875(45)	0,0868(44)	0,0743(44)

(Continua...)

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#11731	20:33:45,252	41:31:06,844	9,7662(89)d	16,692	15,410	14,806
Não				0,0386(60)	0.0382(60)	0.0365(60)
#12372	20:33:47,136	41:20:05,866	6,9002(19)	16,424	15,250	14,731
2MASS J20334710+4120061 - Infra-red source - CXOCyg J203347.04+412005.6				0,1027(69)	0,0990(69)	0,0801(69)
#12400	20:33:47,212	41:23:59,587	3,32786(28)d	15,703	14,665	14,185
Não				0,0785(36)	0,0822(36)	0,0735(36)
#12669	20:33:48,067	41:19:10,311	8,8654(35)	15,386	14,250	13,718
2MASS J20334804+4119105 - CXOCyg J203347.98+411910.1 - [AFM2007] 973				0,0560(39)	0,0513(40)	0,0477(39)
#12780	20:33:48,447	41:18:39,616	8,8244(57)	15,681	14,579	14,072
Não				0,0434(60)	0,0479(60)	0,0340(60)
#13534	20:33:50,833	41:31:41,808	7,1086(23)	17,398	15,931	15,091
Não				0,476(35)	0,449(34)	0,339(34)
#14086	20:33:52,559	41:23:15,620	6,0927(15)	15,353	14,313	13,829
Não				0,0507(33)	0,0438(32)	0,0399(32)
#14362	20:33:53,383	41:22:56,302	5,9533(20)	14,928	14,260	13,889
Não				0,0228(23)	0,0236(23)	0,0224(24)
#14726	20:33:54,337	41:19:33,424	8,3672(24)	14,826	13,774	13,302
Não				0,0381(20)	0,0344(19)	0,0282(20)
#15199	20:33:55,575	41:23:02,362	3,80802(88)	16,291	15,173	14,390
Não				0,0644(74)	0,0773(73)	0,0581(74)
#15632	20:33:56,684	41:29:16,131	3,16227(49)	16,859	15,627	15,015
Não				0,0816(68)	0,0820(68)	0,0726(68)
#16022	20:33:57,698	41:20:33,514	2,81259(72)	15,356	14,201	13,664
Não				0,0245(29)	0,0189(29)	0,0150(29)

(Continua...)

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#17683	20:34:02,087	41:22:50,791	8,9404(33)	15,487	14,345	13,814
Não				0,0331(22)	0,0314(22)	0,0262(22)
#17889	20:34:02,682	41:26:55,651	7,5433(34)	16,225	15,069	14,552
Não				0,0680(60)	0,0557(60)	0,0459(60)
#19460	20:34:07,861	41:21:41,510	10,0741(59)	16,007	14,688	14,064
Não				0,0480(39)	0,0327(39)	0,0354(39)
#19756	20:34:08,801	41:21:58,003	2,46951(27)	16,386	15,071	14,377
Não				0,0502(42)	0,0617(42)	0,0490(42)
#19954	20:34:09,535	41:26:25,287	17,237(27)	16,165	14,857	14,223
Não				0,0367(56)	0,0311(55)	0,0270(54)
#20123	20:34:10,157	41:26:35,159	5,8885(36)	17,999	16,675	16,020
Não				0,079(10)	0,0522(98)	0,0533(98)
#21186	20:34:13,795	41:25:04,462	3,73674(98)	16,111	14,937	14,409
Não				0,0381(54)	0,0454(53)	0,0382(53)
#21249	20:34:13,979	41:20:56,358	2,43449(39)	18,634	17,399	16,460
Não				0,215(23)	0,220(21)	0,180(20)
#21679	20:34:15,496	41:22:26,192	2,63906(43)	12,206	11,689	11,385
Não				0,0169(16)	0,0164(16)	0,0122(16)
#21681	20:34:15,497	41:28:52,719	4,1892(11)	16,608	15,387	14,851
Não				0,0592(62)	0,0573(62)	0,0507(61)
#21764	20:34:15,858	41:19:17,158	33,719(54)	15,917	14,776	14,286
Não				0,0635(49)	0,0602(50)	0,0508(49)
#21841	20:34:16,081	41:26:13,378	7,0587(29)	16,408	15,144	14,571
Não				0,0466(47)	0,0468(47)	0,0399(47)

(Continua...)

