



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.05.18.42-TDI

BUSCA POR ACREÇÃO MAGNÉTICA EM OBJETOS DO TIPO SW SEXTANTIS

Isabel de Jesus Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada pela Dra. Cláudia Vilega Rodrigues, aprovada em 29 de março de 2016.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L5AFJB>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.05.18.42-TDI

BUSCA POR ACREÇÃO MAGNÉTICA EM OBJETOS DO TIPO SW SEXTANTIS

Isabel de Jesus Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada pela Dra. Cláudia Vilega Rodrigues, aprovada em 29 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L5AFJB>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lima, Isabel de Jesus.

L628b Busca por acreção magnética em objetos do tipo SW Sextantis / Isabel de Jesus Lima. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxvi + 135 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.05.18.42-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadora : Drs. Cláudia Vilega Rodrigues.

1. Variáveis cataclísmicas. 2. Novalikes. 3. SW Sextantis.
4. Polarização circular. 5. Acreção magnética. I.Título.

CDU 52-33/35



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

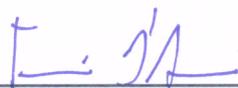
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Isabel de Jesus Lima**

Título: " BUSCA POR ACREÇÃO MAGNÉTICA EM OBJETOS DO TIPO SW SEXTANTIS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Astrofísica

Dr. Flávio D'Amico



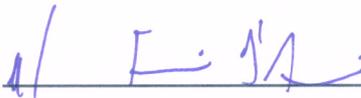
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cláudia Vilega Rodrigues



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Raymundo Baptista



Convidado(a) / UFSC / Rio Grande do Sul - RS

Dr. Alexandre Soares de Oliveira



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 29 de Março de 2016

*“Toda verdade passa por três etapas: primeiro, ela é ridicularizada.
Depois, é violentamente antagonizada. Por último, é aceita
universalmente como autoevidente”.*

ARTHUR SCHOPENHAUER

A minha mãe, Maria Wilma J. Conceição

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o uno e o verso do Universo.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

A minha família, especialmente minha irmã Raquel e meus tios Wilson, Wilza, Wnira, Wrani e Wedison por todo o apoio à distancia e à Alberto pela presença.

À Dra. Cláudia Vilega Rodrigues pela sabedoria em transmitir conhecimento de maneira espontânea e muitas vezes lúdica, pela dedicada orientação e pela paciência até nos momentos mais difíceis.

Ao Dr. Francisco J. Jablonski pela ajuda fundamental na análise dos objetos e pelos ensinamentos transmitidos ao longo de todo o processo.

Ao Observatório Pico dos Dias/LNA pelo tempo concedido ao grupo de polarimetria.

Aos professores da Divisão de Astrofísica do INPE pelos ensinamentos.

Aos companheiros de mestrado Adam S. B. Gontijo, Aysses C. Oliveira, Lorena C. Jesus e Luidhy Santana.

Aos funcionários do INPE que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao grupo de professores do Grupo de Astrofísica Teórico e Observacional da UEFS (Dr. Marildo G. Pereira, Dr. Eduardo B. Amôres, Dr. Paulo C. R. Poppe, Dr. Iranderly F. Fernandes e Dra. Vera A. F. Martins) pelos meus primeiros passos na astrofísica.

RESUMO

Os objetos do tipo SW Sextantis (SW Sex) compõem uma subclasse das variáveis cataclísmicas (VCs) do tipo *novalike*. As VCs são sistemas binários compactos com transferência de matéria de uma estrela de baixa massa da sequência principal ou pouco evoluída, a chamada secundária, para uma anã branca (AB), a primária. Nas *novalikes*, devido à alta taxa de transferência de matéria da secundária, supõe-se que o disco de acreção esteja sempre em estado de alto brilho e com alta viscosidade. Do ponto de vista observacional, as SW Sex são definidas por algumas peculiaridades, dentre as quais destacamos: (i) linhas de Balmer em emissão com pico simples, mesmo em sistemas com alta inclinação do plano orbital onde se esperaria linhas de picos duplos; (ii) linhas de emissão com velocidade radial defasada do movimento orbital da anã branca. Para explicar a fenomenologia associada a esses objetos são propostos vários cenários: transbordamento do fluxo de matéria acima do plano orbital; ventos do disco; disco geometricamente espesso nas bordas e/ou acreção magnética. Este trabalho de mestrado buscou por sinais de acreção magnética nos dados polarimétricos obtidos no Observatório Pico dos Dias (LNA). Nossa amostra é composta pelos sistemas: LS Peg; 1H 0204-023; SW Sex; V442 Oph e V380 Oph. A existência de polarização circular não-nula e variável pode ser interpretada por emissão ciclotrônica, similar ao observado nas variáveis cataclísmicas magnéticas. No sistema LS Peg, confirmamos a presença de polarização circular com a emissão modulada com o período em torno de 20 minutos, coerente na fotometria e polarimetria, que pode ser interpretada como o período de rotação da AB. A análise preliminar de 1H 0204-023, SW Sex e V442 Oph indica a presença de polarização circular intrínseca e variável, mas nenhum período significativo que possa ser associado à rotação da AB. Em V380 Oph, não há sinal de variabilidade na polarimetria, mas na fotometria encontramos um período consistente com a literatura da ordem de 47 min.

Palavras-chave: Variáveis cataclísmicas. *Novalikes*. SW Sextantis. Polarização circular. Acreção magnética.

SEARCH FOR MAGNETIC ACCRETION IN SW SEXTANTIS SYSTEMS

ABSTRACT

The SW Sextantis (SW Sex) systems belong to a subclass of cataclysmic variables (CVs) of the novalike type. The CVs are compact binary systems presenting mass transfer from a low-mass main-sequence or slightly evolved star, the secondary star, to a white dwarf (WD), the primary star. The accretion disk of novalikes is always in a bright state due to the high mass-transfer rate of the secondary, which keeps the disk in a high viscosity regime. From the observational point of view, SW Sex objects are defined by some peculiarities, among which we emphasize: (i) single-peak emission lines, even in systems seen at high inclinations, for which we expect double-peak lines; (ii) lagged radial velocity curve of the emission lines relative to the orbital motion of the white dwarf. Some scenarios are proposed to explain this phenomenology: stream overflow above the orbital plane; disk winds; flared disk and/or magnetic accretion. This master's work sought by magnetic accretion signals. In photometric and polarimetric datas in a sample of SW Sex objects using data obtained in the Observatório Pico dos Dias (LNA). The existence of non-zero circular polarization can be interpreted as cyclotron emission. We confirm the presence of polarization in LS Peg modulated at 20 minutes, coherent with photometry and polarimetry. It could be associated with the rotation period of the white dwarf. Preliminary analysis of 1H 0204-023, SW Sex, and V442 Oph indicates the presence of intrinsic circular polarization. V380 Oph does not show variability in polarimetry, but we find a photometric period of 47 min, consistent with the published flarings period.

Keywords: Cataclysmic variable. Novalikes. SW Sextantis. Circular polarization. Magnetic accretion.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Esquema de uma VC não-magnética	2
1.2 Geometria do lobo de Roche e superfície equipotencial. Adaptado de: Sluys (2006), Hellier (2001)	3
1.3 Distribuição do número de VCs em função do período orbital. Fonte: Ferrario et al. (2015)	5
1.4 Espectro de emissão ciclotônica. Fonte: Lamb e Masters (1979)	8
1.5 Exemplo das absorções dependentes da fase. Fonte: Thorstensen et al. (1991).	10
1.6 Distribuição do período orbital pelo número de objetos tipo SW Sex. Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2007a)	11
1.7 Ilustração da geometria das SW Sex para o cenário magnético.	13
1.8 Distribuição das classes das VCs no espaço momento magnético por taxa de perda de massa. Fonte: Patterson et al. (2002)	14
2.1 Gaveta polarimétrica do OPD/LNA	17
2.2 Imagem do <i>master bias</i>	20
2.3 Imagens de <i>flat-field</i> nos diferentes filtros	21
2.4 Ilustração dos componentes na polarimetria. Fonte: Collett (2005)	22
2.5 Imagem da estrela padrão polarizada HD 155197	24
2.6 Modulação em função do ângulo de posição da lâmina	25
2.7 Correção do viés da polarização linear. Fonte: Vaillancourt (2006).	27
2.8 Curvas de luz do sistema 1H 0204-023 no filtro V	39
2.9 Curvas de luz do sistema 1H 0204-023 no filtro R	40
2.10 Imagens dos objetos tipo SW Sex estudados	42
3.1 Curva de luz e periodograma de LS Peg. Fonte: Taylor et al. (1999)	44
3.2 Evidência de acreção magnética em LS Peg Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2001)	46
3.3 Espectros e curva de velocidade do sistema LS Peg das linhas H α e da linha He I λ 6678. Fonte: Taylor et al. (1999)	47
3.4 Curva de luz em raios X moles e duros e periodograma de LS Peg. Fonte: Ramsay et al. (2008)	48
3.5 Curvas de luz do sistema LS Peg. Fonte: AAVSO (2016)	49
3.6 Curvas de luz do campo do sistema LS Peg	51
3.7 Curvas de luz e polarização de LS Peg	54

3.8	Curvas polarização da estrela HH95 Peg2 - 2 no campo de LS Peg	55
3.9	Resultado da variabilidade do parâmetro Q no sistema LS Peg observado em 06/10/2010	58
3.10	Resultado da variabilidade no parâmetro U no sistema LS Peg observado em 06/10/2010	59
3.11	Resultado da variabilidade do parâmetro Q no sistema LS Peg observado em 12/10/2010	60
3.12	Resultado da variabilidade do parâmetro U no sistema LS Peg observado em 12/10/2010	61
3.13	Resultado da variabilidade do parâmetro U no sistema LS Peg em todo o conjunto de dados	62
3.14	Resultado da variabilidade do parâmetro V no sistema LS Peg para todo o conjunto de dados	63
3.15	Estudo da variabilidade nos dados de polarização circular nos dados de LS Peg no dia 06/10/2010	65
3.16	Estudo da variabilidade nos dados de polarização circular em 06/10/2010	66
3.17	Estudo da variabilidade na polarização circular de todo o conjunto de dados	67
3.18	Periodograma dos dados fotométricos dos dois dias de observação do sistema LS Peg	70
3.19	Periodograma dos dados fotométricos do sistema LS Peg	70
3.20	Periodograma dos dados fotométricos da estrela HH95 Peg2-2	71
3.21	Periodogramas dos dados de polarimetria linear em LS Peg	74
3.22	Periodogramas dos dados de polarimetria linear na estrela HH95 Peg2-2 .	75
3.23	Periodograma dos dados de polarimetria circular de LS Peg	76
3.24	Periodograma dos dados de polarimetria circular de HH95 Peg2-2	76
3.25	Periodograma de todos os dados de polarimetria circular de LS Peg . . .	77
3.26	Diagrama de fase da polarização circular de LS Peg	77
3.27	Diagrama de fase da polarização de LS Peg	78
4.1	Periodograma e curva de velocidade radial do sistema 1H 0204-023. Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2007b)	82
4.2	Curvas de luz e polarização de 1H 0204-023 no filtro V	86
4.3	Curvas de luz e polarização de 1H 0204-023 no filtro R	87
4.4	Curvas de polarização da estrela 0879-0037423 no filtro V	88
4.5	Curvas de polarização da estrela 0879-0037423 no filtro R	89
4.6	Periodograma dos dados fotométricos do sistema 1H 0204-023 para cada observação	90

4.7	Periodograma com todo o conjunto de dados fotométricos do sistema 1H 0204-023	92
4.8	Periodograma dos dados fotométricos da estrela de campo do sistema 1H 0204-023	93
4.9	Periodograma dos dados polarimétricos do sistema 1H 0204-023	93
4.10	Periodograma dos dados polarimétricos do sistema 1H 0204-023 por filtro	94
4.11	Periodograma dos dados polarimétricos da estrela de campo do sistema 1H 0204-023 por filtro	94
4.12	Curvas de luz do sistema SW Sex. Fonte: AAVSO (2016)	95
4.13	Curvas de luz e polarização de SW Sex	97
4.14	Curvas de polarização das estrelas de campo do sistema SW Sex	98
4.15	Periodogramas dos dados fotométricos do sistema SW Sex e da estrela de campo	100
4.16	Periodograma dos dados polarimétricos do sistema SW Sex e da estrela de campo	101
4.17	Curvas de luz e polarização de V442 Oph	104
4.18	Curvas de polarização da estrela 0737-0410665 no campo de V442 Oph .	105
4.19	Periodograma dos dados fotométricos do sistema V442 Oph por filtro . .	106
4.20	Periodograma dos dados fotométricos da estrela de campo do sistema V442 Oph por filtro	107
4.21	Periodograma de todo o conjunto de dados fotométricos do sistema V442 Oph	107
4.22	Periodogramas dos dados polarimétricos do sistema V442 Oph e da es- trela de campo	109
4.23	Curvas de luz do sistema V380 Oph. Fonte: AAVSO (2016)	111
4.24	Curvas de luz e polarização de V380 Oph	113
4.25	Curvas de polarização das estrelas no campo de V380 Oph	114
4.26	Periodogramas dos dados fotométricos do sistema V380 Oph e da estrela de campo.	116
4.27	Periodogramas dos dados polarimétricos do sistema V380 Oph e da es- trela de campo.	117
A.1	Imagens de <i>flat field</i> por lâmina	132
A.2	Resultados do padrão de iluminação para altas frequências	133
A.3	Resultado da correção por <i>flat-field</i> no sistema V422 Oph	135

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Lista de objetos SW Sextantis com polarização circular estimada (HOARD et al., 2013).	15
2.1 Descrição das observações dos objetos SW Sex realizadas no OPD.	18
2.2 Polarização linear das estrelas padrões na literatura.	31
2.3 Nossas medidas das estrelas padrões polarizadas.	32
2.4 Resultado da correção do PA ao sistema equatorial por filtro e por missão.	33
2.5 Resultado da polarimetria das estrelas padrões não-polarizadas.	33
2.6 Média da polarização linear das padrões não polarizadas por objeto, por filtro e por missão.	34
2.7 Média da polarização circular das estrelas padrões por objeto, por filtro e por missão.	35
3.1 Propriedades do sistema LS Peg	43
3.2 Magnitudes das estrelas de campo em LS Peg	50
3.3 Estatística do resultado da polarização de LS Peg	53
3.4 Períodos encontrados para LS Peg	80
4.1 Propriedades dos objetos tipo SW Sex	81
4.2 Magnitudes das estrelas de campo em 1H 0204-023	83
4.3 Resultado da polarização dos objetos tipo SW Sex	84
4.4 Magnitudes das estrelas de campo em SW Sex	96
4.5 Resultado da polarização de SW Sex	97
4.6 Magnitudes das estrelas de campo em V442 Oph	102
4.7 Resultado da polarização do sistema V442 Oph	103
4.8 Magnitudes das estrelas de campo em	111
4.9 Resultado da polarização do sistema V380 Oph	112
A.1 Resultado da polarização circular dos objetos tipo SW Sex	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAVSO	–	<i>American Association of Variable Star Observers</i>
AB	–	Anã Branca
ADU	–	<i>Analog Digital Unit</i>
AR	–	Ascensão reta
DEC	–	Declinação
CCD	–	<i>Charge Couple Device</i>
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	–	Infravermelho
IRAF	–	<i>Image Reduction and Analysis Facility</i>
OPD	–	Observatório do Pico dos Dias
OQPs	–	Oscilações Quasi-Periódicas
PA	–	<i>position angle</i>
PI	–	Polar Intermediária
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
RPC	–	Região pós-choque
VC	–	Variável Cataclísmica
VCM	–	Variável Cataclísmica Magnética
UV	–	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

a	–	Distância de separação entre a primária e a secundária
G	–	Constante gravitacional universal
P	–	Medida de Polarização linear
q	–	Razão de massa da secundária em relação a primária
M_1	–	Massa da primária
M_2	–	Massa da secundária
\dot{M}	–	Taxa de transferência de matéria para a anã branca
mag_{med}	–	Magnitude medida
mag_{lit}	–	Magnitude da literatura
Δ_{mag}	–	Diferença entre as magnitudes medidas e as dadas na literatura
P_{bat}	–	Período de batimento
P_{orb}	–	Período orbital
P_{rot}	–	Período rotacional da anã branca
V	–	Polarização linear de uma medida
$\langle P_{pond} \rangle$	–	Média da polarização linear de uma medida ponderada pelo erros
V	–	Polarização circular de uma medida
$\langle V_{pond} \rangle$	–	Média da polarização circular de uma medida ponderada pelo erros
$\langle V \rangle$	–	Média da polarização circular
σ_V	–	Desvio padrão de uma medida da polarização
$\sigma_{\langle V \rangle}$	–	Desvio padrão da média na polarização circular
$\langle \sigma_V \rangle$	–	Média dos erros observacionais da polarização circular
$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$	–	Desvio padrão da média dos erros observacionais da polarização circular
Q	–	Parâmetro de Stokes da intensidade da polarização linear
$\langle Q \rangle$	–	Média da polarização linear em Q ponderada com o erro da polarização
U	–	Parâmetro de Stokes da intensidade da polarização linear
$\langle U \rangle$	–	Média da polarização linear em U ponderada com o erro da polarização
μ	–	Massa reduzida

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Variáveis cataclísmicas	1
1.1.1 Evolução	4
1.1.2 Classificação	4
1.2 Acreção magnética	6
1.2.1 Emissão ciclotrônica	7
1.3 Os objetos tipo SW Sex	9
1.3.1 Definição	9
1.3.2 O fenômeno SW Sex	10
1.3.3 O cenário magnético	11
1.4 Justificativa e objetivos do trabalho	16
2 METODOLOGIA	17
2.1 Aquisição de dados	17
2.2 Correções das imagens	19
2.3 Polarimetria	21
2.3.1 Cálculo da polarização	24
2.3.1.1 Normalização do fluxo ordinário e extraordinário	26
2.3.1.2 Correção do viés da polarização linear	27
2.3.1.3 Cálculo do zero da lâmina	28
2.3.2 Calibração polarimétrica	28
2.4 Fotometria	36
2.4.1 Fotometria de abertura	36
2.4.2 Fotometria diferencial	37
2.4.3 Calibração fotométrica	41
3 O SISTEMA LS PEGASI	43
3.1 Contextualização	43
3.2 Fotometria diferencial de LS Peg	49
3.3 Polarimetria do sistema	52
3.4 Análise dos dados	56
3.4.1 Busca por variabilidade	56
3.4.2 Busca por sinais periódicos	68

3.4.2.1	Fotometria	69
3.4.2.2	Polarimetria	72
3.5	Discussão e conclusões	79
4	CURVAS DE LUZ E POLARIZAÇÃO	81
4.1	1H 0204-023	81
4.1.1	Fotometria diferencial	82
4.1.2	Polarimetria	84
4.1.3	Busca por sinais periódicos	90
4.2	SW Sex	95
4.2.1	Fotometria diferencial	95
4.2.2	Polarimetria	96
4.2.3	Busca por sinais periódicos	99
4.3	V442 Oph	102
4.3.1	Fotometria diferencial	102
4.3.2	Polarimetria	103
4.3.3	Busca por sinais periódicos	106
4.4	V380 Oph	110
4.4.1	Fotometria diferencial	110
4.4.2	Polarimetria	112
4.4.3	Busca por sinais periódicos	115
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	APÊNDICE A - CORREÇÃO DE <i>FLAT-FIELD</i> POR LÂMINA . .	131

1 INTRODUÇÃO

SW Sextantis (SW Sex) são uma subclasse das variáveis cataclísmicas (VCs), inicialmente identificadas por suas características observacionais peculiares. Entre os muitos cenários propostos para explicar sua fenomenologia, destacamos o cenário magnético. Deste modo, apresentamos neste capítulo, na Seção 1.1, os principais conceitos das VCs, na Seção 1.2, as características da acreção via campo magnético, na Seção 1.3, definimos e caracterizamos os sistemas tipo SW Sex e na Seção 1.4, apresentamos os objetivos e as justificativas deste trabalho de mestrado.

1.1 Variáveis cataclísmicas

As VCs são sistemas binários cerrados em que uma anã vermelha, também denominada de secundária, transfere matéria em direção à anã branca (AB), a primária. Dois livros recomendados para a revisão desses sistemas são Warner (1995) e Hellier (2001). As componentes estelares das VCs são:

Primária, geralmente apresenta massa entre $0,5 - 0,6 M_{\odot}$, temperatura na superfície da ordem de 10.000 a 60.000 K e raio em torno de 10^4 km. É formada por um núcleo degenerado, remanescente de estrelas de baixa massa que queimaram apenas hidrogênio e hélio.

Secundária, estrela pouco evoluída ou pertencente à sequência principal, do tipo G, K ou M, cuja massa é da ordem de décimos da massa solar, em torno de $0,075$ a $0,5 M_{\odot}$. A temperatura superficial é 3.000 a 6.000 K e o raio é aproximadamente igual a $0,15 R_{\odot}$.

Outros componentes típicos das VCs são apresentados na Figura 1.1. As principais fontes de radiação no óptico são o disco de acreção e a mancha quente (*hot spot*), região onde a matéria em trajetória balística proveniente da estrela doadora atinge o disco de acreção. As fontes que dominam a radiação no ultravioleta (UV) são a AB e a *boundary layer* – região de fronteira entre o disco e a AB. No infravermelho (IV), a emissão geralmente é da secundária.

A geometria do sistema binário é determinada pelo modelo de Roche, em homenagem ao matemático francês Édouard Albert Roche (1820–1883). Esse modelo é definido assumindo que ambos os componentes interagem gravitacionalmente como se fossem massas puntiformes e o sistema de referência cartesiano (x, y, z) rotaciona com a binária, com a primária localizada na origem. O eixo x é definido entre o centro das

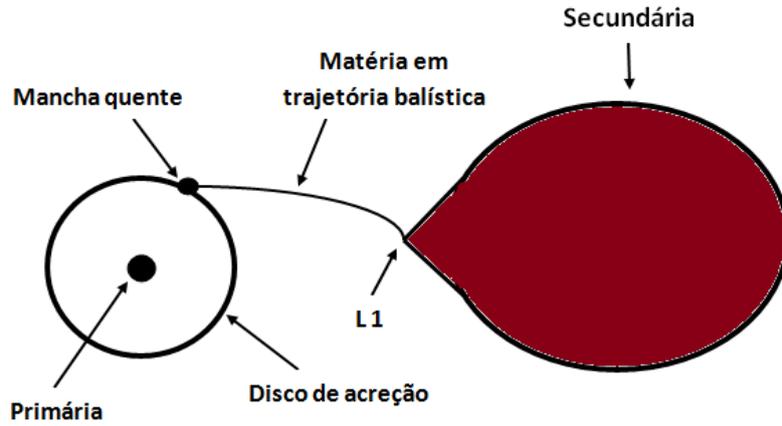


Figura 1.1 - Esquema de uma VC não-magnética típica indicando os principais componentes.

duas estrelas, o eixo y é perpendicular ao eixo x no plano da binária e em torno do eixo z , perpendicular ao plano da binária, ocorre a rotação do sistema.

O potencial resultante numa partícula teste é dado pela soma do potencial gravitacional mais o centrífugo, como mostra a Equação 1.1:

$$\phi(x, y, z) = -\frac{GM_1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{GM_2}{(x - a)^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{P_{orb}} \right)^2 [(x - \mu a)^2 + y^2], \quad (1.1)$$

sendo G a constante gravitacional, M_1 a massa da primária, M_2 a massa da secundária, a é separação entre as estrelas, μ a massa reduzida e P_{orb} o período orbital.

O período orbital do sistema binário é sincronizado com o período da secundária devido às forças de maré. Ele relaciona-se ao tamanho e as massas do sistema pela terceira lei de Kepler, dada por:

$$P_{orb}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}. \quad (1.2)$$

Uma superfície equipotencial de Roche é exemplificada na Figura 1.2, sendo L_1 , L_2 e L_3 os pontos de Lagrange onde as forças gravitacional e centrífuga se cancelam. Em L_1 , localizado entre as duas estrelas, a matéria pode ser transferida de uma estrela para a outra sem dispêndio de energia.

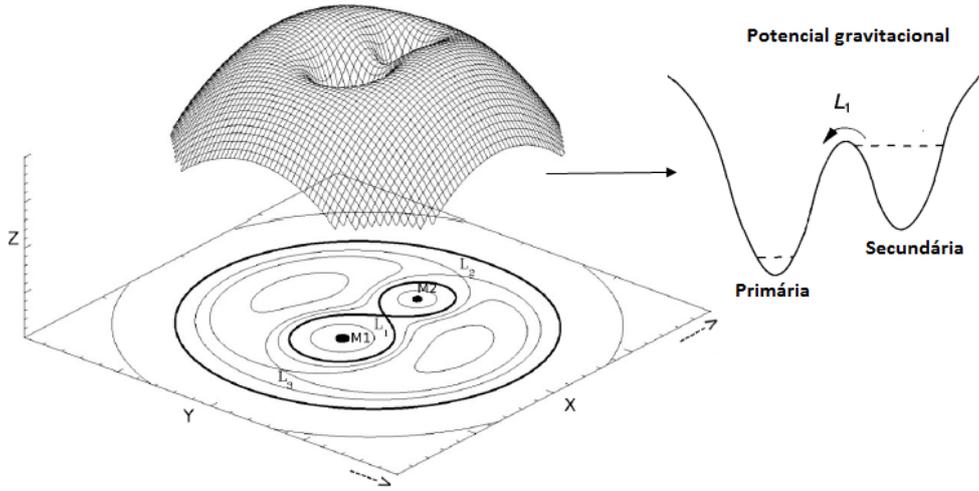


Figura 1.2 - Geometria do lobo de Roche e superfície equipotencial tridimensional mostrando os pontos lagrangianos externos L_2 e L_3 e o interno L_1 para uma VC de $q = M_2/M_1 = 1/2$.

Fonte: Adaptado de Sluys (2006), Hellier (2001).

As VCs são binárias compactas, de modo que o tamanho das estrelas é comparável à distância entre elas. Quando o raio da estrela secundária é relativamente grande em relação à separação das estrelas a sua superfície torna-se distorcida, de forma alongada em direção a sua companheira, devido às forças de maré. Ao preencher o lobo de Roche, a secundária transfere matéria para a AB.

Na formação do disco de acreção, a matéria transferida pela secundária orbita o raio de circularização (r_{circ}), que é o raio de órbita circular em torno da AB onde a partícula tem o mesmo momento angular que no ponto lagrangiano L_1 . Devido à transferência de momento angular por processos viscosos, a matéria se espalha tanto para órbitas mais próximas da AB quanto para as mais afastadas dissipando material do anel em um disco. O r_{circ} pode ser aproximado por:

$$r_{circ} = 0,0859 a q^{-0,426}, \quad (1.3)$$

para $0,05 < q < 1$, sendo a razão de massas $q = \frac{M_2}{M_1}$ (WARNER, 1995).

A região onde a dinâmica do fluxo de matéria é afetada pelo campo magnético da primária é denominada de magnetosfera. O raio que a delimita (r_{mag}) é dado pela Equação 1.4.

$$r_{mag} = 2,7 \times 10^{10} \mu_{33}^{4/7} \dot{M}_{16}^{-2/7} \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^{1/7}, \quad (1.4)$$

onde μ_{33} é o momento magnético em unidades de 10^{33} G cm³, \dot{M}_{16} é a taxa de matéria transferida em unidades de 10^{16} g s⁻¹ (PATTERSON et al., 2002).

Caso $r_{mag} \gg r_{circ}$, não é formado o disco de acreção e a matéria em trajetória balística segue as linhas de campo magnético em direção à superfície da AB.

1.1.1 Evolução

O período orbital (P_{orb}) e a taxa de transferência de matéria (\dot{M}) são os principais parâmetros na compreensão da evolução das VCs, que é determinada pela perda de momento angular. Uma revisão sobre o modelo padrão de evolução das VCs pode ser encontrada em Knigge et al. (2011). De modo geral, durante a evolução das VCs, o P_{orb} decresce devido à perda de momento angular por dois tipos de mecanismos: o freamento magnético que ocorre quando o campo magnético da secundária faz o vento estelar co-rotacionar até o raio da magnetosfera, eficiente em períodos orbitais mais longos ($P_{orb} \geq 3$ h), e a radiação por ondas gravitacionais, efetivo nos curtos períodos ($P_{orb} \leq 2$ h), atuando numa escala de tempo em torno de 10^9 anos (HELLIER, 2001).

A distribuição do número de objetos em função do período orbital (Figura 1.3) mostra o caminho evolutivo das VCs, com a maior parte das VCs no intervalo entre 1 a 10 horas. Uma diminuição do número de objetos é observada no período entre 2 e 3 horas, denominado de *period gap*. Neste intervalo, segundo o modelo padrão (KNIGGE et al., 2011, por exemplo), o processo de freamento magnético é desligado e a transferência de matéria cessa, de modo que muitos objetos não são mais observados devido à diminuição de sua luminosidade. Os objetos encontrados no *period gap* podem ser VCs extremamente jovens, iniciando, portanto, sua evolução nesse intervalo, ou podem ser variáveis cataclísmicas magnéticas (VCMs), que possuem a evolução alterada com relação ao cenário padrão devido ao alto campo magnético (KATYSHEVA; PAVLENKO, 2003, por exemplo).

1.1.2 Classificação

As VCs apresentam uma rica variedade de variações fotométricas tais como erupções, eclipses, *flickerings*, modulações elipsoidais, etc. A classificação das VCs é geralmente baseada nas características observacionais presentes nas curvas de luz, por exemplo,

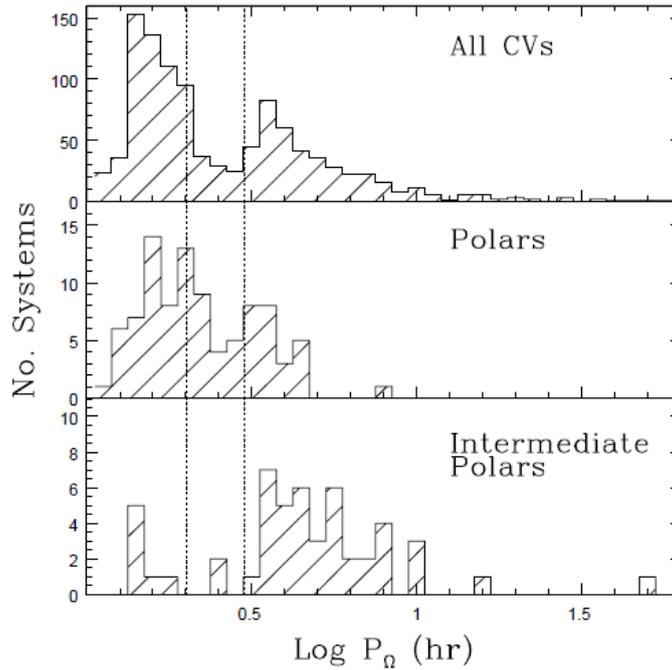


Figura 1.3 - Distribuição do número de VCs em função do logaritmo do período orbital. A faixa tracejada refere-se ao intervalo do *period gap*.

Fonte: Ferrario et al. (2015).

a presença ou não de erupções, a amplitude e a duração destas erupções (HELLIER, 2001, por exemplo).

Novas clássicas são sistemas em que ocorreu apenas uma erupção com amplitude entre 6 a 9 magnitudes, devido à queima termonuclear da matéria acumulada na superfície da anã branca. Já as *novas recorrentes* são semelhantes às novas clássicas, mas possuem mais de uma erupção observada. As *novas-anãs* apresentam erupções de 2 a 5 magnitudes recorrentes em escalas de tempo que variam de dias a semanas. Diferentemente das novas, as erupções das novas-anãs ocorrem devido ao aumento de brilho no disco de acreção. As novas anãs são subdivididas em:

- SU UMa, apresentam erupções normais prolongadas e super erupções com aumento no brilho de $\sim 0,7$ mag em relação à erupção normal;
- Z Cam, apresentam estados intermediários de brilho entre erupção e quiescência, denominados de *standstills*;
- U Gem, para os demais casos.

Outra classe de VCs são as *novalikes*, que não tem erupções observadas. Devido à

alta taxa de transferência de matéria, as *novalikes* possuem discos quase sempre em estado brilhante e com alta viscosidade. Podem ser divididas segundo suas características fotométricas e espectroscópicas em: (i) RW Tri, cujos espectros apresentam poucas linhas de emissão e curvas de luz com pequena variabilidade; (ii) VY Scl, que são sistemas que mostram reduções ocasionais no brilho causadas por uma diminuição temporária da taxa de transferência de matéria da secundária; (iii) UX UMa, cujo espectro apresenta linhas de absorção persistentes e (iv) SW Sex, apresentadas na Seção 1.3 (HELLIER, 2001, por exemplo).

As VCs podem também ser classificadas em magnéticas, quando suas anãs brancas apresentam intensidade do campo magnético suficientemente forte para impedir parcial ou totalmente a formação do disco de acreção, de modo que a acreção na AB ocorre através de uma estrutura cuja geometria é determinada pelo campo magnético.

As VCs que não tem um disco de acreção, mas apenas uma coluna de acreção magnética e cuja AB possui período de rotação (P_{rot}) sincronizado com o P_{orb} são denominadas, polares ou tipo AM Herculis. Os campos magnéticos estimados na superfície da AB são usualmente maiores que 10 MG, podendo atingir mais de 200 MG. Cropper (1990) apresenta uma revisão sobre as polares.

Polares intermediárias (PIs) ou objetos tipo DQ Herculis são outra classe de VCs magnéticas (VCMs). Esses sistemas são identificados pelo assincronismo entre o P_{orb} e o P_{rot} e pela formação de um disco de acreção limitado internamente pelo raio da magnetosfera. O campo magnético das PIs podem ser da ordem de 10^6 G ou até maiores de modo que algumas PIs podem não possuir disco. Patterson (1994) apresenta maiores detalhes sobre estes objetos.

1.2 Acreção magnética

Nas VCMs, a matéria próxima à AB segue as linhas de campo magnético da AB formando uma coluna ou uma cortina de acreção, que é uma estrutura de acreção alongada na direção azimutal em relação ao eixo do campo magnético. Na frente de choque, o plasma transita do estado de baixa temperatura e densidade e velocidade supersônica para o estado de alta temperatura e densidade e velocidade subsônica. A transição entre esses estados separa duas regiões: a região pós-choque (RPC), mais próxima à AB, e a região pré-choque, mais afastada, separada pela frente de choque.

Na RPC, a energia cinética pré-choque é convertida em energia térmica, com temperatura em dezenas de keV, como mostra a Equação 1.5.

$$T = 9,12 \times 10^3 \frac{GM_1}{R_1} \sim 10^9 K, \quad (1.5)$$

sendo R_1 o raio da anã branca.

O resfriamento na RPC ocorre principalmente por *bremsstrahlung*, em raios X e por emissão ciclotrônica no óptico e IV. Uma revisão recente sobre a RPC de VCMs, com ênfase nos modelos de emissão, pode ser encontrada em [Silva \(2013\)](#).

Supõe-se que a física da RPCs seja semelhante em todos os sistemas magnéticos. Para o estudo da acreção por uma AB, [Aizu \(1973\)](#) resolve a dependência da densidade e temperatura com a altura da RPC e também calcula a emissão dessa região, considerando o resfriamento puramente por emissão *bremsstrahlung*. Nesse trabalho seminal, foi também mostrado que a temperatura da RPC é função da massa da AB e que a densidade e a altura da região - e, portanto, sua luminosidade - são determinadas pela taxa de acreção.

1.2.1 Emissão ciclotrônica

A emissão ciclotrônica é uma radiação polarizada gerada por elétrons livres na presença de campo magnético que se movem em trajetória espiral ao longo das linhas de campo magnético. Considerando o movimento das partículas não relativísticas num campo magnético uniforme, a frequência fundamental de emissão ciclotrônica, denominada de frequência de Larmor (ν_L), é dada pela Equação 1.6 ([RYBICKI; LIGHTMAN, 1979](#)).

$$\nu_L = \frac{eB}{2\pi m_e c}, \quad (1.6)$$

sendo e e m_e respectivamente a carga e a massa do elétron, B , o módulo do vetor campo magnético e c , a velocidade da luz.

Para regiões de velocidade semi-relativísticas, a frequência de Larmor é dada pela Equação 1.7:

$$\omega = \frac{neB}{\gamma(1 - \beta_{\parallel}\cos\theta)}, \quad (1.7)$$

onde $\beta_{\parallel}=v/c$, γ o fator de Lorentz e n o número inteiro dos harmônicos.

Um exemplo da emissividade ciclotrônica é mostrada em [Lamb e Masters \(1979\)](#) como um fluxo adimensional, $\phi(z, \theta)$, em função do harmônico, z . A emissividade ciclotrônica é normalizada pelo fluxo de Rayleigh-Jeans. Neste gráfico, nota-se que quanto maior o valor do harmônico, maior seu deslocamento para frequências menores e quanto maior sua frequência, menor a emissividade.

A emissão ciclotrônica é dominante no fluxo óptico das polares, de modo que a medida da polarização circular é alta, cerca de 15%. Nas PIs, como o disco de acreção pode diluir essa radiação, o valor da polarização circular é menor. Por exemplo, no sistema DQ Her, [Stockman et al. \(1992\)](#) mediram $+0,01 \pm 0,01\%$. Comportamento similar pode ser possível nos objetos tipo SW Sex, se comprovado que a acreção de matéria é via campo magnético. Maiores informações são apresentadas na Seção 1.3.3.

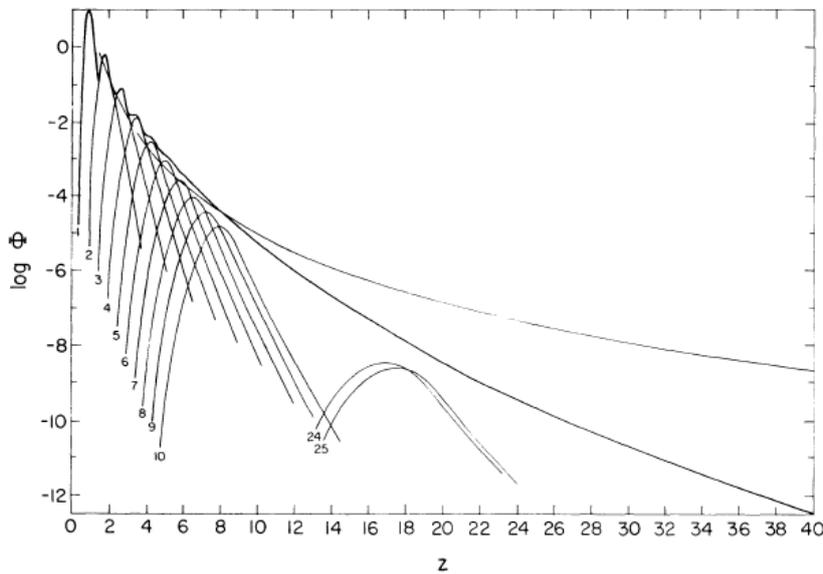


Figura 1.4 - Espectro de emissão ciclotônica.
Fonte: [Lamb e Masters \(1979\)](#).

1.3 Os objetos tipo SW Sex

Nesta seção, apresentamos a subclasse SW Sex a qual pertencem os objetos de estudo deste trabalho. Na Seção 1.3.1 definimos os objetos tipo SW Sex, na Seção 1.3.2 mostramos sua importância no contexto evolutivo e na Seção 1.3.3 apresentamos as características destes objetos destacando o cenário magnético.

1.3.1 Definição

Historicamente, os objetos tipo SW Sex foram identificados devido às distintas propriedades espectroscópicas presentes nos sistemas SW Sex, DW UMa e V1315 Aql (HONEYCUTT et al., 1986). Observacionalmente os objetos tipo SW Sex são definidos por apresentarem as seguintes características, segundo vários autores (SZKODY; PICHE, 1990; THORSTENSEN et al., 1991; HOARD et al., 2013; RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007a; DHILLON et al., 2013, por exemplo), listadas abaixo:

- os espectros apresentam linhas de emissão com pico simples em vez de picos duplos, mesmo nos sistemas eclipsantes, para os quais se espera linhas com pico duplo, resultado de material se aproximando e se afastando na linha de visada simultaneamente;
- os períodos orbitais das SW Sex concentram-se em torno de 3 a 4,5 h, portanto, um pouco acima do *period gap*;
- alto nível de excitação espectral, incluindo emissão na linha He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$;
- diferença de fase entre as velocidades radiais das linhas de Balmer em emissão com relação às efemérides do eclipse e inconsistente com a mancha quente;
- as linhas de emissão de Balmer e He I podem apresentar componentes centrais de absorção em torno da conjunção superior da secundária, como exemplifica a Figura 1.5;
- durante o eclipse, as linhas de emissão de Balmer e He I são menos eclipsadas quando comparadas com o contínuo, implicando que essas linhas podem ser originadas acima do plano orbital.

Em Thorstensen et al. (1991), ser um sistema eclipsante também fazia parte da caracterização dos objetos SW Sex, mas essa característica foi descartada quando

objetos similares, mas não eclipsantes, foram encontrados. Assim o fenômeno SW Sex passou a ser associado as propriedades do sistema que se diferenciam das outras *novallikes* e não a efeitos dependentes da posição do observador (TAYLOR et al., 1999, por exemplo). Nem todos os objetos tipo SW Sex mostram observacionalmente todas as características apresentadas. Além disso, algumas dessas propriedades podem variar no tempo, isto é, alguns objetos apresentam determinadas propriedades em dadas épocas (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007a).

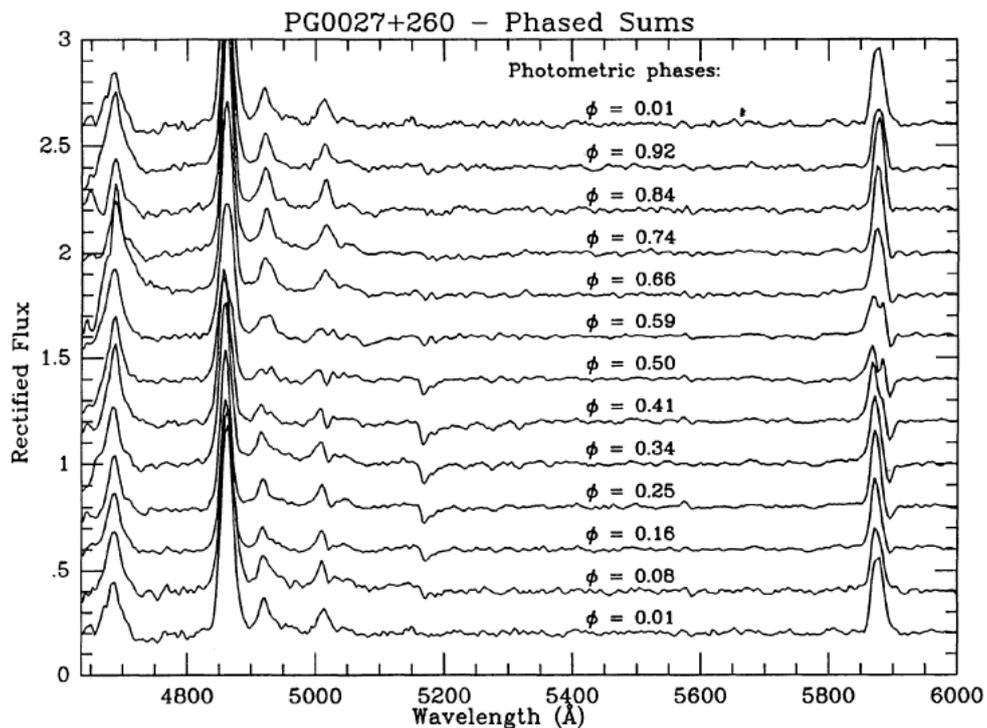


Figura 1.5 - Exemplo das absorções dependentes da fase no espectro do objeto PG0027+260 (SW Sex).

Fonte: Thorstensen et al. (1991).

1.3.2 O fenômeno SW Sex

O número de objetos identificados definitivamente como membro da classe SW Sex listados por Hoard et al. (2013)¹ é trinta, mas existem outros 40 candidatos a objetos tipo SW Sex. Geralmente, estes objetos são encontrados nos levantamentos com excesso de UV, visto que seu contínuo é bastante azul no estado de alto brilho (HOARD et al., 2013; RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007a).

¹Lista de SW Sextantis disponível em <http://www.dwhoard.com/biglist>

Uma característica importante dos objetos tipo SW Sex é possuir o P_{orb} no intervalo de 3 a 4,5 horas, como mostra a Figura 1.6 (esquerda). Ao comparar com a distribuição do número das demais *novalikes* e novas clássicas em função do período orbital, no painel à direita, a metade dos objetos que ocupam este período, são na verdade, pertencentes à subclasse das SW Sex (GANSICKE, 2005; RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007a, por exemplo).

Como as VCs evoluem com o decaimento do período orbital devido à perda do momento angular (seção 1.1.1), os objetos com $P_{orb} \geq 4$ h podem ingressar na fenomenologia das SW Sex antes de entrar no *period gap*. Neste contexto, os objetos tipo SW Sex representam um importante estágio evolutivo na compreensão da evolução das VCs, em particular dos sistemas antes do *period gap* (SCHMIDTOBREICK, 2013, por exemplo).