Tabela A.1: Dados fotométricos e astrométricos das estrelas candidatas à classificação mancha tipo I com períodos determinados.

ID	α	δ	P	$\langle J \rangle$	$\langle H \rangle$	$\langle K \rangle$
Existente na Literatura?				ΔJ	ΔH	ΔK
#23225	20:34:21,370	41:25:56,967	13,988(13)	15,360	14,162	13,651
Não				0,0285(30)	0,0268(30)	0,0254(30)
#23557	20:34:22,631	41:22:22,319	24,419(30)	15,944	14,724	14,157
Não				0,0540(44)	0,0494(44)	0,0425(44)
#24960	20:34:27,832	41:31:15,718	7,2004(42)	16,836	15,574	15,005
Não				0,0616(77)	0,0444(76)	0,00565(76)

Apêndice B

Apêndice: Comparação com a Literatura

Dos objetos analisados no presente estudo, 12 constavam entre os objetos variáveis de Henderson et al. (2011), tais objetos são apresentados na Tabela B.1. Nela consta a coordenada de cada objeto, o ID em nosso catálogo, a classificação provisória de acordo com o tipo de variabilidade, as magnitudes JHK obtidas através dos dados do UKIRT e os períodos obtidos (em caso de objetos periódicos); o ID, a classificação por variabilidade, as magnitudes RI e os períodos (quando cabível) segundo o catálogo de Henderson et al. (2011) e finalmente o ID e magnitudes JHK segundo o 2MASS. Para comparação das magnitudes do UKIRT com magnitudes do 2MASS, fatores de conversão podem ser obtidos em Hewett et al. (2006).

-		Nosso						[HSP 2011]				2MASS				
α	δ	ID	Tipo	J	H	K	Período	ID	Tipo	I	R	Período	ID	J	H	K
20:33:23.392	41:19:12.532	4206	Mancha	14,747	13,845	13,402	1,403d	076	Pul	18,86	17,22	1,399	J20332336+4119126	14,807	13,749	13,355
20:33:28.128	41:21:40.034	5909	Mancha	14,852	13,922	13,504	0,63d	079	Herb?	18,67	17,29	Irr	J20332810+4121402	14,876	13,899	13,494
20:33:27.560	41:20:15.657	5707	Mancha	14,325	13,466	13,067	8,115d	064	Pul	18,02	16,65	8,2	J20332754+4120158	-	13,47	-
20:33:29.662	41:18:45.642	6495	Irr	13,563	12,356	11,097	-	059	Herb?	17,87	16,36	Irr	J20332964+4118458	13,942	12,822	12,411
20:33:31.467	41:20:57.447	7124	Irr	12,243	11,413	10,467	~ 50	011	Pul	15,48	14,32	~ 60	J20333144+4120576	12,270	11,424	10,651
20:33:31.797	41:20:47.214	7242	Mancha	13,227	12,456	12,080	2,545d	027	Pul	16,69	15,40	1,645d	J20333177+4120473	13,270	12,361	12,0380
20:33:20.181	41:19:43.086	2999	Mancha	13,896	12,911	12,446	2,051	065	Pul	18,07	16,53	2,039	J20332016+4119432	13,942	12,822	12,411
20:33:48.827	41:23:08.027	12917	Mancha	13,752	13,239	12,893	2,716	034	Pul	16,90	15,72	1,585	J20334880+4123082	13,773	13,203	12,896
20:33:58.365	41:20:55.993	16296	Mancha	13,664	12,736	12,317	19,508d	051	Pul	17,47	16,04	1,05	J20335834+4120562	13,625	12,67	-
20:33:42.143	41:22:22.560	10724	Mancha	12,293	11,917	11,734	0,821	004	EB	14,25	13,49	1,6424	J20334212+4122227	12,313	11,905	11,675
20:33:55.227	41:20:00.991	15069	eclipse	15,015	13,729	12,869	Irr	105	Herb?	19,73	18,09	Irr	J20335520+4120011	14,929	13,659	12,862