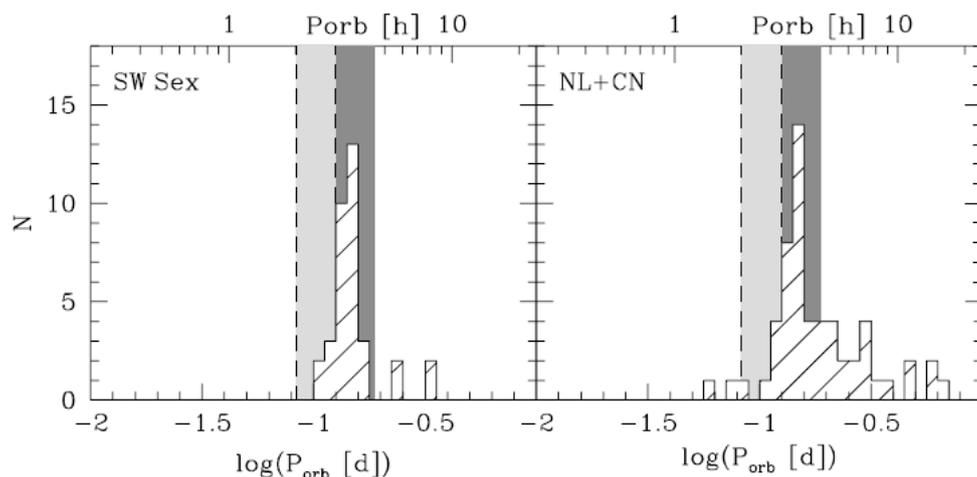


Figura 1.6 - Distribuição do período orbital dos objetos tipo SW Sex, painel à esquerda. No painel à direita, é apresentado as demais *novalikes* e as novas clássicas. Em cinza claro, está representado a região do *period gap* e, em cinza escuro, a região entre 3–4,5 horas.

Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2007a).

1.3.3 O cenário magnético

Para explicar os fenômenos que caracterizam os objetos tipo SW Sex alguns cenários, não necessariamente excludentes, são propostos (HELLIER, 1996; RODRÍGUEZ-GIL et al., 2009; DHILLON et al., 2013, por exemplo):

- vento no disco;

- presença de campo magnético na primária levando à criação de colunas de acreção próximas à anã branca;
- transbordamento do fluxo de matéria da secundária acima do plano orbital na região interna do disco;
- disco geometricamente espesso nas bordas.

Os diferentes cenários apresentados ainda não explicam satisfatoriamente todas as propriedades observadas dos sistemas SW Sex, o que indica o quanto estes objetos são complexos. O primeiro cenário foi proposto por [Honeycutt et al. \(1986\)](#), que sugeriram a presença de vento bipolar no disco de acreção do sistema SW Sex. O perfil das linhas de emissão com pico simples fornece indícios de acreção magnética nos sistemas eclipsantes SW Sex, BT Mon e VZ Scl, similar aos sistemas polares e PIs ([WILLIAMS, 1989](#)). [Hellier e Robinson \(1994\)](#), no entanto, justificaram tais linhas pelo modelo de transbordamento de matéria sobre o disco. [Martínez-Pais et al. \(1999\)](#) descartaram o modelo de transbordamento para explicar o sistema LS Peg, devido a componente na velocidade radial ser incompatível com a inclinação do objeto. [Groot et al. \(2001\)](#) sugeriram que a matéria fora do plano era proveniente do disco, que seria geometricamente espesso nas bordas devido à presença de uma mancha quente larga e estendida verticalmente. Existem outros cenários na literatura e outras versões do cenário magnético, por exemplo: (i) matéria transferida até os polos da AB sincronizada com o período orbital ([CASARES et al., 1996](#)); (ii) ejeção de matéria devido à rápida rotação da AB, denominada de *propeller* ([HORNE, 1999](#)).

O cenário magnético sugere que a matéria proveniente da estrela doadora está fora do plano orbital, devido ao acoplamento com as linhas de campo da magnetosfera. Desse modo, o disco de acreção na parte interna é truncado e a matéria atinge a primária por uma coluna/cortina de acreção, como ilustrado na Figura 1.7 ([RODRÍGUEZ-GIL et al., 2009](#)).

Um importante indício em favor do cenário magnético foi a descoberta da polarização circular em LS Peg ([RODRÍGUEZ-GIL et al., 2001](#)). A existência de polarização circular não-nula e variável pode ser interpretada por emissão ciclotrônica proveniente de uma coluna de acreção, formada devida à presença de um campo magnético na AB.

Outras evidências em favor do cenário magnético para as SW Sex vêm se acumulando, como por exemplo a presença de *flarings*. Os *flarings* são definidos como uma modulação do fluxo de linhas de emissão - He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$, por exemplo - mais rápida

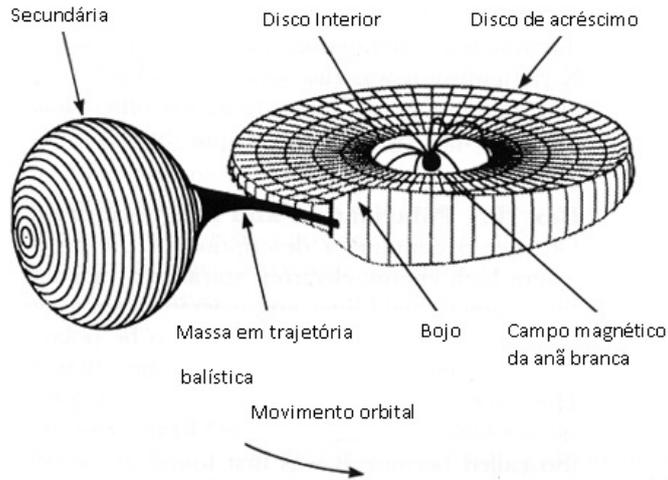


Figura 1.7 - Ilustração da geometria das SW Sex para o cenário magnético.
 Fonte: Adaptado de NASA (2006).

que o período orbital. Alguns sistemas que apresentam *flarings* são: DW UMa (DHILLON et al., 2013); BT Mon (SMITH; DHILLON, 1998), LS Peg (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2001), V533 Her (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2002), RX J1643.7+3402 (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2009), 1H 0204-023 e V380 Oph (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007b). Essa modulação é observada também em objetos do tipo DQ Her, como FO Aqr (MARSH; DUCK, 1996). Em ambas as classes, os *flarings* possuem períodos similares, da ordem de dezenas de minutos. Apesar de uma possível interpretação estar vinculada à presença de um acrecimento magnético, alguns autores consideram que essas modulações nos objetos SW Sex podem ser o resultado do eclipse da emissão da região interna do disco pela borda externa que, sendo irregular, produziria variação do fluxo, por exemplo, Rodríguez-Gil et al. (2007a) e Dhillon et al. (2013).

Um terço das estrelas tipo SW Sex apresentam precessão apsidal (positiva), que é uma precessão de um disco elíptico, e/ou nodal, precessão de um disco inclinado, causando *superhumps* (RODRÍGUEZ-GIL et al., 2007a). *Superhumps* são as modulações de grande amplitude nas curvas de luz, cujos períodos são maiores ou menores que o P_{orb} , a depender do tipo de precessão, Equação 1.8. O disco ao ser perturbado pela força de maré da estrela doadora pode ser forçado a precessionar retrogradamente gerando os *superhumps* negativos ou *infrahumps* (HELLIER, 2001).

$$\frac{1}{P_{bat}} = \frac{1}{P_{orb}} - \frac{1}{P_{prec}}, \quad (1.8)$$

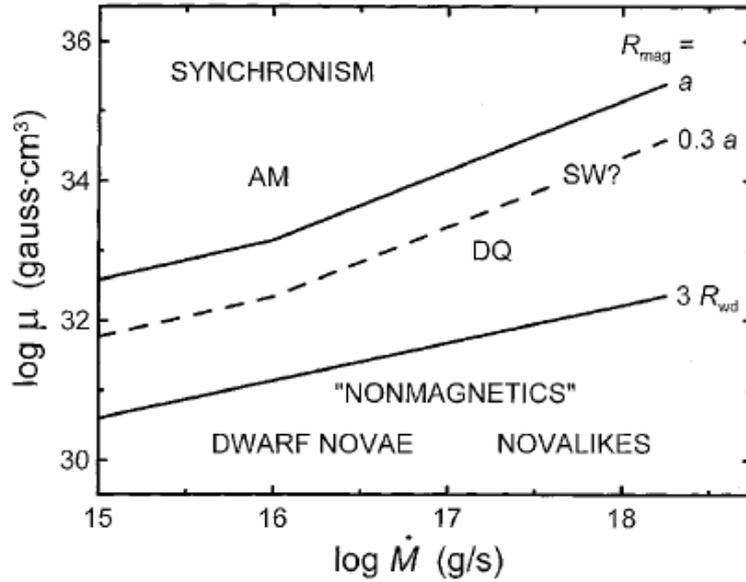


Figura 1.8 - Distribuição das classes das VCs no espaço momento magnético por taxa de perda de massa.

Fonte: Patterson et al. (2002).

onde P_{bat} é o período de batimento, P_{orb} é o período orbital e P_{prec} é o período de precessão.

As curvas de luz das SW Sex são caracterizadas também pela presença de oscilações quase periódicas (OQPs). Alguns exemplos da escala de tempo em objetos SW Sex são: 1000 – 2000 s em V442 Oph e RX J1643.7+3402 e aproximadamente 600 s em HS 0728+6738. Patterson et al. (2002) sugerem que os *superhumps* negativos (infrahumps) e as OQPs possam ser atribuídos à presença de campo magnético na anã branca; já a distorção do disco, que é proposta como origem do *superhumps*, seria também causada pela interação entre o campo magnético da AB e o disco.

Patterson et al. (2002) propõem um cenário onde diferentes valores de campo magnético da AB combinados com diferentes taxas de acreção dariam origem as VCMs (Figura 1.8). Nessa proposta, os objetos SW Sex teriam campos tão altos quanto as polares, mas a alta de taxa de acreção das SW Sex resultaria em magnetosferas bem menores que nas polares e ABs não-sincronizadas. As SW Sex tornariam-se sincronizadas ao evoluírem e diminuiriam sua taxa de perda de massa, se convertendo em polares.

As curvas de velocidade radial dos sistemas tipo SW Sex com baixa inclinação, por exemplo, V795 Her (CASARES et al., 1996), LS Peg (MARTÍNEZ-PAIS et al.,

1999) e V442 Oph (HOARD et al., 2003) apresentam alta velocidade, em torno de $\Delta V \approx 1500 - 2000 \text{ km.s}^{-1}$, caracterizando as curvas de velocidade radial em forma de “S”, como largas, semelhante aos sistemas com alta inclinação. A explicação desse comportamento requer a presença de matéria emissora estendida verticalmente consistente com a estrutura existente nas magnéticas (MARTÍNEZ-PAIS et al., 1999), ou simplesmente matéria localizada fora do plano (HOARD et al., 2013).

Atualmente, seis objetos possuem polarização circular confirmada. Apenas um objeto possui polarização medida consistente com zero. A polarimetria de outros 18 objetos não teve precisão suficiente para confirmar ou não a presença de polarização, Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Lista de objetos SW Sextantis com polarização circular estimada (HOARD et al., 2013).

Objeto	Classificação	Polarizada	V (%)	Banda	Referência
RR Pic	Possível	Sim	+0,17(1)	Azul	Haefner e Metz (1982)
RR Cha	Definitiva	Sim	5 a 10	3500-9000 Å	Rodríguez-Gil e Potter (2003)
V1084 Her	Definitiva	Sim	-0,5 a +0,5	3600-5350 Å	Rodríguez-Gil et al. (2009)
V795 Her	Definitiva	Sim	0,12	U	Rodríguez-Gil et al. (2002)
V533 Her	Definitiva	Sim	-0,38(11) e 0,00(7)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
LS Peg	Definitiva	Sim	0,0 a -0,3	3720-5070 Å	Rodríguez-Gil et al. (2001)
BT Mon	Definitiva	Impreciso	0,10(17), 0,04(6) e 0,21(12)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
1 RXS J0644 34.5+334451	Provável	Não	+0,003(3)	4200-8400 Å	Sing et al. (2007)
V347 Pup	Provável	Impreciso	<0,5	0,34-1,6 $\mu\text{Å}$	Buckley et al. (1990)
UX UMa	Provável	Impreciso	-0,06(4)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
LX Ser	Provável	Impreciso	+0,04(7)	3200-8600 Å	Young et al. (1981)
WY Sge	Possível	Impreciso	+0,32(46)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
AO Psc	Possível	Impreciso	+0,03(3)	5700-9200 Å	Cropper (1986)
PX And	Definitiva	Impreciso	-0,02(9) e +0,06(4)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
VZ Scl	Possível	Impreciso	+0,18(8)	3500-9200 Å	Cropper (1986)
EV Lyn	Possível	Impreciso	< 0, 1 - 0, 4	V	Szkody et al. (2006)
TT Ari	Definitiva	Impreciso	-0,01(2) e -0,02(2)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
OZ Dra	Definitiva	Impreciso	< 0, 24(17)	4000-8000 Å	Wolfe et al. (2003)
DW UMa	Definitiva	Impreciso	+0,06(14)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
SW Sex	Definitiva	Impreciso	+0,05(14) e -0,03(5)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
V442 Oph	Definitiva	Impreciso	+0,01(5) e -0,03(8)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
V380 Oph	Definitiva	Impreciso	+0,12(16)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
V Per	Provável	Impreciso	-0,81(82)	3200-8600 Å	Stockman et al. (1992)
V348 Pup	Definitiva	Impreciso	-0,09(11) e +0,14(13)	5500-8400 Å	Tuohy et al. (1990)
SDSS J210131 .26+105251.5	Possível	Impreciso	< 0, 4	V	Homer et al. (2006)
EX Hya	Possível	Impreciso	-0,02(4) e +0,01(2)	5700-9200 Å	Stockman et al. (1992)

Se confirmada a presença de acreção magnética, os objetos SW Sex não difeririam muito da classe das DQ Her, apresentando, entretanto, um disco de acreção em alto estado de brilho. Isso também geraria outros fenômenos anteriormente citados, como a existência de vento e/ou transbordamento. Na literatura, devido as proprie-

dades observacionais de algumas VCs, muitos candidatos a classe SW Sex (TT Ari, V533 Her, V795 Her, EX Hya, BT Mon, V348 Pup) já são classificados como PIs, interpretados num cenário magnético (PATTERSON et al., 2002).

1.4 Justificativa e objetivos do trabalho

A descoberta de polarização circular em seis objetos do tipo SW Sex (Tabela 1.1) é um forte indício da presença de campo magnético na anã branca controlando o processo de acreção da matéria. Do total de 70 objetos candidatos a classe das SW Sex, o número de sistemas com polarização circular medida não ultrapassa 40%, dos quais 26% apresentam imprecisão, de modo que muitos sistemas estão sem medidas e/ou com incertezas.

Neste sentido, buscamos contribuir para a compreensão do fenômeno SW Sex, medindo a polarização circular e linear de uma amostra composta pelos sistemas: LS Peg; 1H 0204-023; SW Sex; V442 Oph e V380 Oph. Também apresentamos uma análise preliminar da busca de períodos no fluxo e na polarização desses sistemas.

Como a essência da pesquisa é puramente observacional, apresentamos no Capítulo 2, o método aplicado na determinação da polarização e da fotometria dos objetos de ciência. No Capítulo 3, mostramos os resultados do sistema LS Peg, escolhido como protótipo do estudo, por ter polarização circular confirmada. E no Capítulo 4, apresentamos as curvas de luz e de polarização dos outros objetos tipo SW Sex, cujo término da análise é uma das perspectivas deste trabalho, as quais são apresentadas no Capítulo 5, juntamente com as conclusões.

2 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta em linhas gerais o método usado na determinação da fotometria e da polarização linear e circular dos objetos SW Sex estudados. Na Seção 2.1, apresentamos o procedimento envolvido na obtenção dos dados. Na Seção 2.2, descrevemos o processo de correção aplicado às imagens brutas e nas Seções 2.3 e 2.4, abordamos os procedimentos para obter a polarimetria e fotometria diferencial.

2.1 Aquisição de dados

Os dados observacionais dos objetos tipo SW Sex foram coletados usando o telescópio Perkin-Elmer de 1,6 m do Observatório do Pico dos Dias (OPD/LNA)¹ acompanhado da gaveta polarimétrica instalada no foco *Cassegrain*, com o objetivo de obtermos tanto polarimetria quanto fotometria.

A gaveta polarimétrica é composta por três componentes: a lâmina retardadora, que no caso de medidas de polarização circular é uma lâmina de quarto de onda ($\lambda/4$); o analisador, um prisma Savart de calcita, o qual decompõe o feixe em ordinário e extraordinário; e uma roda de filtros (B, V, R, I). Para a aquisição dos dados, foram realizadas várias sequências de imagens com a posição da lâmina retardadora acrescida sucessivamente de $22,5^\circ$ em relação à posição anterior. A Figura 2.1 mostra a gaveta polarimétrica e indica os principais componentes citados (MAGALHÃES et al., 1996).

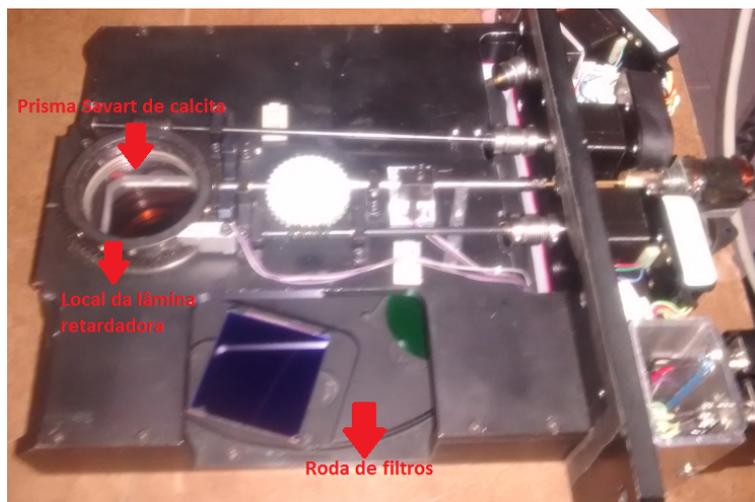


Figura 2.1 - Gaveta polarimétrica fotografada no OPD/LNA em 28 de agosto de 2015.

¹O OPD é operado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – <http://www.lna.br/opd/opd.html>

A Tabela 2.1 descreve as observações realizadas dos objetos tipo SW Sex. Os dados foram coletados nas bandas V e R devido ao maior brilho dos objetos nestas bandas e também à maior eficiência do detector nesses comprimentos de onda. As observações das estrelas padrões são descritas na seção 2.3.2. Os observadores foram Cláudia V. Rodrigues, Rafael R. Amorim, Karleyne M. G. Silva e Deonísio Cieslinski para as missões no ano de 2010, já as missões de 2014 foram realizadas por Matheus S. Palhares e a autora.

Tabela 2.1 - Descrição das observações dos objetos SW Sex realizadas no OPD.

Objetos	Data	Filtro	t_{exp} (s)	ΔT (h)	Número de imagens	Detector
LS Peg	06/10/2010	V	0.9	2,26	384	IKON 1
	12/10/2010	R	5	2,35	362	IKON 1
1H 0204-023	05/10/2010	R	60	1,34	62	IKON 1
	06/10/2010	V	10	3,17	320	IKON 1
	11/10/2010	V	30	1,94	128	IKON 1
	12/10/2010	R	30	1,94	160	IKON 1
SW Sex	29/03/2014	R	40	3,29	208	IKON 2
V442 Oph	29/03/2014	R	20	1,44	141	IKON 2
	20/07/2014	V	30	2,62	192	IKON 2
V380 Oph	19/07/2014	V	40	2,75	160	IKON 2

Legenda:

t_{exp} – Tempo de exposição de cada imagem;

ΔT – Tempo de duração da observação;

IKON 1 – Andor iKON-L936-BV-SN:9867;

IKON 2 – Andor iKON-L936-BR-DD- SN:13739.

Os detectores utilizados são do modelo fino e iluminados por trás, as principais características são listadas a seguir e maiores informações podem ser encontradas em <http://www.lna.br/opd/instrum/ccd/detccd.html>.

Andor iKON-L936-BV de número serial 9867, o detector possui 2048 x 2048 pixels e $13,5 \times 13,5$ microns cada pixel. Em 1 MHz e *preamp* x4, o ganho é igual a $1 e^-/ADU$ e o ruído de leitura, $6,3 e^-$ RMS.

Andor iKON-L936-BR-DD-número serial 13739, também apresenta 2048 x 2048 pixels e pixels $13,5 \times 13,5$ microns. No modo 1 MHz e *preamp* x4, o ganho é $1 e^-/ADU$ e o ruído de leitura é $6,0 e^-$ RMS.

2.2 Correções das imagens

A redução dos dados segue os mesmos procedimentos básicos envolvidos na redução fotométrica com a câmera CCD (*charge-couple device*). Ou seja, inicialmente são realizadas as correções devido às assinaturas do detector como *bias*, *flat-field* e corrente de escuro. Devido ao resfriamento da CCD e ao baixo tempo das exposições, a corrente de escuro não foi corrigida, logo o procedimento é descrito segundo a Equação 2.1:

$$Imagens\ reduzidas = \frac{Imagens\ brutas - \langle master\ bias \rangle}{\langle master\ flat\ normalizado \rangle - \langle master\ bias \rangle}, \quad (2.1)$$

sendo $\langle master\ bias \rangle$ e $\langle master\ flat\ normalizado \rangle$ imagens combinadas pela média das imagens individuais.

As imagens de *bias* são usadas para correção do ruído de leitura do detector e incluem o nível eletrônico correspondente à contagem zero, denominado nível de pedestal. São coletadas usando o obturador da câmera fechado e com tempo de exposições curtos, em torno de 0,1 segundos. O *master bias* mostrado na Figura 2.2 é uma média de todas as imagens de *bias* da missão, sendo calculada com procedimentos de rejeição para valores distantes do resultado médio por 3 vezes o valor do desvio padrão. Esta imagem possui contagens médias de 2209 ADUs com desvio padrão de 0,5 ADUs, as estruturas possuem amplitude média de aproximadamente 1,0 ADUs.

As imagens de *flat-field* fornecem a sensibilidade pixel a pixel da CCD e registram também a não uniformidade da iluminação do detector. Estas imagens são obtidas de uma tela branca iluminada por uma lâmpada incandescente ou do céu durante o crepúsculo. A principal vantagem do *flat* de céu é que pode, a princípio, produzir *master flats* mais uniformes que o de uma tela iluminada por uma lâmpada. E a forma do feixe proveniente do céu pode ser considerada como idêntica à forma dos feixes das imagens noturnas. Porém, a obtenção dos *flats* de céu demanda variação rápida do tempo de exposição das imagens e normalmente se consegue um menor número de fótons (no total das imagens) que no caso de *flats* de cúpula, resultando

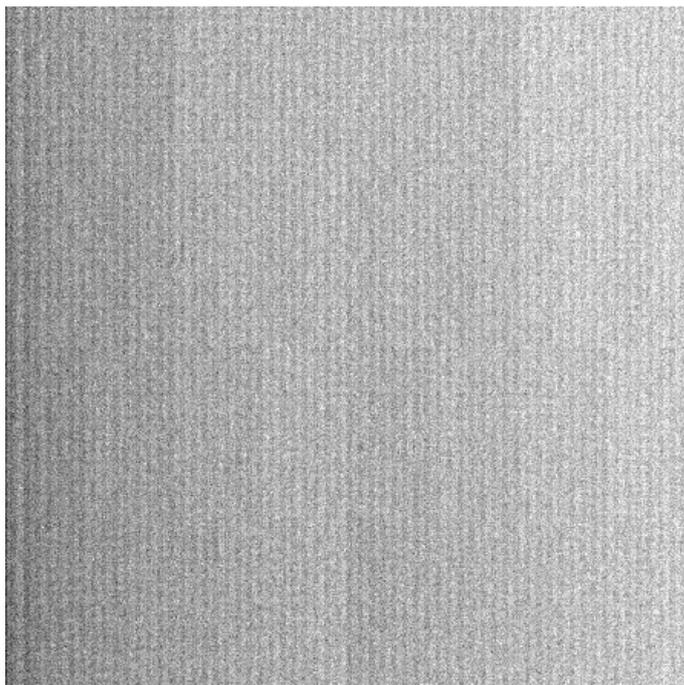


Figura 2.2 - Imagem do *master bias* da missão de julho de 2014.

em uma menor razão sinal-ruído nos *flats* de céu. As imagens de *flats* para os objetos estudados foram obtidas pela iluminação por lâmpada. As imagens de *flat-field* também são diferentes entre os distintos filtros, como mostra a Figura 2.3, e por esta razão são combinadas por filtro para produzir as imagens de *master flat*.

Devido à presença de uma diminuição na iluminação nas bordas das imagens (efeito denominado de *vignetting*), a normalização das imagens de *flat-field* é realizada dividindo as imagens de *master flat* pelo valor médio da região central. Assim, obtemos as imagens *master flat normalizado*, que são a média normalizada de todas as imagens de *flat-field* da missão e por filtro. Após este procedimento é subtraído o *master bias*.

Na missão de março de 2014, realizamos uma série de imagens de *flat-field* para cada posição da lâmina com o objetivo de verificar se o padrão de iluminação é dependente da posição da lâmina. Quantificando a diferença nos resultados da polarimetria nas SW Sex e fotometria diferencial de estrelas de campo fracas, este procedimento não contribuiu para redução dos erros nos resultados e por esta razão foi desconsiderado do procedimento da redução. Detalhes destes testes são discutidos no Apêndice A.

As correções apresentadas fornecem quantitativamente menores erros na polarização. Por exemplo, utilizando apenas correção de *bias*, o valor da polarização linear para

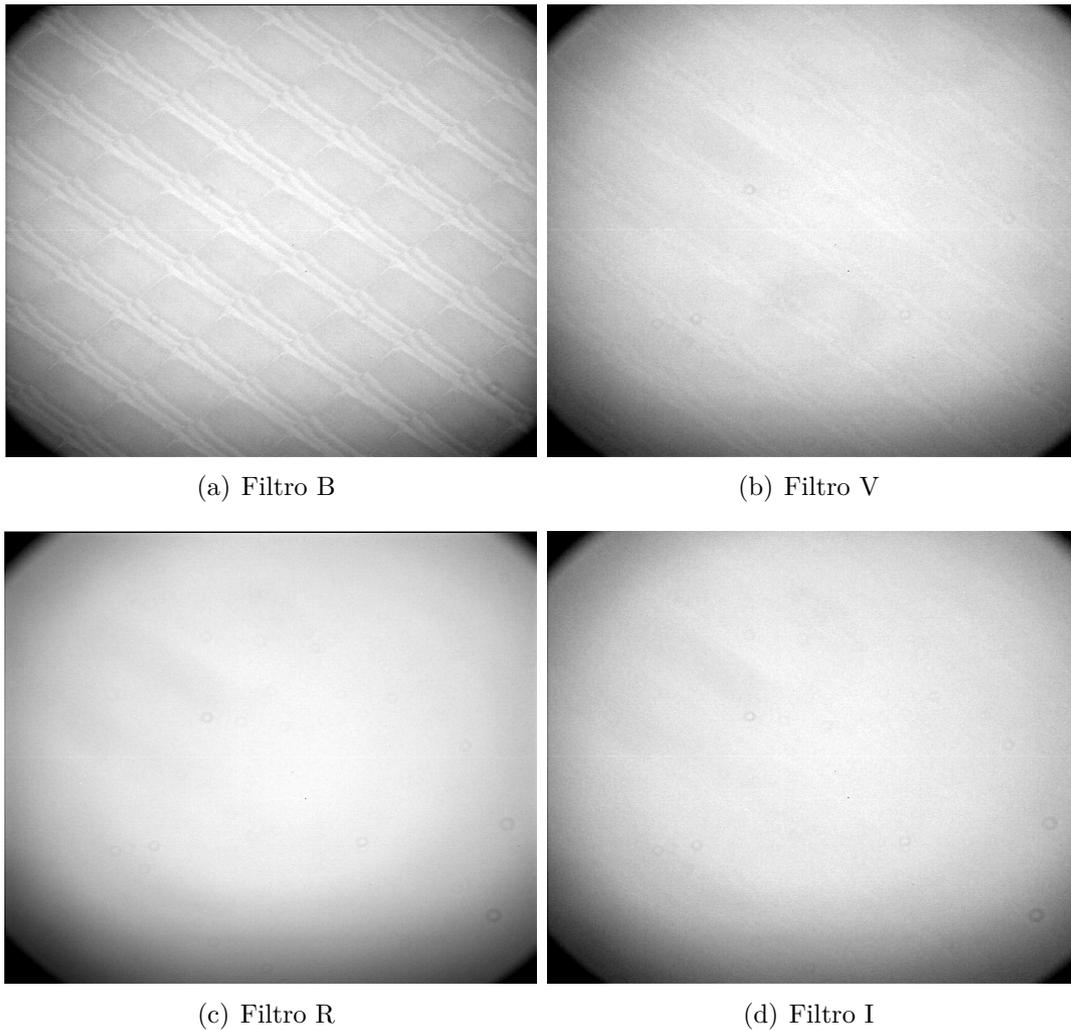


Figura 2.3 - Imagens de *flat-field* por filtro da missão de julho de 2014 usadas nos objetos de ciência e nas estrelas padrões.

a estrela padrão BD+144922 foi igual a $6,254 \pm 0,199\%$, incluindo a correção por *flat-field* o resultado encontrado foi $6,337 \pm 0,115\%$.

2.3 Polarimetria

A polarização de um feixe de radiação eletromagnética está relacionada com a direção preferencial do vetor campo elétrico e pode ser de dois tipos: (i) polarização linear, quando o campo elétrico é orientado preferencialmente numa única direção e (ii) polarização circular, o vetor do campo elétrico rotaciona percorrendo um círculo na direção perpendicular à propagação. A polarização da luz é descrita pelo vetor de Stokes, S na Equação 2.2 (CLARKE, 2010; COLLETT, 2005, por exemplo).

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

sendo I a intensidade total, Q e U intensidades relacionadas à polarização linear e V é a intensidade da polarização circular.

Os parâmetros de Stokes de um feixe polarizado podem ser medidos quando o feixe de luz passa sequencialmente por dois elementos ópticos: (i) as lâminas retardadoras, que podem ser do tipo $\lambda/2$ para medidas de polarização linear e $\lambda/4$ para circular; (ii) o analisador, que na gaveta do OPD pode ser o prisma de Savart ou o polaróide (que são materiais birrefringentes). A ordem destes elementos é mostrada no esquema da Figura 2.4, que deve ser seguida para obtermos a modulação da intensidade (ou fluxo) em uma sequência de imagens com a lâmina retardadora em diferentes posições. Esta modulação permite-nos determinar a polarização da fonte de luz. Esse procedimento será detalhado a seguir.

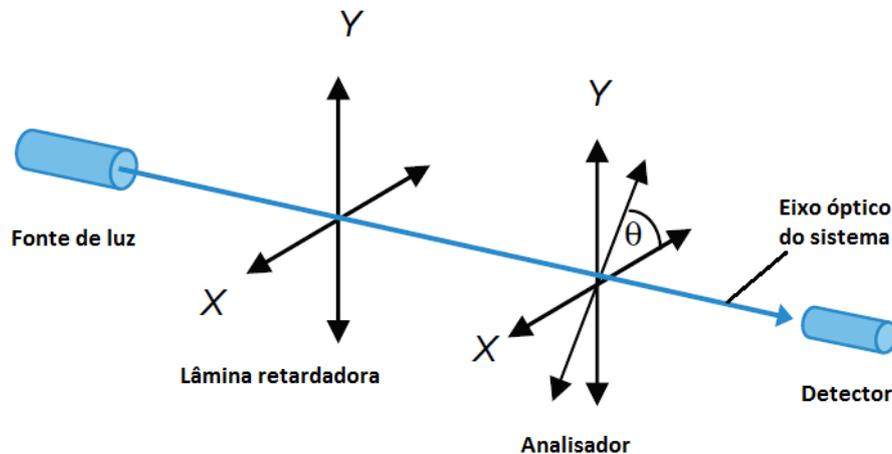


Figura 2.4 - Ilustração dos componentes ópticos presentes para a polarimetria.
Fonte: Collett (2005).

Os parâmetros de Stokes para o feixe emergente são calculados aplicando as matrizes de transformação de Muller para cada elemento óptico, de acordo com a Equação 2.3:

$$\begin{pmatrix} I_{o,e} \\ Q_{o,e} \\ U_{o,e} \\ V_{o,e} \end{pmatrix} = M_{o,e} \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

sendo $S_{o,e}$ e S os parâmetros de Stokes, respectivamente, dos feixes emergente e incidente, M_1 a matriz para a lâmina retardadora e $M_{o,e}$, as matrizes para o analisador. Os índices o e e referem-se aos feixes ordinário e extraordinário.

Considerando a lâmina retardadora perfeita, a matriz de Muller é dada pela Equação 2.4, sendo ψ o ângulo de rotação (que na gaveta polarimétrica do OPD assume 16 posições) e τ a retardância que é 180° no deslocamento de fase de $\lambda/2$ e 90° em $\lambda/4$.

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G + H \cos 4\psi & H \sin 4\psi & -\sin \tau \sin 2\psi \\ 0 & H \sin 4\psi & G - H \cos 4\psi & \sin \tau \cos 2\psi \\ 0 & \sin \tau \sin 2\psi & -\sin \tau \cos 2\psi & \cos \tau \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

sendo $G = \frac{1}{2} (1 + \cos \tau)$ e $H = \frac{1}{2} (1 - \cos \tau)$.

A matriz de Muller para o analisador perfeito é dada na Equação 2.5:

$$M_{o,e} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \frac{1}{2} \sin 4\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \frac{1}{2} \sin 4\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

sendo θ o ângulo do eixo óptico do prisma Savart de calcita, representado na Figura 2.4. Para o feixe ordinário, θ é igual a 0° e para o feixe extraordinário, θ é igual a 90° .

A polarização linear é medida em função dos parâmetros observáveis Q e U , Equação 2.6:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (2.6)$$

O ângulo de polarização linear, PA , também é determinado por Q e U , Equação 2.7:

$$PA = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q}. \quad (2.7)$$

2.3.1 Cálculo da polarização

A redução dos dados foi realizada utilizando pacotes do IRAF² (*Image Reduction and Analysis Facility*) em conjunto com rotinas do PCCDPACK (PEREYRA, 2000), entre outras desenvolvidas pelo grupo de polarimetria do INPE.

As imagens polarimétricas observadas apresentam as estrelas duplicadas devido à separação dos feixes em ordinário e em extraordinário como mostra a Figura 2.5. As expressões das contagens nos feixes ordinário (I_o) e extraordinário (I_e), resultado da Equação 2.3, em função dos parâmetros Q, U e V da radiação incidente no instrumento usando a lâmina de quarto-de-onda na instrumentação do OPD, são dadas pela Equação 2.8. Maiores informações podem ser encontradas em Rodrigues et al. (1998).

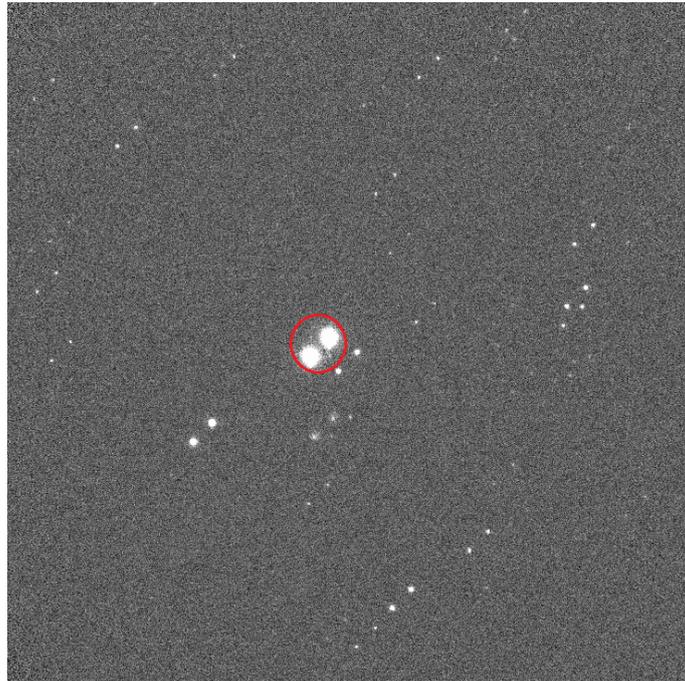


Figura 2.5 - Imagem da estrela padrão polarizada HD 155197, dentro do círculo vermelho, indicando a decomposição dos feixes em ordinário e extraordinário.

²O IRAF é distribuído pelo NOAO- *National Optical Astronomy Observatories* operado pela *Association of Universities for Research in Astronomy* (TODY, 1986; TODY, 1993).

$$2I_{o,e}(\psi_i) = I \pm Q \cos^2 2\psi_i \pm U \sin 2\psi_i \cos 2\psi_i \mp V \sin 2\psi_i, \quad (2.8)$$

onde os parâmetros de Stokes I, Q, U e V representam a radiação incidente na gaveta polarimétrica e ψ_i o ângulo da lâmina retardadora de $\lambda/4$ da i -ésima imagem.

A Equação 2.8 mostra que as intensidades (ou fluxos) dos feixes ordinário e extraordinário resultantes de uma fonte polarizada são moduladas pela variação da posição da lâmina retardadora. Uma maneira apropriada de descrever essa modulação é através da quantidade X_i (Equação 2.9). A partir dela é possível demonstrar que a polarização proveniente do fundo de céu é automaticamente excluída pelo método (SERKOWSKI, 1974). Um exemplo da modulação é mostrada na Figura 2.6 para a estrela padrão polarizada HD 155197 da missão de julho de 2014.

$$X_i = \frac{I_{e,i} - I_{o,i}}{I_{e,i} + I_{o,i}}, \quad (2.9)$$

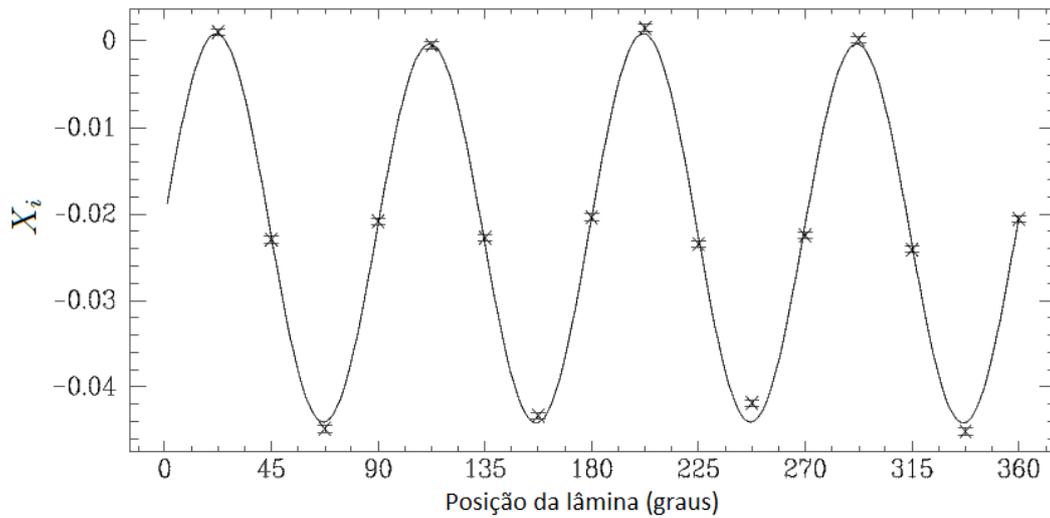


Figura 2.6 - Modulação de X_i em função do ângulo de posição da lâmina para a estrela padrão polarizada HD 155197. A polarização medida é $4,437 \pm 0,039\%$, que é a amplitude de modulação.

O cálculo da polarização para as estrelas padrões polarizadas e não polarizadas é realizado utilizando a rotina *PADRAO_POL*. As séries temporais da fotometria diferencial e polarimetria são obtidas pelo uso da rotina *TIME_POL*. Ambas rotinas foram desenvolvidas pelo nosso grupo. Estes programas automatizadores utilizam

sub-rotinas do IRAF como PHOT do pacote APPHOT para a realização da fotometria de abertura, que será discutido na Seção 2.4.1.

Para o cálculo da polarização, ambas as rotinas usam a rotina PCCDGEN. Nela é permitido escolhermos o número de imagens a serem usadas para obtermos um ponto de polarização, para $\lambda/4$ o mínimo é oito. Na rotina *TIME_POL* calculamos simultaneamente as séries temporais tanto de polarimetria quanto de fotometria diferencial, que podem ser apresentados em função do tempo ou em função da fase de uma dada efeméride.

A redução dos dados para os objetos tipo SW Sex foi realizada com objetivo de reduzir ao máximo os erros associados, pois esperamos valores baixos de polarização de acordo com os resultados disponíveis na literatura e mostrados na Tabela 1.1. Assim, diversos testes relativos à escolha do procedimento de redução foram executados. Um ponto de polarização circular pode ser obtido usando 8 ou 16 imagens, reduzimos os dados com ambas as possibilidades e optamos pelo número mínimo, pois como a polarização pode ser variável dentro de uma medida de polarização, o erro torna-se maior ao aumentar o tempo utilizado para fazer a medida, já que o algoritmo considera parâmetros de Stokes invariáveis no tempo. Além disso, a redução foi feita obtendo uma sequência de pontos de polarização que combinam imagens com redundância, em que o primeiro ponto é formado pelas imagens de 1 a 8, o segundo ponto pelas imagens de 2 a 9, e assim por diante.

Outros procedimentos relativos à redução de dados são a normalização do fluxo ordinário e extraordinário, apresentada na Seção 2.3.1.1, a correção do viés da polarização linear, Seção 2.3.1.2 e o cálculo do zero da lâmina na Seção 2.3.1.3.

2.3.1.1 Normalização do fluxo ordinário e extraordinário

A razão entre o somatório dos fluxos do feixe ordinário em todas as posições da lâmina de uma medida e o somatório equivalente do feixe extraordinário é função dos parâmetros de Stokes (no caso de lâmina de quarto-de-onda). Foi implementado na rotina PCCDGEN um algoritmo iterativo que utiliza essa informação para normalizar os fluxos dos feixes ordinário e extraordinário.

A implementação dessa normalização permitiu que resultados mais acurados da polarização circular fossem obtidos. Para o sistema SW Sex, por exemplo, sem a normalização, a média do erro da polarização, $\langle\sigma_V\rangle$, foi igual a 0,38% e com a normalização esse valor diminuiu para 0,31%.

2.3.1.2 Correção do viés da polarização linear

A polarização linear é definida como a soma quadrática de Q e U (Equação 2.6), portanto, deve sempre fornecer valores positivos. Desse modo, os erros associados aos parâmetros Q e U produzem um viés na medida de polarização, e valores da polarização maiores que o real são medidos. Um trabalho seminal na estimativa desse viés é encontrado em [Simmons e Stewart \(1985\)](#).

Para determinar a polarização verdadeira (P_0) dentro do intervalo $[P_0, P_0 + dP_0]$, [Vaillancourt \(2006\)](#) por abordagem Bayesiana calcula a probabilidade que uma única medida de P/σ seja obtida no intervalo de polarização verdadeira, sendo $P_0/\sigma \in [P_i/\sigma, P_s/\sigma]$, onde P_i e P_s são polarização inferior e polarização superior, respectivamente. Assim, uma região de confiança é estabelecida, como mostra a Figura 2.7. Usamos as curvas deste gráfico correspondentes a 1σ de confiança para calcular a correção da polarização linear e os erros inferiores e superiores nos dados dos objetos tipo SW Sex.

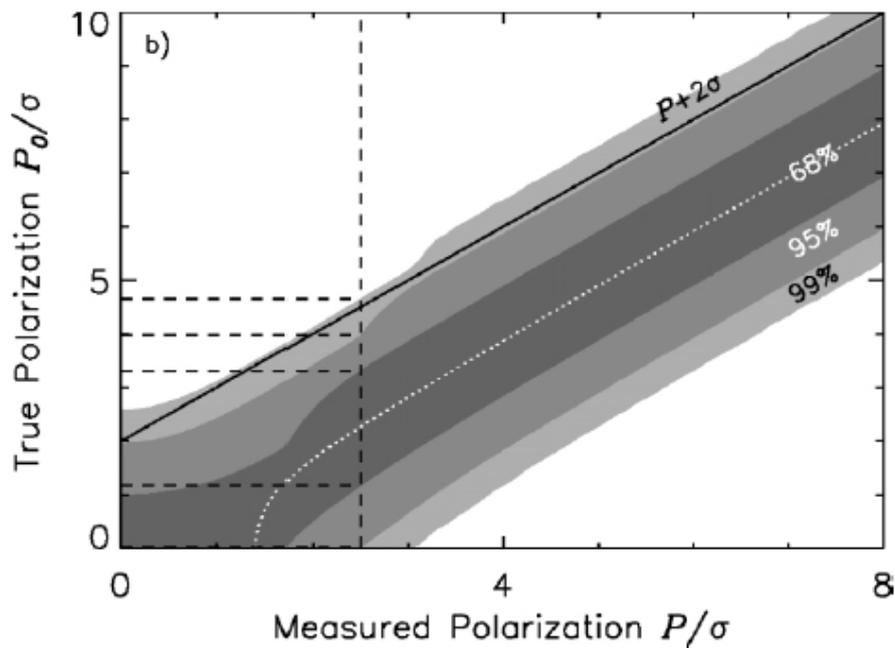


Figura 2.7 - Limites de confiança para correção do viés da polarização linear.