Tabela B.1: Comparação dos nossos objetos em comum com o catálogo de variáveis em Cygnus OB2 de Henderson et al. (2011).

Referências Bibliográficas

- Affer, L., Micela, G., Favata, F., Flaccomio, E., & Bouvier, J. 2013, MNRAS , 643
- Aigrain, S., Hodgkin, S., Irwin, J., et al. 2007, MNRAS , 375, 29
- Bica, E., Dutra, C. M., & Barbuy, B. 2003, A&A , 397, 177
- Bouvier, J., Bertout, C., Benz, W., & Mayor, M. 1986, A&A , 165, 110
- Bouvier, J., Covino, E., Kovo, O., et al. 1995, A&A , 299, 89
- Bracewell, R. 1986, The Fourier transform and its applications, McGraw-Hill electrical and electronic engineering series (McGraw-Hill)
- Brigham, E. O. 1974, The fast Fourier Transform
- Casali, M., Adamson, A., Alves de Oliveira, C., et al. 2007, A&A , 467, 777
- Cohen, R. E., Herbst, W., & Williams, E. C. 2004, AJ , 127, 1602
- Comerón, F., Pasquali, A., Rodighiero, G., et al. 2002, A&A , 389, 874
- Deeming, T. J. 1975, Ap&SS , 36, 137
- Gennaro, M., Prada Moroni, P. G., & Tognelli, E. 2012, MNRAS , 420, 986
- Goodricke, J. 1783, Royal Society of London Philosophical Transactions Series I, 73, 474
- Guimarães, M. 2008, Tese de doutorado, Departamento de Física - ICEx-UFMG
- Hall, D. S. 1995, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 79, Robotic Telescopes. Current Capabilities, Present Developments, and Future Prospects for Automated Astronomy, ed. G. W. Henry & J. A. Eaton, 65
- Hanson, M. M. 2003, ApJ , 597, 957
- Hartmann, L. 2009, Accretion Processes in Star Formation, 2nd edn.

- Henderson, C. B., Stanek, K. Z., Pejcha, O., & Prieto, J. L. 2011, *ApJS* , 194, 27
- Herbst, W. 2012, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 40, 448
- Herbst, W., Bailer-Jones, C. A. L., Mundt, R., Meisenheimer, K., & Wackermann, R. 2002, *A&A* , 396, 513
- Herbst, W., Eislöffel, J., Mundt, R., & Scholz, A. 2007, *Protostars and Planets V*, 297
- Herbst, W., Herbst, D. K., Grossman, E. J., & Weinstein, D. 1994, *AJ* , 108, 1906
- Herbst, W. & Wittenmyer, R. 1996, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 28, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 1338
- Hewett, P. C., Warren, S. J., Leggett, S. K. T. d., & Hodgkin, S. T. 2006, *MNRAS* , 367, 454
- Ho, P. Y. & Ho, P.-Y. 1962, *Vistas in Astronomy*, 5, 127
- Hodgkin, S. T., Irwin, M. J., Hewett, P. C., & Warren, S. J. 2009, *MNRAS* , 394, 675
- Hoffleit, D. 1986, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 15, 77
- Hoffmeister, C., Richter, G., & Wenzel, W. 1985, *Variable stars* (Springer-Verlag)
- Horne, J. H. & Baliunas, S. L. 1986, *ApJ* , 302, 757
- Irwin, J., Aigrain, S., Hodgkin, S., et al. 2006, *MNRAS* , 370, 954
- Irwin, J., Irwin, M., Aigrain, S., et al. 2007, *MNRAS* , 375, 1449
- Johnson, H. & Morgan, W. 1954, *ApJ* , 119, 344
- Joy, A. H. 1945, *ApJ* , 102, 168
- Kearns, K. E. & Herbst, W. 1998, *AJ* , 116, 261
- Knödseder, J. 2000, *A&A* , 360, 539
- Knödseder, J., Cerviño, M., Le Duigou, J.-M., et al. 2002, *A&A* , 390, 945
- Lamm, M. H., Mundt, R., Bailer-Jones, C. A. L., & Herbst, W. 2005, *A&A* , 430, 1005
- Larson, R. B. 2003, *Reports on Progress in Physics*, 66, 1651
- Lomb, N. R. 1976, *Ap&SS* , 39, 447