Fonte: [Vaillancourt \(2006\)](#).

2.3.1.3 Cálculo do zero da lâmina

A primeira posição da lâmina de $\lambda/4$ não corresponde necessariamente ao alinhamento entre seu eixo óptico e o eixo óptico do analisador, ou seja ψ_i igual a 0. Em particular, o ângulo entre esses dois eixos não é conhecido. Porém, o cálculo da polarização circular necessita desse valor que deve portanto ser determinado durante a redução. Ao procedimento na redução dos dados em que determinamos esse ângulo denominamos de cálculo do zero da lâmina. Detalhes podem ser encontrados em [Rodrigues et al. \(1998\)](#).

A determinação do zero da lâmina é feita reduzindo os dados dos objetos com polarização não-nula para valores de zero da lâmina entre 0° e 90° , com passos de 1° . O valor final do zero é aquele que produz o menor RMS na modulação de X_i . Neste processo utilizamos estrelas padrões polarizadas e as eventuais polares observadas durante a missão com alta polarização. As etapas realizadas foram:

- Preparação dos arquivos necessários para o cálculo da polarização utilizando a rotina *PADRAO_POL*;
- Para cada conjunto de dados das estrelas padrões foi calculado a polarização com diferentes valores da lâmina e determinado o valor de zero da lâmina, que fornece o menor RMS usando a rotina *ZEROFIND_INPE*;
- Determinação do valor do zero da lâmina, a partir da média dos valores individuais ponderados com o RMS de cada medida.

O zero da lâmina encontrado para a missão de outubro de 2010 foi $12,0 \pm 0,8^\circ$. Na missão de março de 2014, o ângulo zero estimado foi $15,0 \pm 1,9^\circ$ e em julho, $20,7 \pm 1,4^\circ$.

2.3.2 Calibração polarimétrica

Nesta seção, apresentamos os resultados da polarização linear e circular das estrelas padrões polarizadas e não-polarizadas, as quais permitem corrigir o ângulo de posição da polarização linear (PA) para o sistema equatorial e verificar a existência de polarização instrumental que pode ser introduzida nas medidas dos objetos de ciência.

A correção do ângulo PA para o sistema equatorial celeste é realizada com as medidas das estrelas padrões polarizadas, e em função do filtro. Essa correção é obtida pela

diferença entre os ângulos observados, PA_m , e os ângulos encontrados na literatura, PA_l , ou seja, $\Delta PA = PA_m - PA_l$. A Tabela 2.2 mostra os valores disponíveis na literatura para todas as estrelas padrões e a Tabela 2.3, os nossos resultados medidos da polarização linear (P), da polarização circular (V), PA_m e os erros associados; σ_P , σ_V e σ_{PA} .

O σ_{PA} é dada por (SCHMIDT et al., 1992, por exemplo):

$$\sigma_{PA}(\circ) \approx 28,65 \frac{\sigma_P}{P}. \quad (2.10)$$

sendo o valor de 28,65 resultado da transformação de radianos para graus.

O ângulo de correção para cada filtro foi calculado pela média dos ΔPA ponderados pelos seus erros. A Tabela 2.4 apresenta o valor de correção (PA_{corr}), utilizado para cada missão.

Na Tabela 2.5, apresentamos os valores medidos da polarização linear e circular das estrelas padrões não-polarizadas. Os resultados mostram que P e V não são nulos, no entanto como mostra a Tabela 2.2, os valores disponíveis na literatura também não são. Em alguns casos, é possível que essas estrelas classificadas como não-polarizadas linearmente sejam polarizadas, como mostra o recente trabalho de Słowikowska et al. (2016), que apresenta para o objeto HD 14069, por exemplo, valores de P iguais a $0,25 \pm 0,18\%$, no filtro V e $0,30 \pm 0,20\%$, no filtro R. Estes valores são maiores que o de Schmidt et al. (1992) e os que encontramos em nos nossos dados, Tabela 2.6.

Assim, para verificar a presença ou não de polarização espúria gerada pelo instrumento utilizado, calculamos por filtro, a média ponderada pelos erros das medidas de polarização linear, $\langle P_{pond} \rangle$, e circular, $\langle V_{pond} \rangle$. Para a polarização linear, a Tabela 2.6 mostra que os valores de $\langle P_{pond} \rangle$ variam em cada missão. Os únicos resultados consistentes com zero estão nos filtros R e I, em julho de 2014. Além disso, analisando os ângulos de polarização notamos que algumas medidas não são aleatórias, HD 12021, por exemplo, o que pode corroborar a existência de polarização linear intrínseca.

A Tabela 2.7 apresenta por filtro $\langle V_{pond} \rangle$ para cada padrão não-polarizada. Em março de 2014, nas bandas V e R, a polarização circular é consistente com zero. Mas nos demais casos os valores não são nulos, mas são pequenos, da ordem de 0,2%. Comparando os dados por objeto e por filtro dentro de cada missão, os resultados não demonstram sinal de coerência.

Um efeito que pode causar uma medida de polarização circular no instrumento é o *crosstalk*, definido como uma interferência na medida da polarização circular devido aos parâmetros da polarização linear, ou vice-versa. Definindo a matriz de Muller que representa o *crosstalk* como ε , o valor da polarização circular alterada pelo *crosstalk* é dado pela Equação 2.11 (SEMEL et al., 1993).

$$V = \varepsilon_{41}I + (1 + \varepsilon_{44})V + \varepsilon_{42}Q + \varepsilon_{43}U. \quad (2.11)$$

Optamos por não corrigir nas medidas de polarização linear e circular o valor encontrado nas estrelas padrões não-polarizadas, que podia ser associado à presença de polarização espúria no instrumento. Devido às incertezas apresentadas, que são associadas as próprias padrões não-polarizadas, verificamos que os resultados não são confiáveis. Deste modo, usaremos as medidas de polarização linear e circular das estrelas de campo de cada objeto do tipo SW Sex.

Tabela 2.2 - Polarização linear das estrelas padrões na literatura.

Objetos	Tipo	Filtro	P (%)	σ_P (%)	PA (°)	σ_{PA} (°)	Referência
HD 155197	p	V	4,320	0,23	102,84	0,15	Schmidt et al. (1992)
		R	4,274	0,27	102,88	0,18	
		I	3,906	0,41	103,18	0,30	
HD 23512	p	V	2,26	0,01	29,9	0,30	Tinbergen (1975)
		R	2,29	0,02	29,6	0,20	
HD 298383	p	V	5,23	0,009	148,6	0,05	Tinbergen (1975)
HD 110984	p	V	6,46	0,014	103,1	0,06	Tinbergen (1975)
HD 126593	p	V	5,02	0,012	75,2	0,07	Tinbergen (1975)
HD 111579	p	V	6,46	0,014	103,1	0,06	Tinbergen (1975)
BD 144922	p	V	6,150	0,02	49,62	0,08	Fossati et al. (2007)
		R	5,770	0,07	49,90	0,24	
BD 125133	p	I	3,570	0,09	143,99	0,27	Fossati et al. (2007)
HD 12021	np	V	0,078	0,018	160,19	0,61	Schmidt et al. (1992)
HD 14069	np	V	0,022	0,019	156,57	0,74	Schmidt et al. (1992)
HD 98161	np	B	0,017	0,006	-	-	Tinbergen (1975)
HD 94851	np	B	0,057	0,018	-	-	Tinbergen (1975)
WD 1620-391	np	V	0,014	0,010	157,5	0,26	Fossati et al. (2007)
WD 2007-303	np	V	0,051	0,020	177,20	0,13	Fossati et al. (2007)

Legenda:

p – Estrela padrão polarizada;

np – Estrela padrão não polarizada;

P – Polarização linear;

σ_P – Erro da polarização linear;

PA – Ângulo da polarização linear;

σ_{PA} – Erro do ângulo de polarização linear.

Tabela 2.3 - Nossas medidas das estrelas padrões polarizadas.

Missões	Dia	Objetos	Filtro	t_{exp} (s)	P (%)	σ_P (%)	V (%)	σ_V (%)	PA_m (°)	σ_{PA} (°)	ΔPA (°)
Outubro de 2010	06	HD 155197		2,5	4,377	0,072	0,030	0,042	25,9	0,5	76,94
	09	HD 155197		10	4,440	0,073	0,087	0,049	17,5	0,5	85,34
	10	HD 155197		4	4,460	0,060	0,073	0,041	17,4	0,4	85,44
	11	HD 155197		4	4,456	0,077	0,112	0,052	16,9	0,5	85,94
	12	HD 155197	V	4	4,480	0,081	0,051	0,056	13,4	0,5	89,44
	13	HD 155197		1	4,401	0,049	0,028	0,041	6,7	0,3	96,14
	11	HD 23512		2	2,289	0,068	-0,030	0,036	119,2	0,9	90,70
	12	HD 23512		0,3	2,166	0,090	0,027	0,053	115,1	1,2	94,80
	13	HD 23512		0,5	2,055	0,079	0,125	0,053	113,3	1,1	96,60
	08	HD 155196		4	4,463	0,062	0,081	0,042	17,9	0,4	84,98
	10	HD 155196		3	4,375	0,062	0,062	0,043	16,0	0,4	86,88
	11	HD 155196		2	4,530	0,048	0,069	0,033	16,0	0,3	86,88
	12	HD 155196	R	8	5,193	0,224	0,122	0,170	176,8	0,70	91,48
13	HD 155196		1	4,481	0,078	0,083	0,065	6,3	0,5	96,58	
11	HD 23512		1	2,442	0,072	0,002	0,040	118,9	0,8	90,70	
Março de 2014	31	HD 126593	B	1	3,892	0,121	-0,154	0,098	82,0	0,9	-6,8
	31	HD 111579		0,5	5,543	0,178	-0,176	0,114	110,1	0,9	-7,0
	28	HD 110984		3	5,133	0,141	-0,198	0,118	97,6	0,8	-6,0
	29	HD 289393	V	2	5,046	0,362	0,209	0,196	149,1	2,1	-0,5
	31	HD 126593		1	5,116	0,142	-0,247	0,095	72,5	0,8	2,7
	31	HD 111579		0,5	6,565	0,114	-0,295	0,086	101,6	0,5	1,5
Julho de 2014	29	HD 289393		2	5,219	0,071	0,124	0,041	153,7	0,4	-5,1
	31	HD 111579	R	0,5	5,461	0,292	-0,120	0,224	103,8	1,5	-0,7
	19	HD 155197		1	4,512	0,154	-0,174	0,105	106,5	0,9	-3,66
	20	HD 155197		1	4,632	0,067	-0,064	0,041	104,2	0,4	-1,36
	21	HD 155197	V	1	4,707	0,251	0,011	0,171	104,5	1,5	-1,66
	19	BD 144922		1	6,356	0,106	-0,033	0,054	49,5	0,5	0,12
	20	BD 144922		1	6,101	0,121	0,093	0,061	48,8	0,6	0,82
	21	BD 144922		1	6,143	0,100	0,104	0,050	45,0	0,7	4,62
	22	HD 155197	R	1	4,537	0,039	-0,060	0,033	94,5	0,3	8,138
	22	BD 144922		1	5,880	0,241	0,021	0,121	43,7	1,7	6,2
	23	HD 155197	I	1	3,416	0,039	-0,063	0,036	89,0	0,3	14,18
23	BD 125133		1	3,060	0,280	-0,246	0,164	104,9	2,6	3,09	

Tabela 2.4 - Resultado da correção do PA ao sistema equatorial por filtro e por missão.

Missão	Filtro	PA_{corr} ($^{\circ}$)	σ_{corr} ($^{\circ}$)
Outubro de 2010	V	88,4	2,0
	R	88,1	1,5
Março de 2014	B	-6,9	0,1
	V	0,1	1,7
	R	-4,8	1,6
Julho de 2014	V	0,6	1,1
	R	8,3	0,8
	I	14,0	3,9

Tabela 2.5 - Resultado da polarimetria das estrelas padrões não-polarizadas.

Missão	Dia	Objetos	Filtro	t_{exp} (s)	P (%)	σ_P (%)	V (%)	σ_V (%)	PA ($^{\circ}$)
Outubro de 2010	06	HD 12021	V	0,25	0,206	0,128	-0,016	0,066	126,6
	12		V	1	0,311	0,122	-0,047	0,071	152,8
	13		V	1	0,176	0,040	-0,007	0,021	140,9
	02	HD 14069	R	1	0,142	0,112	0,071	0,060	146,4
	08		R	4	0,116	0,062	0,030	0,031	137,2
	12		R	1	0,247	0,127	0,028	0,064	131,9
	12		V	2	0,173	0,053	-0,004	0,028	142,9
	13		V	1	0,022	0,042	0,040	0,036	174,1
	12		R	1	0,226	0,129	0,051	0,073	88,1
Março de 2014	28	HD 94851	V	5	0,077	0,047	0,005	0,024	53,4
	29		V	2	0,570	0,194	-0,022	0,115	65,7
	29		R	2	0,162	0,125	-0,140	0,063	132,8
	28	HD 98161	V	0,2	0,135	0,068	0,075	0,034	43,4
	29		V	0,1	0,476	0,128	0,426	0,093	103,6
	29		R	0,1	0,170	0,141	0,216	0,104	98,1
Julho de 2014	19	WD 1620-391	V	1	0,191	0,068	-0,049	0,059	89,7
	20		V	5	0,193	0,057	-0,057	0,031	59,7
	21		V	5	0,029	0,071	-0,066	0,042	66,3
	22		R	5	0,068	0,092	0,002	0,046	143,4
	23		I	5	0,053	0,064	-0,018	0,047	90,9
	19	WD 2007-303	V	5	0,017	0,077	-0,083	0,065	176,5
	20		V	5	0,140	0,077	0,015	0,066	3,9
	21		V	5	0,213	0,077	-0,080	0,042	120,1
	22		R	5	0,113	0,052	-0,014	0,037	173,1
	23		I	5	0,082	0,077	0,124	0,064	8,6

Tabela 2.6 - Média da polarização linear das padrões não polarizadas por objeto, por filtro e por missão.

Missão	Objetos	Filtro	$\langle P_{\text{pond}} \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle P_{\text{pond}} \rangle}$ (%)	PA (°)
Outubro de 2010	HD 12021	V	0,186	0,036	141,4
		R	0,139	0,050	137,6
	HD 14069	V	0,074	0,033	147,6
		R	0,226	0,129	88,1
	Total	V	0,124	0,024	143,4
		R	0,120	0,047	130,6
Março de 2014	HD 94851	V	0,102	0,046	57,1
		R	0,162	0,125	132,8
	HD 98161	V	0,104	0,060	73,4
		R	0,170	0,141	98,1
	Total	V	0,099	0,036	63,1
		R	0,146	0,090	156,8
Julho de 2014	WD 1620-391	V	0,129	0,037	71,4
		R	0,068	0,092	143,4
		I	0,053	0,064	90,9
	WD 2007-303	V	0,058	0,044	143,2
		R	0,113	0,052	173,1
		I	0,082	0,077	8,6
Total	V	0,068	0,029	78,5	
	R	0,095	0,045	168,8	
	I	0,009	0,049	42,8	

Tabela 2.7 - Média da polarização circular das estrelas padrões por objeto, por filtro e por missão.

Missão	Objetos	Tipo	Filtro	$\langle V_{\text{pond}} \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V_{\text{pond}} \rangle}$ (%)
Outubro de 2010	HD 155197	Polarizada	V	0,060	0,012
			R	0,073	0,009
	HD 23512	Polarizada	V	0,021	0,037
			R	0,002	0,04
	HD 12021	Não-polarizada	V	-0,011	0,010
R			0,037	0,011	
HD 14069	Não-polarizada	V	0,013	0,016	
		R	0,051	0,073	
Total		V	0,022	0,013	
		R	0,050	0,010	
Março de 2014	HD 298383	Polarizada	V	0,209	0,196
			R	,124	0,041
	HD 110984	Polarizada	V	-0,198	0,118
			B	-0,154	0,098
	HD 126593	Polarizada	V	-0,247	0,095
			B		
	HD 111579	Polarizada	B	-0,176	0,114
			R	-0,120	0,224
	HD 94851	Não-polarizada	V	0,004	0,009
			R	-0,140	0,063
HD 98161	Não-polarizada	V	0,117	0,124	
		R	0,216	0,104	
Total		V	0,014	0,081	
		R	0,058	0,077	
		B	-0,163	0,008	
Julho de 2014	HD 155197	Polarizada	V	-0,077	0,044
			R	0,021	0,121
			I	-0,063	0,036
	BD 144922	Polarizada	V	0,055	0,036
			R	0,021	0,121
	BD 125133	Polarizada	I	-0,246	0,164
	WD 1620-391	Não-Polarizada	V	-0,059	0,004
			R	0,002	0,046
			I	-0,018	0,047
	WD 2007-303	Não-Polarizada	V	-0,060	0,026
R			-0,014	0,037	
I			0,124	0,064	
Total		V	-0,036	0,043	
		R	-0,029	0,017	
		I	-0,024	0,094	

2.4 Fotometria

Para obtermos os resultados polarimétricos, as contagens nos feixes ordinário e extraordinário são obtidas por fotometria de abertura. Na Seção 2.4.1, abordamos conceitualmente tal procedimento. E na Seção 2.4.2, apresentamos os procedimentos envolvidos na fotometria diferencial, que também faz uso da fotometria de abertura. Na Seção 2.4.3, mostramos como é realizada a calibração fotométrica.

2.4.1 Fotometria de abertura

A fotometria de abertura é realizada ao somarmos as contagens de todos os pixels em torno do centro da fonte dentro de uma dada abertura. A contagem S_i de cada pixel inclui as contagens tanto do objeto quanto do fundo de céu. O somatório das contagens da fonte dentro da abertura, S , pode ser expresso pela Equação 2.12.

$$S = \sum_i^{N_{pix}} (S_i - B) = -N_{pix}B + \sum_i^{N_{pix}} S_i, \quad (2.12)$$

onde N_{pix} é o número de pixels e B , as contagens do céu em um pixel. Nessa expressão, as contagens do céu são consideradas iguais em todos os pixels dentro da abertura.

Os procedimentos envolvidos na fotometria de abertura consistem em:

- inicialmente estimar as coordenadas centrais das estrelas, informando o par do feixe ordinário e extraordinário;
- excluir as estrelas saturadas;
- definir a abertura usada para determinar as contagens da fonte;
- calcular o céu num anel circular externo à abertura da fonte. Convencionamos usar um valor do *annulus*, raio interno do anel de abertura, maior que a distância entre o par do feixe.

Como parte dos testes realizados para reduzirmos os erros das medidas, os dados dos objetos tipo SW Sex foram reduzidos usando diferentes regiões para extração do valor médio das contagens do céu: entre as imagens ordinárias e extraordinárias e fora dessas imagens. O resultado obtido mostrou que os erros da polarização tendem a ser menores com o céu fora dessas imagens, por exemplo, em 1H 0204-023 o valor

do desvio padrão da média na polarização circular, $\langle\sigma_V\rangle$, foi 0,247% com *annulus* entre os feixes, enquanto que para o *annulus* englobando os feixes, $\langle\sigma_V\rangle$ foi igual a 0,209%.

2.4.2 Fotometria diferencial

A técnica de fotometria diferencial consiste na determinação da razão entre as contagens de duas estrelas, o objeto de interesse e uma estrela de referência, cuja contagem é considerada constante. Sendo as contagens proporcionais ao fluxo, a diferença de magnitudes, Δm , é dada pela Equação 2.13:

$$\Delta m = -2,5 \log \frac{F_{obj}}{F_{ref}}. \quad (2.13)$$

onde F_{obj} é o fluxo do objeto e F_{ref} o fluxo da estrela de referência.

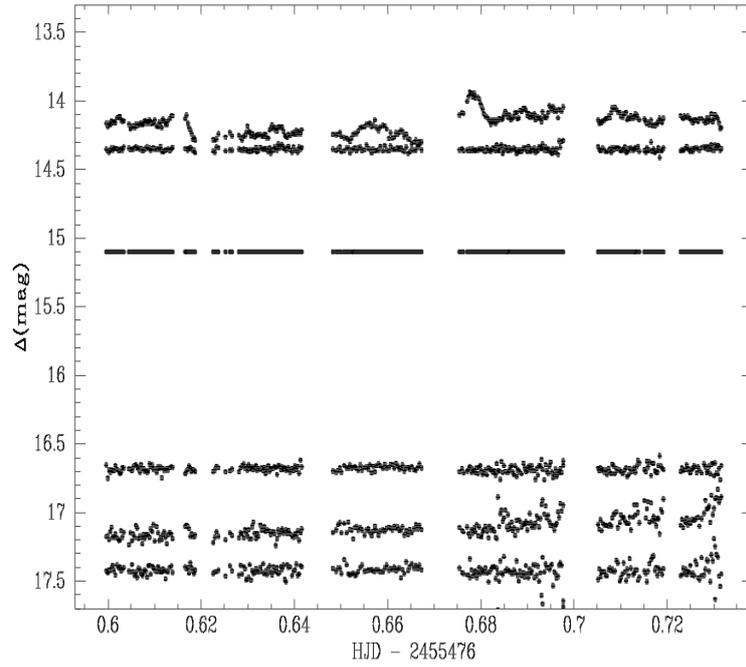
Devido ao modo de observação em polarimetria, o feixe dos objetos é dividido em ordinário e extraordinário. Assim, as contagens das duas imagens para cada objeto são combinadas durante a realização da fotometria diferencial. Neste processo, a abertura deve ser a mesma para todos os objetos das imagens. Calculamos a dispersão da fotometria de estrelas de campo, supostamente constantes, para diferentes aberturas e a abertura que resulta numa menor dispersão é utilizada.

A estrela de referência não pode apresentar fluxo variável. Por isso, escolhemos inicialmente uma estrela brilhante (para maximizar a razão sinal-ruído), próxima ao nosso objeto e de preferência localizada no centro da imagem, para evitarmos eventuais falsas modulações devido à presença do *vignetting*. Para verificar se a estrela escolhida como comparação é de fato constante, realizamos um estudo da fotometria diferencial de estrelas de campo em busca de padrões comuns que possam ser atribuídos à comparação. A fotometria dessas estrelas é também utilizada para escolher a abertura que fornece o menor erro da fotometria diferencial, como já comentado.

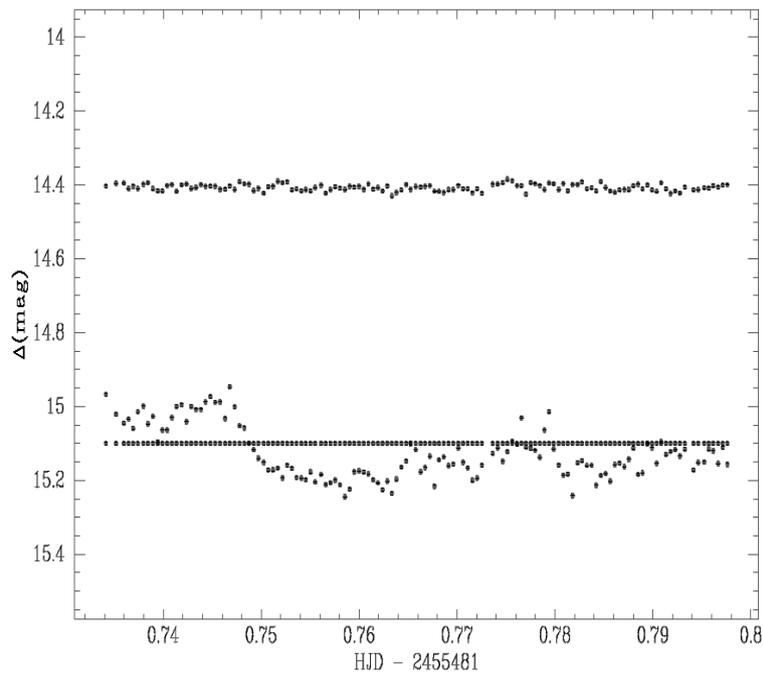
Como a estrela de referência deve ser intrinsecamente invariável para não introduzir uma falsa variabilidade nos dados fotométricos do objeto de ciência, analisamos as curvas de luz de algumas estrelas de campo em relação à estrela de referência. Na Figura 2.9 mostramos as curvas de luz das estrelas de campo e do objeto de ciência, 1H 0204-023, o único objeto que não teve a estrela de referência proposta na literatura. Considerando a curva de luz de uma noite, a variabilidade da estrela de

referência pode se manifestar como uma variabilidade comum a todas as estrelas de campo, nesses gráficos observa-se que a binária é claramente variável, com as menos brilhantes mais dispersas. As características indicam que a estrela de referência não é variável e que não há variabilidade introduzida pela instrumentação. Os diferentes mínimos nas curvas de luz são devido às variações de brilho do objeto de ciência. A diferença média entre uma estrela de campo e a de referência se mantém constante entre noites, Figura 2.9(a), por exemplo.

Esta técnica não exige que o céu durante as observações esteja fotométrico, ou seja, sem a presença de nuvens. Ao envolver comparação entre objetos no mesmo campo, ambas as estrelas estão sujeitas à mesma extinção atmosférica em primeira aproximação.

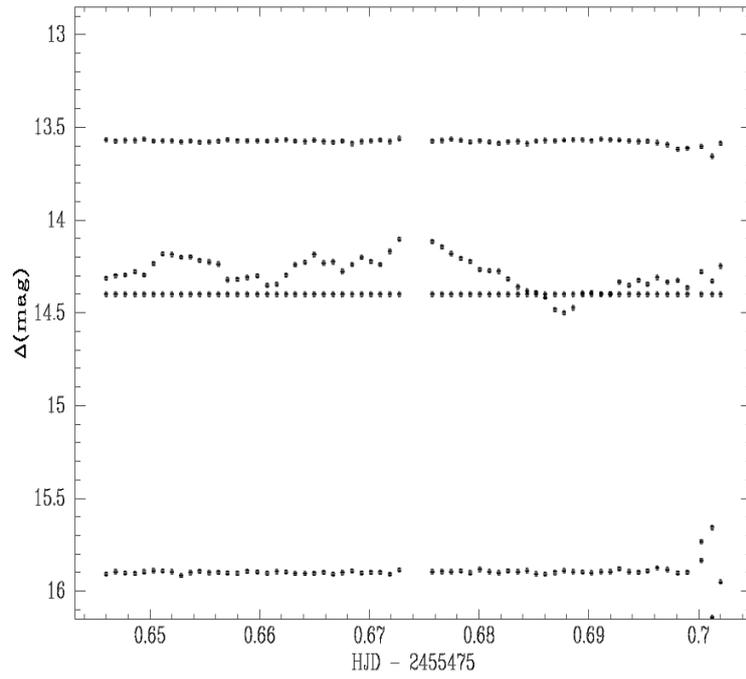


(a) Dia: 06/10/2010: Filtro V

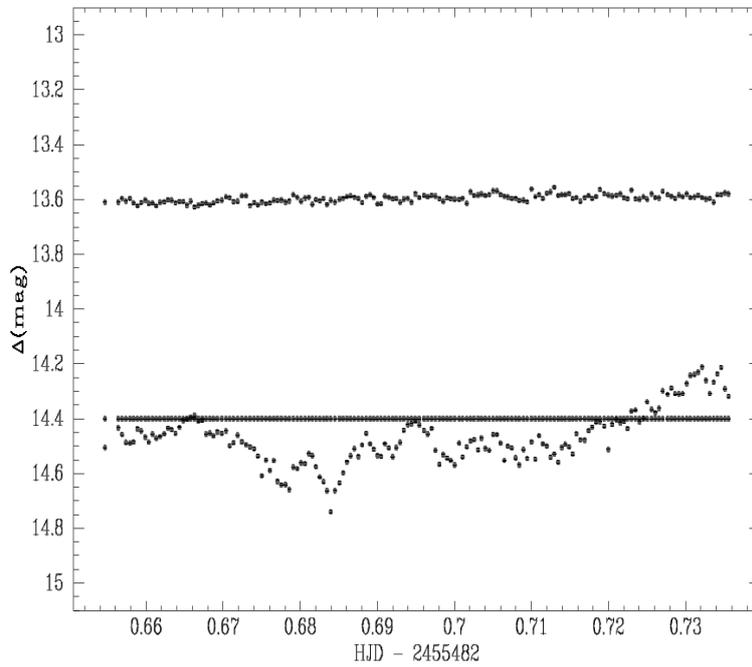


(b) Dia: 11/10/2010: Filtro V

Figura 2.8 - Curvas de luz do sistema 1H 0204-023 e das estrelas de campo nos diferentes dias de observação no filtro V.



(a) Dia: 05/10/2010: Filtro R



(b) Dia: 12/10/2010: Filtro R

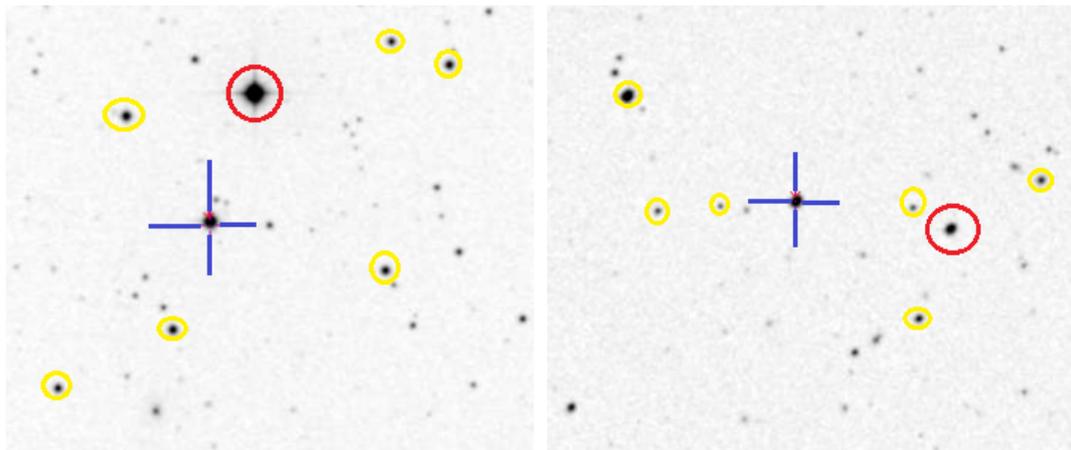
Figura 2.9 - Curvas de luz do sistema 1H 0204-023 e das estrelas de campo nos diferentes dias de observação no filtro R.

2.4.3 Calibração fotométrica

A fotometria diferencial, descrita na seção anterior, fornece diferença de magnitudes com ótima precisão, mas não permite uma estimativa do nível absoluto do fluxo de um dado objeto. Nesta seção, descrevemos uma calibração fotométrica absoluta aproximada realizada em nossos dados. O método aplicado na calibração consiste em adicionamos a magnitude da estrela de referência as magnitudes das estrelas de campo e do objeto estudado. Esse procedimento permite estimar a magnitude aparente em um dado sistema fotométrico, mas com erros relativamente grandes, da ordem de décimos de magnitude, que podem ser estimados pela dispersão da magnitude dos objetos de campo.

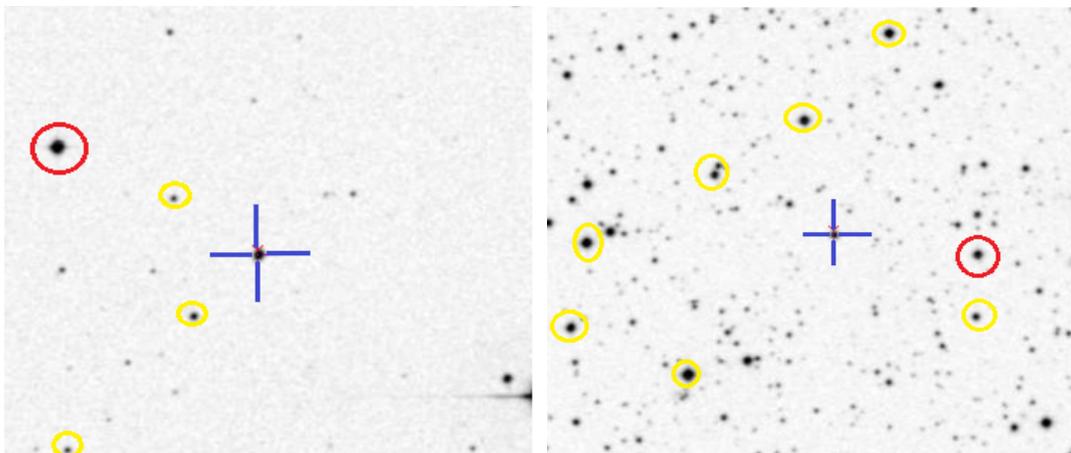
A Figura 2.10 mostra as imagens dos campos dos objetos tipo SW Sex; LS Peg, 1H 0204-023, SW Sex, V442 Oph e V380 Oph. Os objetos de ciência são destacados por uma cruz em azul, as estrelas de referências são indicadas pelos círculos vermelhos, e algumas das estrelas de campo usadas para comparação, em círculos amarelos. As magnitudes das referências foram coletadas do catálogo NOMAD (*The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset*), cujos dados astrométricos e fotométricos são baseados nos catálogos Hipparcos, Tycho-2, UCAC2 e USNO-B1.0 complementados pelo 2MASS (ZACHARIAS et al., 2004).

A estrela de referência para o sistema LS Peg foi TYC 1134-178-1, a mesma usada por Semena et al. (2013), cujas coordenadas em ascensão reta (AR) e declinação (DEC), na época 2000.0, são $21^h 51^m 57,93^s$ e $+14^\circ 06' 53,32''$. As magnitudes usadas são 10,82 mag na banda V e 9,8 mag na banda R, segundo o catálogo NOMAD. Para o objeto 1H 0204-023, usamos como referência a estrela 0879-0037361 de AR = $02^h 06^m 32,16^s$ e DEC = $-02^\circ 04' 00,49''$, de magnitudes nas bandas V e R respectivamente 15,1 mag e 14,4 mag nos catálogos NOMAD e USNO-A2.0. Para SW Sex, usamos a estrela denominada “SW Sex-2” por Henden e Honeycutt (1995) e também adotada por Rude e Ringwald (2012), localizada em AR = $10^h 15^m 18^s$ e DEC = $-03^\circ 07' 20,9''$ com 12,93 mag de magnitude na banda R, pelo NOMAD. Calibramos o fluxo de V442 Oph com a estrela 0737-0410665 (AR = $17^h 32^m 18,03^s$ e DEC = $-16^\circ 15' 41,2''$). Suas magnitudes são 13,97 mag na banda R e 14,53 mag na banda V, de acordo com NOMAD e adotada como padrão fotométrica por Henden e Honeycutt (1995). Para V380 Oph, adotamos 0960-0317152 (AR = $17^h 50^m 07,14^s$ e DEC = $06^\circ 05' 13,8''$) de magnitude igual a 13,9 mag na banda V do NOMAD.



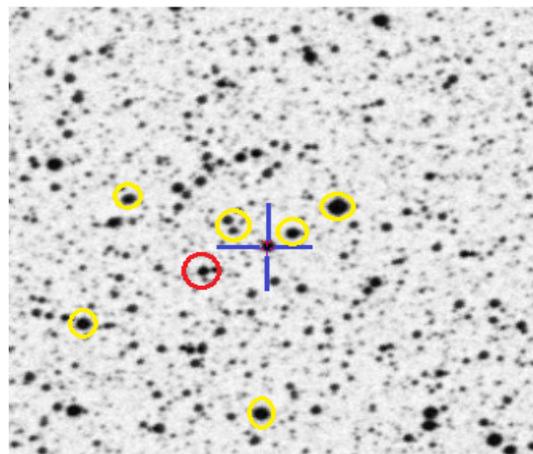
(a) LS Peg

(b) 1H 0204-023



(c) SW Sex

(d) V380 Oph



(e) V442 Oph

Figura 2.10 - Imagens dos objetos tipo SW Sex estudados: cruz em azul são as VCs, círculos em vermelho estrela de referência, em amarelo estrelas de campo. Adaptado do Aladin Sky Atlas, catálogo DSS2.F.POSSII no óptico em níveis de cinza de 10,95' X 10,72'.

3 O SISTEMA LS PEGASI

Neste capítulo, apresentaremos os resultados do sistema LS Pegasi (LS Peg). Na Seção 3.1, apresentamos a revisão da literatura. Na Seção 3.2, mostramos os nossos resultados fotométricos e na Seção 3.3, os polarimétricos. A Seção 3.4 retrata a busca por sinal periódico nesses dados e na Seção 3.5 discutimos os resultados encontrados.

3.1 Contextualização

O sistema LS Peg foi descoberto por Stephenson (1986) durante uma busca sistemática por novas estrelas com emissão em $H\alpha$ e foi identificado como uma VC pelas características presentes em seu espectro por Downes e Keyes (1988). A classe das VCs que este objeto pertence não é clara. Suas propriedades espectrais no óptico são típicas de objetos tipo SW Sex (TAYLOR et al., 1999; MARTÍNEZ-PAIS et al., 1999). Por outro lado, seu espectro em raios X é caracterizado por altas temperaturas (0,15 – 12 keV) e grande absorção parcial semelhante às PIs. Até o momento, tanto no óptico quanto em raios X não está estabelecida a presença de uma modulação estável consistente com rotação da anã branca, que corroboraria a acreção magnética. A Tabela 3.1 apresenta algumas propriedades do sistema disponíveis na literatura.

Tabela 3.1 - Propriedades do sistema LS Peg.

Propriedade física	Valor	Referências
P_{orb}	4,2 h	Taylor et al. (1999)
i	30°	Taylor et al. (1999)
M_1	$0,7 M_\odot$	Taylor et al. (1999)
M_2	$0,39 M_\odot$	Taylor et al. (1999)
\dot{M}	$6,3 \times 10^{-10} M_\odot \text{ ano}^{-1}$	Semena et al. (2013)
L_X	$2,0 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$	Semena et al. (2013)
d	303 pc	Ak et al. (2008)

Legenda:

P_{orb} – Período orbital;

M_1 – Massa da primária;

M_2 – Massa da secundária;

i – Inclinação;

\dot{M} – Taxa de perda de massa;

L_X – Luminosidade em raios X em 0,3 – 2 keV;

d – distância.

Os primeiros resultados fotométricos de LS Peg mostraram pronunciada variabilidade com um período próximo de 19 minutos em 70% das curvas de luz com amplitudes pico a pico de 30% (GARNAVICH et al., 1988). Outros autores também apontaram para a existência de um período persistente em torno de 19 min em seus dados fotométricos, foram eles: Garnavich e Szkody (1992), que interpretam como o período de rotação da anã branca; Taylor et al. (1999) cujo real valor foi $20,7 \pm 0,3$ min e Szkody et al. (2001), que aplicando espectroscopia simultânea mostrou que este período se origina na parte azul do espectro, ou seja nas regiões próximas à AB. A Figura 3.1 mostra, no painel superior, a curva de luz na banda V deste objeto em uma noite de observação e no painel inferior o espectro de potência médio.

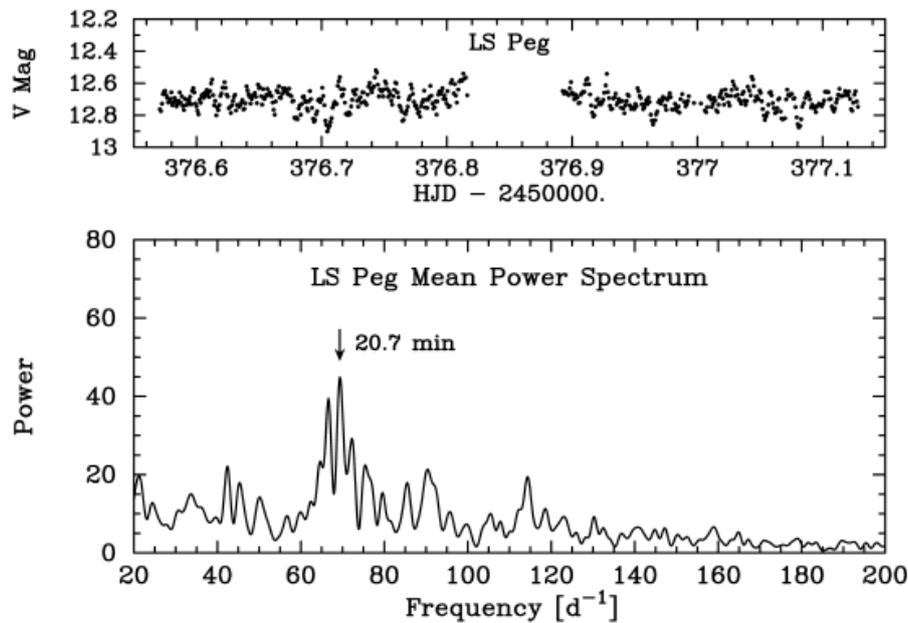


Figura 3.1 - Curva de luz de uma das noites de observação de LS Peg, no painel superior, e o espectro de potência médio de seis noites, no painel inferior.

Fonte: Taylor et al. (1999)

A primeira medida de polarização circular de LS Peg foi realizada por Stockman et al. (1992) num levantamento de polarização circular para dezenas de VCs, usando telescópios de 1,5 m e 2,3 m. Os autores mediram V igual a $-0,01 \pm 0,05\%$ na banda $\lambda\lambda 5000 - 6000 \text{ \AA}$ em duas exposições de 8 minutos. A detecção de polarização circular foi realizada por Rodríguez-Gil et al. (2001) usando o telescópio William Herschel de 4,2 m e um espectropolarímetro: o espectrógrafo ISIS de duplo feixe

com resolução de 1,44 Å acoplado a um polarímetro com lâmina de quarto de onda e prisma Savart de calcita. Com acuracidade da ordem de 0,1% na banda $\lambda\lambda 3900 - 5070$ Å e resolução temporal de 10 minutos, o resultado encontrado é apresentado na Figura 3.2. O periodograma dos dados espectropolarimétricos indicam um pico proeminente centrado na frequência de $\nu = 48,7 \pm 3,1$ dias⁻¹, que corresponde a um período de $29,6 \pm 1,8$ minutos (painel a). A polarização circular apresentada em fase com este período tem amplitude pico a pico de aproximadamente 0,3%, painel b. O período encontrado na polarização circular de $29,6 \pm 1,8$ minutos proveniente do contínuo do espectro é associado ao período de rotação da anã branca. O campo magnético estimado foi aproximadamente 5 – 15 MG.

Análises da variação presente nas curvas de velocidade radial da linha H α em emissão indicam que o período orbital de LS Peg é $0,174774 \pm 0,000003$ dias ou 4,1946 horas (TAYLOR et al., 1999). O mesmo período é também encontrado nos dados de Martínez-Pais et al. (1999).

LS Peg foi um dos primeiros objetos tipo SW Sex caracterizados como não-eclipsante ao lado do sistema V795 Her, contrariando a definição inicial de Thorstensen et al. (1991). Taylor et al. (1999) e Martínez-Pais et al. (1999) apresentam espectros ópticos resolvidos em fase de LS Peg e mostram que possuem características muito similares aos objetos SW Sex. As linhas de Balmer em emissão são intensas e com pico simples, com o centro apresentando pequena modulação em velocidade radial. Essas linhas também apresentam asas assimétricas na forma de uma onda S com amplitude que pode chegar a 3000 km/s (Figura 3.3). São também presentes absorções nas linhas dependentes da fase orbital. Nos espectros de Rodríguez-Gil et al. (2001) a linha H β apresenta os *flarings* (figura 1 deles), modulados com um período de 33,5 min e com amplitude de $\pm 0,5\%$, como mostra a Figura 3.2(d). No periodograma (Figura 3.2(c)) existem dois picos bem definidos: a frequência orbital de 5,72 dias⁻¹ e o outro, a frequência de $43,0 \pm 3,0$ dias⁻¹, correspondente ao período de ~ 33 min, que os autores interpretaram como o batimento entre o período orbital e o de rotação.