- Marconi, M. & Palla, F. 2003, *Ap&SS* , 284, 245
- Massey, P. & Thompson, A. B. 1991, *AJ* , 101, 1408
- Mathieu, R. D., Baraffe, I., Simon, M., Stassun, K. G., & White, R. 2007, *Protostars and Planets V*, 411
- Morgan, W. W., Meinel, A. B., & Johnson, H. M. 1954, *ApJ* , 120, 506
- Münch, L. & Morgan, W. 1953, *ApJ* , 118, 161
- Oppenheim, A. & Schafer, R. 2010, *Discrete-time signal processing*, Prentice-Hall signal processing series (Prentice Hall)
- Ortigueira, M. 2005, *Processamento digital de sinais*, Manuais Universitários (Fundação Calouste Gulbenkian)
- Percy, J. 2007, *Understanding Variable Stars* (Cambridge University Press)
- Pigott, E. & Englefield, H. C. 1786, *Royal Society of London Philosophical Transactions Series I*, 76, 189
- Pigulski, A. & Kołaczowski, Z. 1998, *MNRAS* , 298, 753
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. 1992, *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*, 2nd edn. (Cambridge: Cambridge University Press)
- Proakis, J. & Manolakis, D. 2007, *Digital signal processing* (Pearson Prentice Hall)
- Reddish, V., Lawrence, L. C., & Pratt, N. M. 1966, *Publications of the Royal Observatory of Edinburgh*, 5, 111
- Reipurth, B. & Schneider, N. 2008, *Star Formation and Young Clusters in Cygnus*, ed. B. Reipurth, 36
- Samus, N. N., Durlevich, O. V., & et al. 2009, *VizieR Online Data Catalog*, 1, 2025
- Scargle, J. D. 1981, *ApJS* , 45, 1
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ* , 263, 835
- Scargle, J. D. 1989, *ApJ* , 343, 874
- Schulte, D. 1956a, *ApJ* , 124, 530
- Schulte, D. 1956b, *ApJ* , 123, 250

- Schulte, D. 1958, *ApJ* , 128, 41
- Stahler, S. W. 1983, *ApJ* , 274, 822
- Stahler, S. W. & Palla, F. 2005, *The Formation of Stars*
- Stahler, S. W., Shu, F. H., & Taam, R. E. 1980, *ApJ* , 241, 637
- Sterken, C. & Jaschek, C. 1996, *Light Curves of Variable Stars: A Pictorial Atlas* (University Press)
- Templeton, M. 2004, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 32, 41
- Torres-Dodgen, A., Carroll, M., & Tapia, M. 1991, *MNRAS* , 249, 1
- Voelcker, K. & Elsässer, H. 1973, in *IAU Symposium, Vol. 52, Interstellar Dust and Related Topics*, ed. J. M. Greenberg & H. C. van de Hulst, 529
- Watson, C., Henden, A. A., & Price, A. 2009, *VizieR Online Data Catalog*, 1, 2027
- Wilk, S. R. 1996, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 24, 129