A possível existência de um sinal periódico na fotometria óptica relacionado à anã branca incitou a busca por um sinal periódico em altas energias. Observações em UV com os satélites IUE (*International Ultraviolet Explorer*) e Voyager no estado de alto brilho revelaram absorções das linhas Si III, N V, Si IV e C IV similares as candidatas à SW Sex, V795 Her e BP Lyn. No estado baixo, o espectro é caracterizado pela presença das linhas C IV e Mg II em emissão e de N V e Si III, em absorção, similar

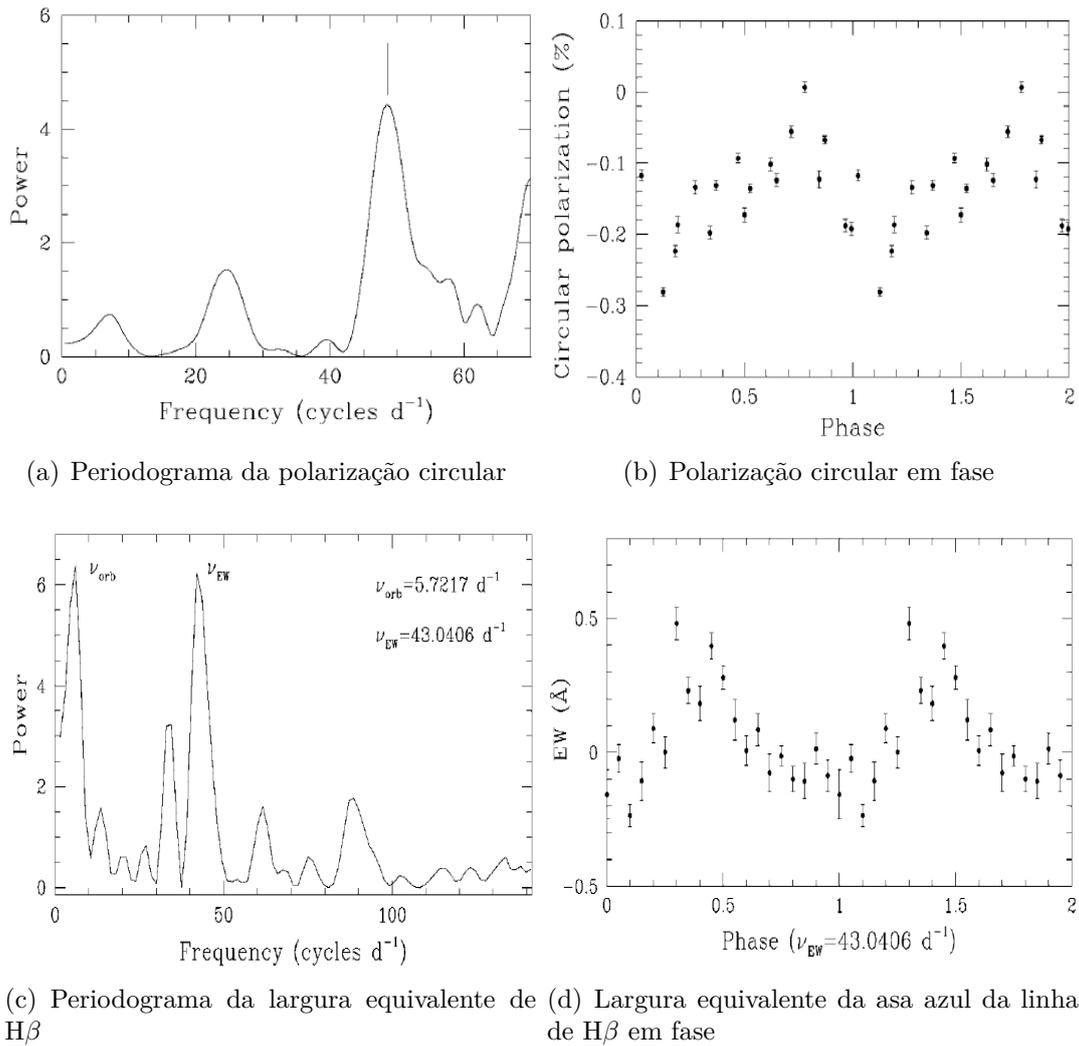


Figura 3.2 - (a) Periodograma de LS Peg da polarização circular indicando P_{rot} igual a $29,6 \pm 1,8$ minutos; (b) Polarização circular em fase com P_{rot} (c) Periodograma da largura equivalente da linha de H β e (d) Largura equivalente da linha em fase com o período de batimento $33,5 \pm 2,2$ minutos.

Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2001)

à PI 1H0551-819 (SZKODY et al., 1997).

As primeiras observações em raios X de LS Peg foram realizadas pelos satélites Ginga e ROSAT (cujos intervalos de energia são respectivamente 1,2 – 37 keV e 0,1 – 2,4 keV). Nestes dados não foi encontrado um período estatisticamente consistente (SZKODY et al., 1994). Com o satélite ASCA (*Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics*, energia entre 0,6 a 10 keV), inicialmente Szkody et al. (2001) não identificou em seus dados sinal de periodicidade, mas Baskill et al. (2005) encontrou um período em $30,9 \pm 0,3$ min, resultado similar ao de Rodríguez-Gil et al. (2001). O

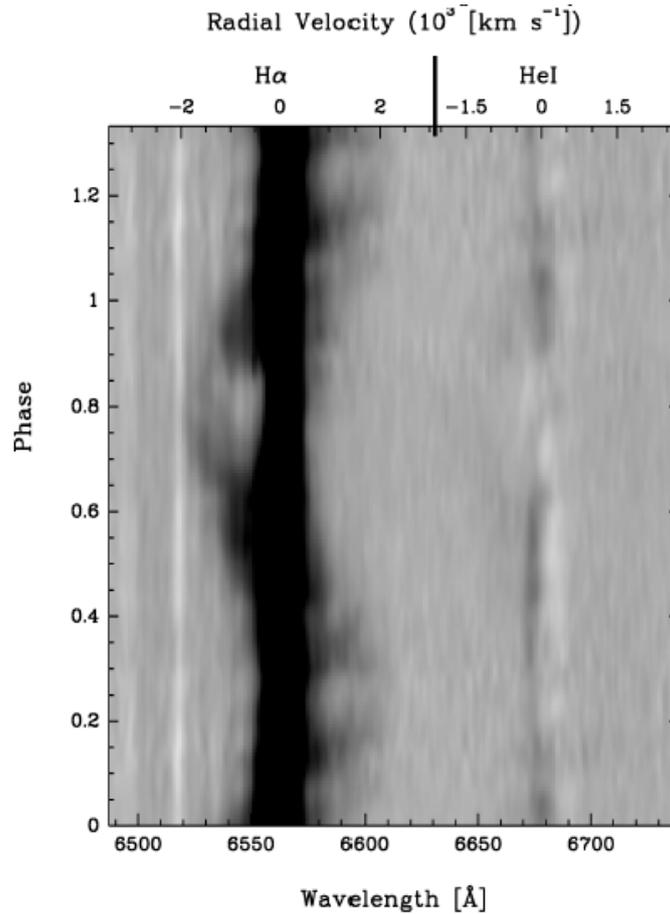


Figura 3.3 - Espectros do sistema LS Peg das linhas H α e da linha He I λ 6678 e curvas de velocidade radial, mostrando linhas em emissão com velocidade máxima em 3000 km/s e a presença dos *flares*.

Fonte: Taylor et al. (1999)

espectro é consistente com uma emissão *bremstrahlung* de temperatura da ordem de 7 keV altamente absorvida de forma parcial (*partial-absorption model*), propriedades similares a de PIs (BASKILL et al., 2005).

Nos dados do satélite XMM-Newton (*X-ray Multi-Mirror Mission*, compreendendo 0,15 – 12 keV) não foi detectado sinal periódico modulado que pudesse ser associado ao P_{rot} . As curvas de luz em raios X moles (0,3 – 2 keV) e duros (2 – 12 keV) obtidos por Ramsay et al. (2008) são apresentados na Figura 3.4. Observa-se baixa variabilidade em raios X moles e um pico de potência significativo, acima de 3σ (99,7% de confiança), correspondendo ao período orbital originado da matéria expelida na superfície da AB ao ser absorvida pela camada externa do disco de acreção. LS Peg é consistente com os modelos espectrais esperados para as PIs, apresentando uma densidade da coluna de absorção neutra maior que $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, valor maior que

o atribuído a VCs não-magnéticas, que é da ordem de 10^{20} cm^{-2} .

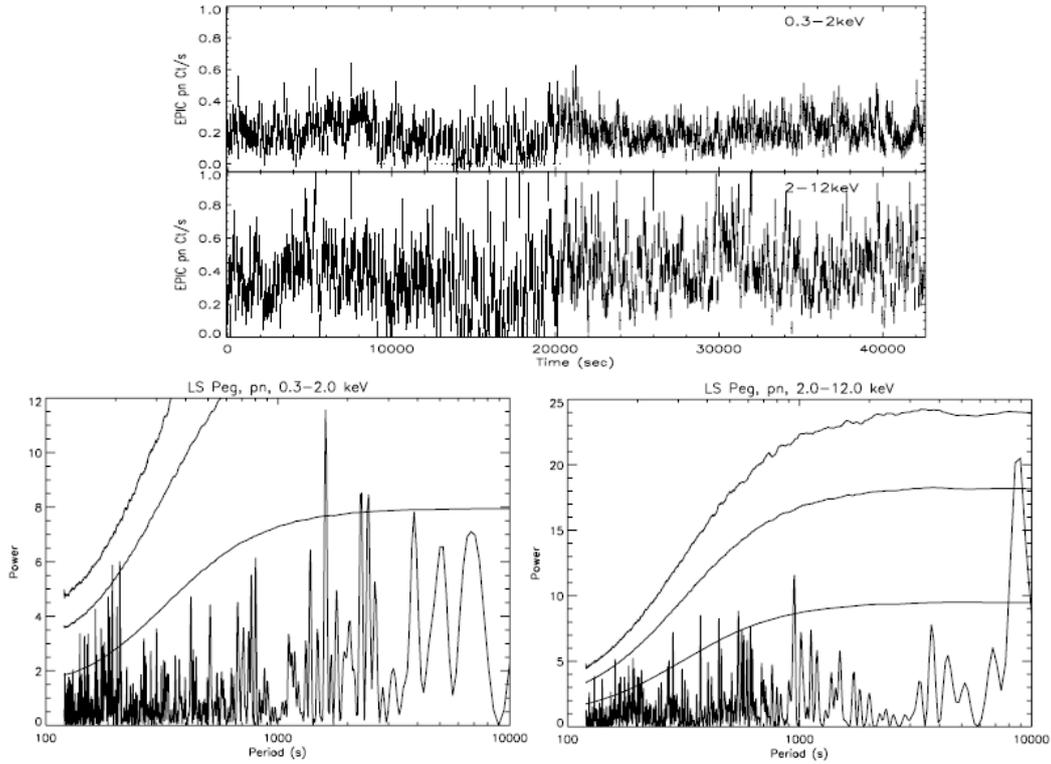


Figura 3.4 - Curva de luz em raios X moles e duros de LS Peg, e os respectivos espectros de potência.

Fonte: Ramsay et al. (2008)

Uma possível explicação para a falta de periodicidade em muitos dados em raios X pode estar na geometria do sistema; quando ocorre um alinhamento do eixo magnético com o eixo de rotação – eixo do campo magnético estritamente perpendicular ao disco de acreção – uma espessa cortina circular é formada sobre cada polo magnético e não há sinal de absorção fotoelétrica, auto-ocultação e nem raios X variando com a fase. O desalinhamento entre estes eixos na ordem de 5° , segundo o modelo de Potter et al. (1998), pode justificar a modulação encontrada no fluxo da polarização circular observada por Rodríguez-Gil et al. (2001).

Um dos últimos trabalhos sobre LS Peg é apresentado por Semena et al. (2013). Em Semena e Revnivtsev (2012) é mostrado que o espectro de potência do *flickering* originado em colunas de acreção magnética de ABs guarda informações sobre o plasma de modo que essa observável pode ser usado para determinar propriedades físicas dessas colunas, como altura, seção de choque e densidade. Semena et al.

(2013) apresentam fotometria rápida de LS Peg que é utilizada para determinar os parâmetros da coluna, a partir do espectro de potência, de acordo com o apresentado acima.

3.2 Fotometria diferencial de LS Peg

Entre as VCs, LS Peg é uma das mais brilhantes. No óptico, o brilho pode variar entre 11 e 12,5 magnitudes, com poucas excursões rápidas para estados menos brilhantes, que podem atingir 14,5 mag como mostra a Figura 3.5, sua curva de luz observada desde setembro de 1988 a janeiro de 2016.

Conforme já mostrado na Tabela 2.1, página 18, os dados para LS Peg foram obtidos nas noites de 06 e 12 de outubro de 2010, nas bandas V e R respectivamente.

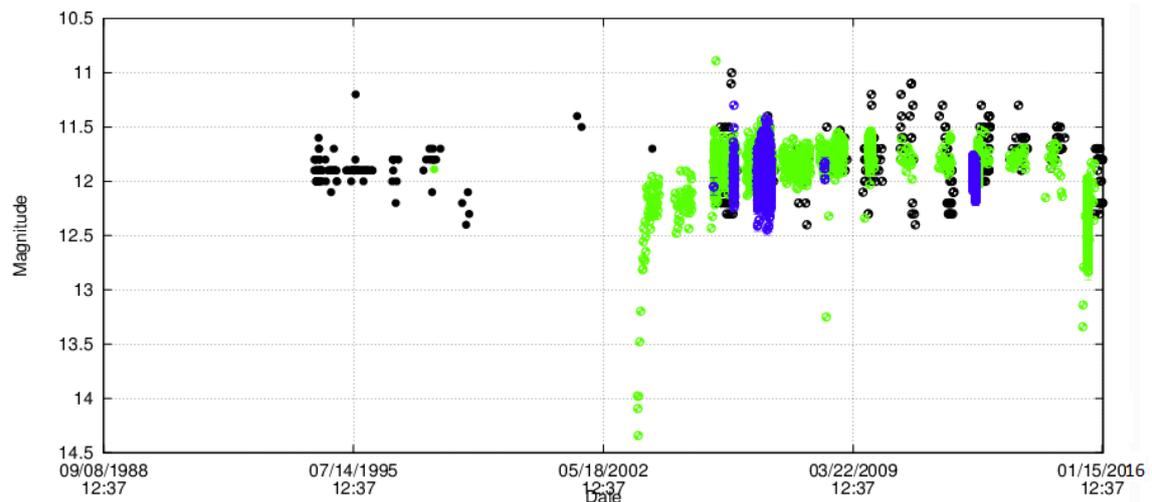


Figura 3.5 - Curvas de luz do sistema LS Peg desde setembro de 1988 a janeiro de 2016. Os pontos em preto são no visível, em verde o filtro V e em azul o filtro B. Fonte: AAVSO (2016)

No catálogo NOMAD, a magnitude de LS Peg nas bandas V e R é aproximadamente 12, este valor é próximo dos nossos resultados: $11,82 \pm 0,02$ mag na banda V e $11,79 \pm 0,03$ mag na banda R. O erro associado não inclui a dispersão intrínseca do objeto variável e nem o erro de nível da calibração, que no filtro V é 0,15 mag e no filtro R é 0,21 mag. O erro de calibração foi calculado pelo desvio padrão da diferença entre as magnitudes medidas e as disponíveis na literatura de algumas das estrelas de campo, Δ_{mag} , na Tabela 3.4.

A Figura 3.6 mostra as curvas de luz de LS Peg e de algumas das estrelas de campo

para cada noite de observação. Nestes gráficos nota-se que LS Peg é variável e que as curvas das outras estrelas não apresentam um padrão comum, isto indica que a estrela de referência escolhida (TYC 1134-178-1) não introduz uma modulação espúria.

Os painéis superiores da Figura 3.7 apresentam as curvas de luz de LS Peg e a barra de erro associada às medidas. Esse erro foi estimado calculando o desvio padrão das magnitudes das estrelas de campo com magnitude similar ao objeto de ciência. As nossas curvas de luz são consistentes com dados anteriores, apresentando um estado ligeiramente mais brilhante (da ordem de 0,3 mag): a magnitude na banda V em Taylor et al. (1999) é igual a $12,7 \pm 0,2$ mag, em média e em Szkody et al. (2001) é $12,0 \pm 0,1$ mag. Além disso, há presença de *flickering* e ausência de eclipses.

Tabela 3.2 - Magnitudes das estrelas de campo em LS Peg.

Estrelas de campo	Filtro	mag_{med}	mag_{lit}	Δ_{mag}	Referência
TYC 1134-178-1	V	-	10,82	-	NOMAD
	R	-	9,80	-	NOMAD
1040-0651795	V	$14,69 \pm 0,03$	14,32	0,37	NOMAD
1041-0667264	V	$14,73 \pm 0,03$	14,38	0,35	NOMAD
1040-0651825	V	$15,19 \pm 0,08$	14,90	0,29	NOMAD
HH95 Peg2-3	V	$15,44 \pm 0,05$	15,44	0,01	[1]
HH95 Peg2-2	V	$14,24 \pm 0,02$	14,19	0,05	[1]
	R	$13,72 \pm 0,03$	13,51	0,21	NOMAD

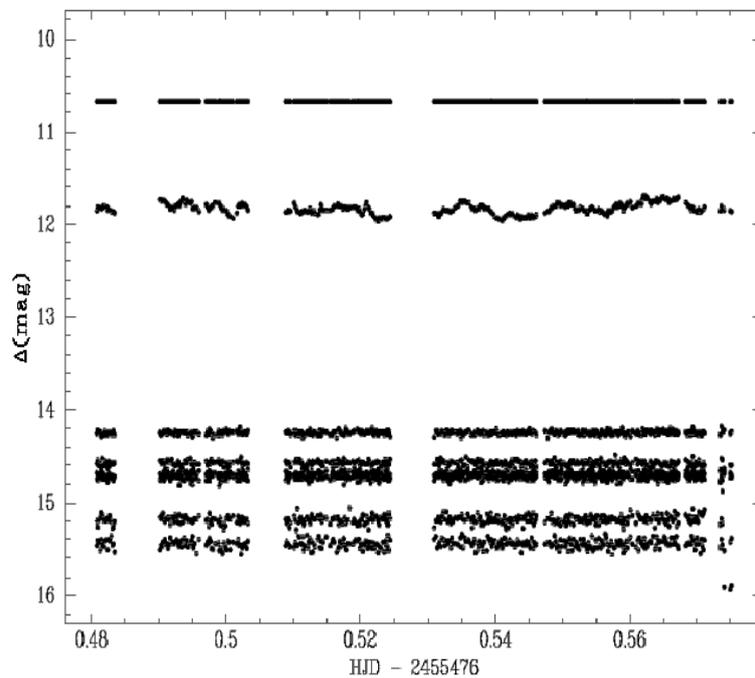
Legenda:

mag_{med} – Magnitude medida;

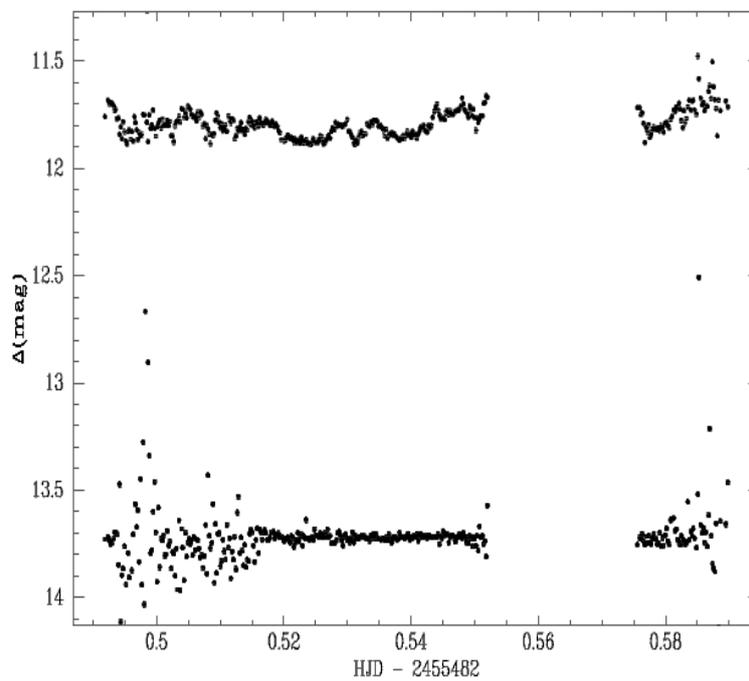
mag_{lit} – Magnitude da literatura;

$\Delta_{mag} = mag_{med} - mag_{lit}$;

[1]– Henden e Honeycutt (1995).



(a) Dia 06/10/2010: Filtro V



(b) Dia 12/10/2010: Filtro R

Figura 3.6 - Curvas de luz do campo do sistema LS Peg

3.3 Polarimetria do sistema

Na Figura 3.7, são também apresentada as curvas de polarização de LS Peg. O valor da polarização circular é baixo, dentro do intervalo de -0,5 a 0,5% no filtro V e de -2 a 2% no filtro R, apresentando em ambos os filtros picos de polarização circular. Na Figura 3.7(b), os valores de V são relativamente altos para HJD menores que 0,52, com barras de erro maiores que no restante da série temporal, e por isso devem ser vistos com precaução, pois como mostra a Figura 3.6(b) essa região apresenta dados que não são de boa qualidade (vide curva de luz da estrela de campo). As medidas da polarização linear indicam em média valores consistentes com zero, mas apresenta também alguns picos de polarização. Os valores de PA não são constantes, o que indica que a polarização linear não é dominada por uma componente interestelar. A variação de PA pode estar associada a valores nulos de polarização linear ou a uma componente intrínseca a LS Peg e variável.

O resultado médio da polarização linear e circular para os dois dias de observação de LS Peg é dado na Tabela 3.3, que também apresenta algumas quantidades associadas com a série temporal. Esses dados não indicam a existência de polarização instrumental. A polarização circular das estrelas de campo é supostamente nula, já que o meio interestelar em raríssimos casos produz polarização circular. E os objetos de campo tem polarização circular consistente com zero e diferente do apresentado pelas estrelas padrões (Tabela 2.6).

Os valores de $\langle\sigma_V\rangle$ na Tabela 3.3 indicam quanto o desvio padrão de $\langle V\rangle$ está disperso na curva de polarização, assim é possível atribuir uma variabilidade intrínseca nos conjuntos de dados. Por exemplo, a dispersão da polarização circular, $\langle\sigma_V\rangle$, é 1,6 e 2,2 vezes maior que o erro médio nas bandas V e R, respectivamente. Isso indicaria que existe uma variabilidade intrínseca nos dados observados, mas uma análise mais rigorosa será apresentado na próxima seção.

Analisando as curvas de polarização da estrela HH95 Peg2-2, apresentadas na Figura 3.8, nota-se que nos dados do dia 12 de outubro de 2010, Figura 3.8(b), tanto a polarização circular quanto a linear, os valores altos no início da série temporal (HJD < 0,52) são observados também no objeto de ciência. Como são recorrentes nos dados fotométricos e polarimétricos, confirmamos que estes dados não são confiáveis. Desse modo, na busca por variabilidade e por período, respectivamente Seções 3.4.1 e 3.4.2.2, esses dados foram retirados da análise.

Tabela 3.3 - Estatística do resultado da polarização de LS Peg.

Objetos	Data	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)	$\langle Q \rangle$ (%)	$\langle U \rangle$ (%)
LS Peg	06/10/2010	-0,017	0,234	0,145	0,063	$0,257 \pm 0,020$	$0,025 \pm 0,019$
TYC 1134-178-1		0,002	0,124	0,092	0,031	$0,106 \pm 0,010$	$0,093 \pm 0,011$
HH95 Peg2 - 2		-0,032	0,934	0,542	0,215	$0,985 \pm 0,073$	$-0,295 \pm 0,085$
LS Peg	12/10/2010	0,135	0,607	0,278	0,233	$0,201 \pm 0,069$	$-0,014 \pm 0,075$
TYC 1134-178-1		-0,003	0,215	0,124	0,119	$0,118 \pm 0,018$	$0,173 \pm 0,026$
HH95 Peg2 - 2		-0,147	0,902	0,493	0,210	$0,234 \pm 0,082$	$0,141 \pm 0,249$

Legenda:

$\langle V \rangle$ – Média da polarização circular;

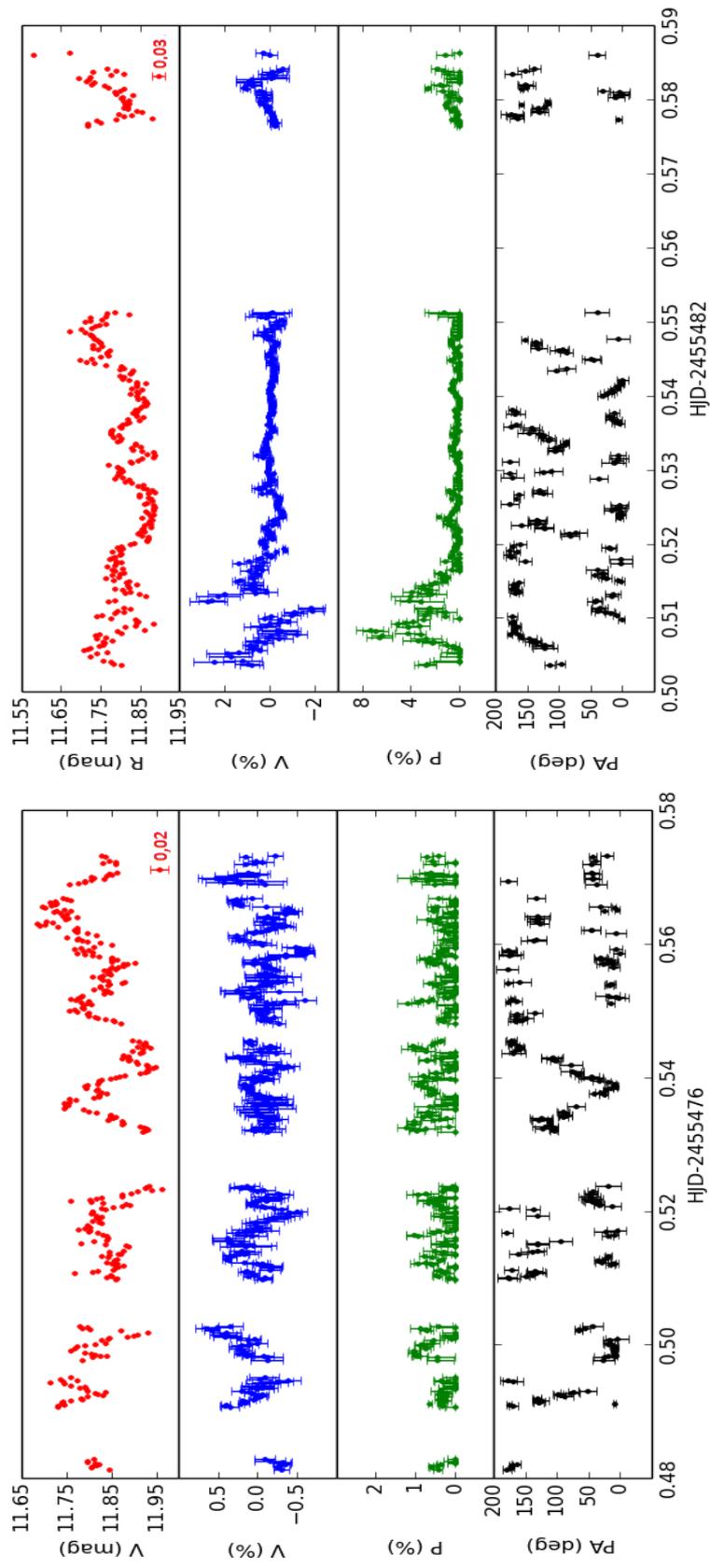
$\sigma_{\langle V \rangle}$ – Desvio padrão da média de V;

$\langle \sigma_V \rangle$ – Média dos erros observacionais de V;

$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ – Desvio padrão da média dos erros observacionais de V;

$\langle Q \rangle$ – Média da polarização linear Q;

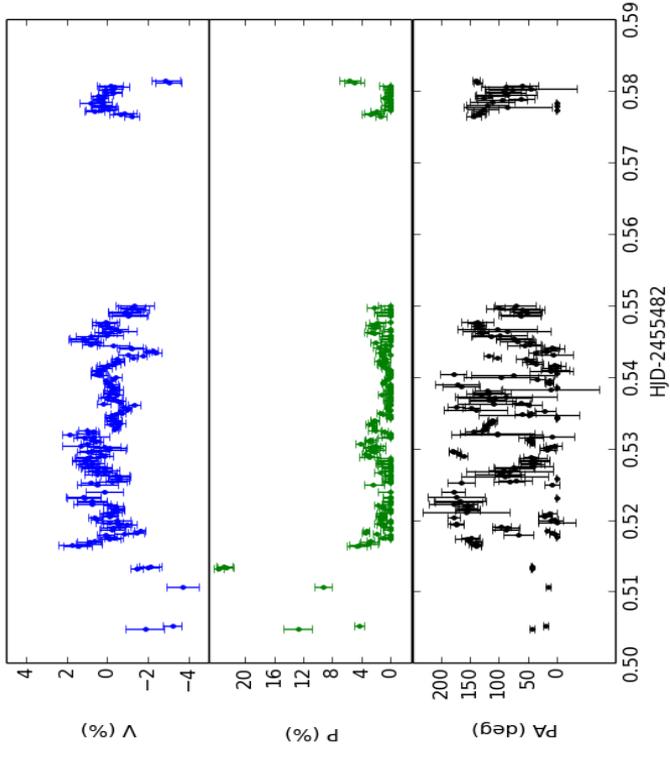
$\langle U \rangle$ – Média da polarização linear U.



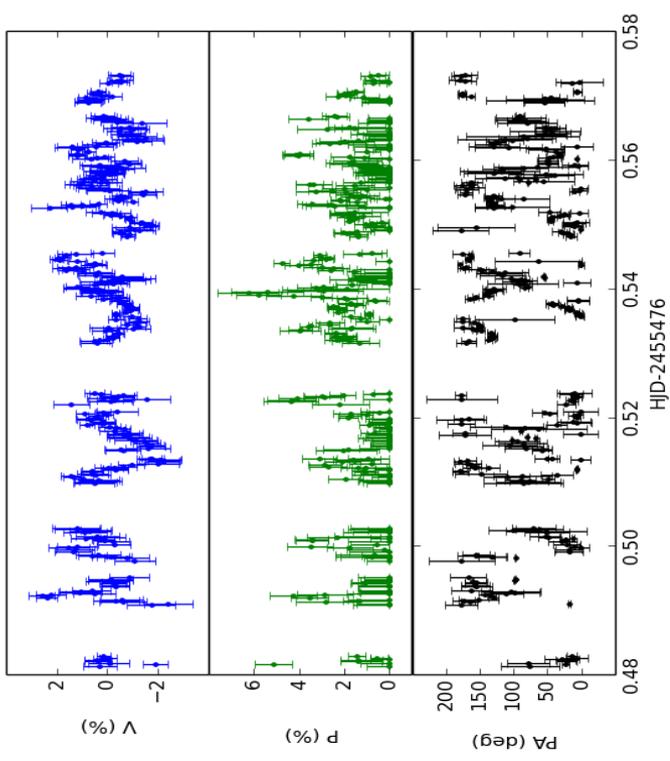
(a) Dia 06/10/2010: Filtro V

(b) Dia 12/10/2010: Filtro R

Figura 3.7 - Curvas de luz e polarização de LS Peg.



(b) Dia 12/10/2010: Filtro R



(a) Dia 06/10/2010: Filtro V

Figura 3.8 - Curvas polarização da estrela HH95 Peg2 - 2 no campo de LS Peg nos dois dias de observação.

3.4 Análise dos dados

O fluxo contínuo de todas as VCs, magnéticas ou não-magnéticas, apresenta uma variabilidade aleatória e rápida, o *flickering*. VCMs apresentam um sinal adicional modulado com a rotação da anã branca, que é comumente associado à presença de uma estrutura de acreção definida pelo campo magnético da AB. Essa estrutura pode também produzir emissão ciclotrônica que é polarizada e variável com a fase da AB. Desse modo, possíveis sinais da presença de acreção magnética são: variabilidade periódica no fluxo e presença de polarização circular diferente de zero ou variabilidade na polarização linear ou circular. A Seção 3.4.1 apresenta a busca por variabilidade intrínseca nos dados polarimétricos, na Seção 3.4.2.1 a busca por sinais periódicos nos dados fotométricos e na Seção 3.4.2.2, em dados polarimétricos. A análise apresentada nas próximas seções teve uma contribuição fundamental do Dr. Francisco Jablonski.

3.4.1 Busca por variabilidade

Uma das formas mais básicas de se caracterizar as propriedades de um conjunto de dados em termos de variabilidade é examinar se – dadas as incertezas das medidas individuais ($\sigma_{ruído}^2$) – é possível que haja alguma componente adicional na variância do conjunto de dados como um todo (σ_{intr}^2). Uma análise simples é a quantificação da média dos erros observacionais em relação ao desvio padrão da medida. Um método mais robusto é utilizado em [Almaini et al. \(2000\)](#), que caracterizou o quanto de variabilidade intrínseca existe num conjunto de QSO's (*Quasi-Stellar Objects*), para os quais foram realizadas medidas precisas do fluxo de raios X e suas correspondentes incertezas ao longo do tempo. Basicamente, o que se faz é modelar a variância total do conjunto de dados, como mostra a Equação 3.1:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{ruído}^2 + \sigma_{intr}^2. \quad (3.1)$$

Supondo distribuições gaussianas para uma série de medidas de x_i e seus respectivos erros, σ_i , a densidade de probabilidade em N pontos é dada pela Equação 3.2:

$$p(x_i | \sigma_i, \sigma_{intr}) = \prod_{i=1}^N \frac{\exp[-\frac{1}{2}(x_i - \bar{x})^2 / (\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)]}{(2\pi)^{1/2} (\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)^{1/2}}. \quad (3.2)$$

Este é o produto de N gaussianas representando a probabilidade de cada ponto.

A probabilidade de σ_{intr} , a componente de variabilidade intrínseca, é dada pela Equação 3.3:

$$L(\sigma_{intr}|x_i, \sigma_i) \propto p(x_i|\sigma_i, \sigma_{intr}) = \prod_{i=1}^N \frac{\exp[-\frac{1}{2}(x_i - \bar{x})^2/(\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)]}{(2\pi)^{1/2}(\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)^{1/2}}. \quad (3.3)$$

Diferenciando-a com relação a σ_{intr} , obtém-se a estimativa de máxima verosimilhança para esse parâmetro. Como é mais conveniente trabalhar com somatórias do que com produtórias, a forma logarítmica é a Equação 3.4, que pode ser resolvida numericamente para σ_{intr} ,

$$\sum_{i=1}^N \frac{[(x_i - \bar{x})]^2 - (\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)}{(\sigma_i^2 + \sigma_{intr}^2)^2} = 0. \quad (3.4)$$

O código utilizado na busca da variabilidade intrínseca, cedido pelo Dr. F. Jablonski, foi aplicado nos dados da polarização circular, e nos parâmetro de Stokes Q e U, cujas incertezas são iguais as incertezas da polarização linear, P¹. A saída do código, Figura 3.9 por exemplo, apresenta a seguinte organização: (i) no painel superior à esquerda, a série temporal das medidas do parâmetro de entrada e suas incertezas; (ii) no painel superior à direita, a densidade de probabilidade das medidas do parâmetro de entrada e a melhor estimativa iterativa da média; (iii) no painel inferior à esquerda, a densidade de probabilidade de σ_{intr} e seu valor médio e (iv) no painel inferior à direita, os valores individuais da verosimilhança da Equação 3.4 ao longo das iterações do algoritmo.

No conjunto de dados do dia 06 de outubro de 2010, a Figura 3.9 apresenta o resultado do parâmetro Q e na Figura 3.10, o resultado do parâmetro U. Tanto em Q quanto em U está presente uma variabilidade intrínseca com o valor de σ_{intr} bem definido, em Q igual a $0,32 \pm 0,02\%$ e em U igual a $0,24 \pm 0,02\%$, estes valores são maiores que o valor médio das incertezas individuais igual a $0,22\%$. Já nos dados observados em 12 de outubro de 2010, os resultados são apresentados na Figura 3.11 e na Figura 3.12 para os parâmetros Q e U, respectivamente. No painel superior à esquerda nota-se que estes resultados mostram visualmente que a variabilidade da polarização linear excede o esperado das incertezas instrumentais. Isto é confirmado numericamente pelo painel inferior esquerdo que mostra o valor de σ_{intr} iguais a

¹A busca não pode ser feita na polarização linear, P, porque ela não é regida por uma distribuição Gaussiana.

0,69 ± 0,06% em Q e 0,32 ± 0,03% em U, sendo o valor médio das incertezas individuais iguais a 0,18%. Esta variabilidade intrínseca nos dados dos distintos dias observados é consistente até mesmo no conjunto de dados total, encontramos para Q um valor bem definido de σ_{intr} igual a 0,39 ± 0,02% (Figura 3.13) assim como em U, 0,27 ± 0,02% na Figura 3.14 e maiores que 0,19%, valor da média das incertezas individuais. Este teste foi realizado mesmo sabendo que a polarização é dependente da banda.

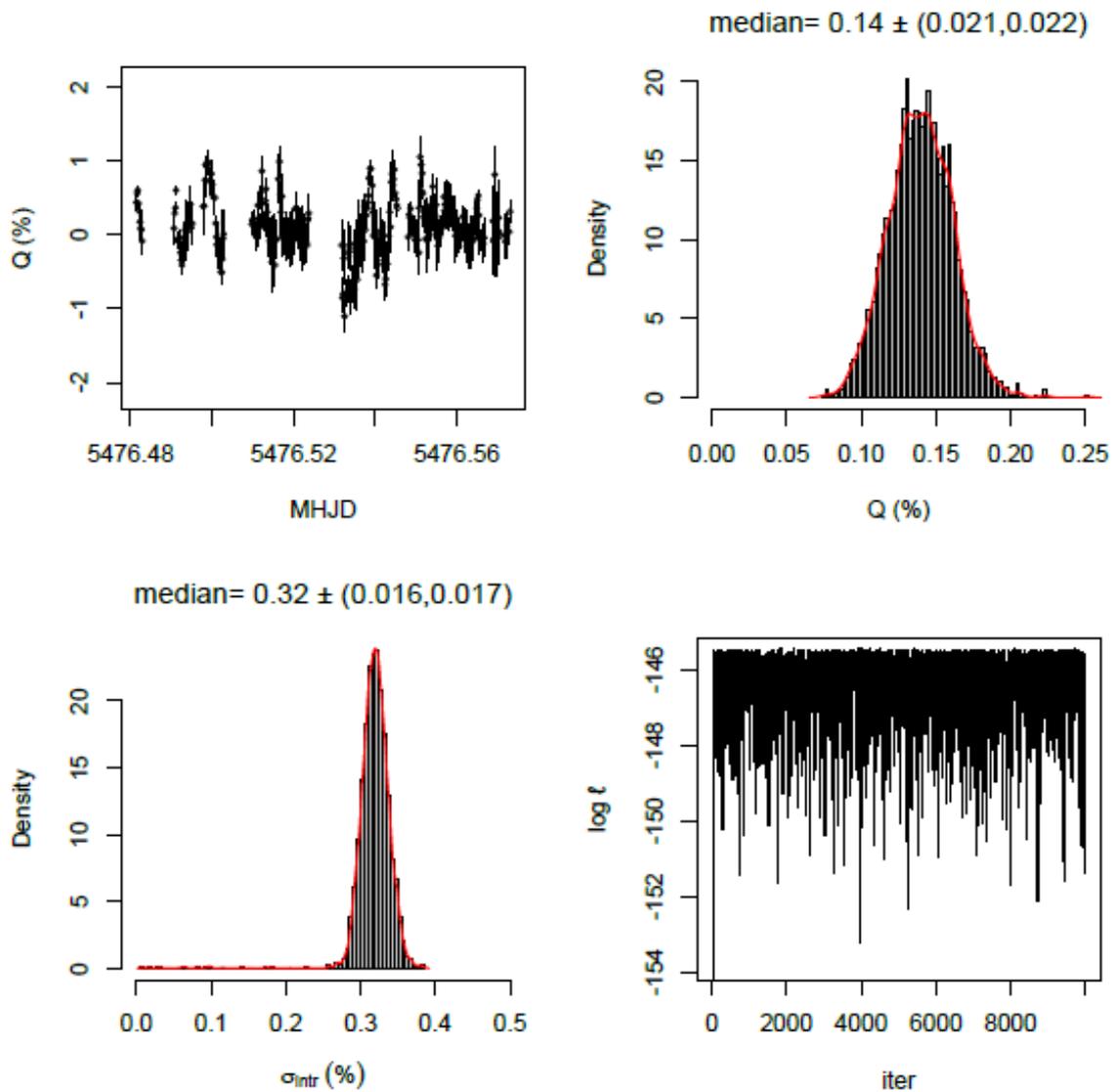


Figura 3.9 - Resultado da busca por variabilidade no sistema LS Peg observado em 06/10/2010 nos dados do parâmetro de Stokes Q, o painel superior a esquerda apresenta a distribuição temporal dos dados; o painel superior à direita estima os valores medianos de Q; o painel inferior à esquerda indica variabilidade intrínseca de 0,32 ± 0,02% e o painel inferior a direita valores individuais da verosimilhança para σ_{intr} .

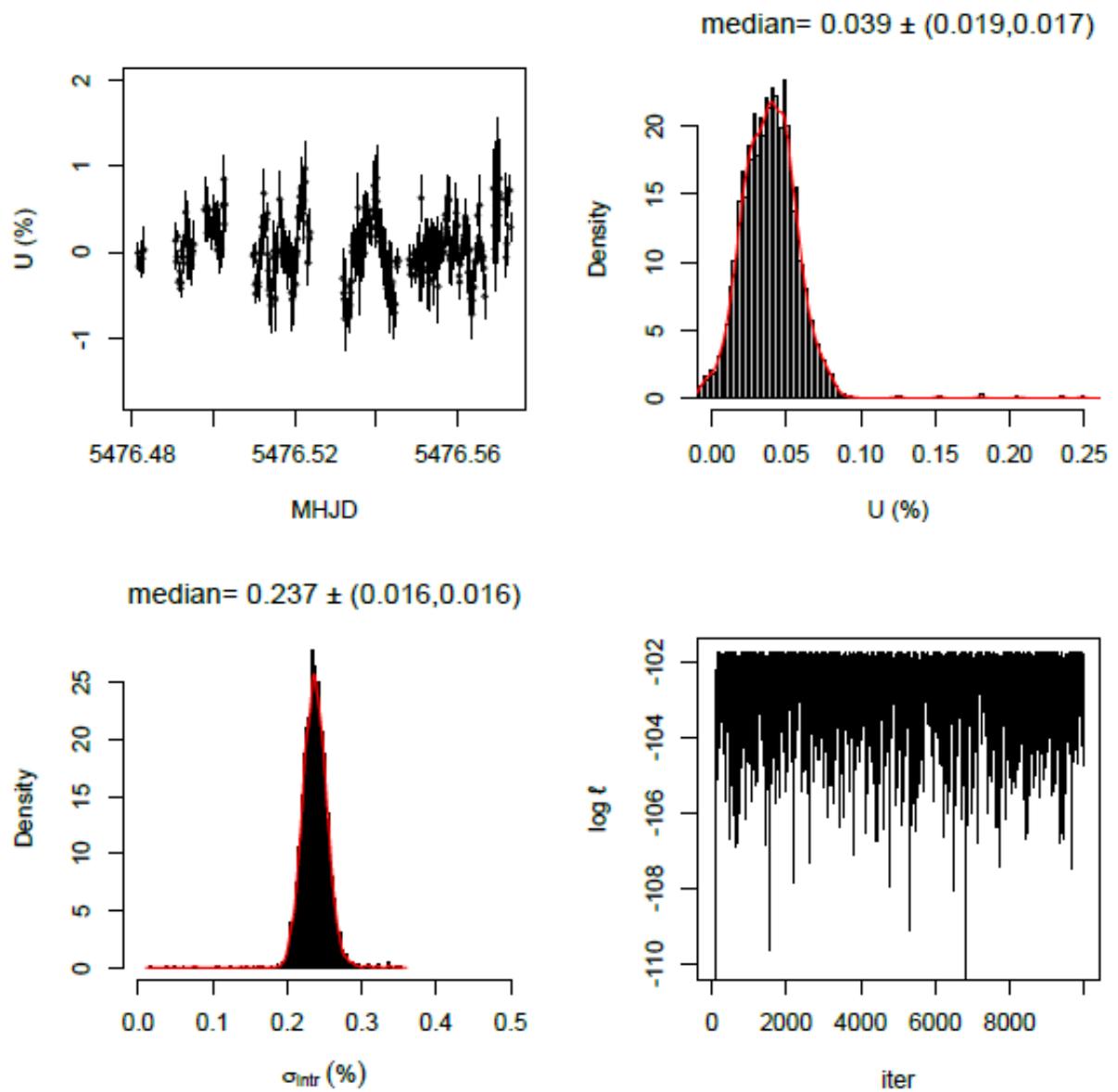


Figura 3.10 - Resultado da busca por variabilidade no parâmetro U nos dados observados em 06/10/2010 indica σ_{intr} médio igual $0,24 \pm 0,02\%$. Detalhes dos gráficos são fornecidos no texto.

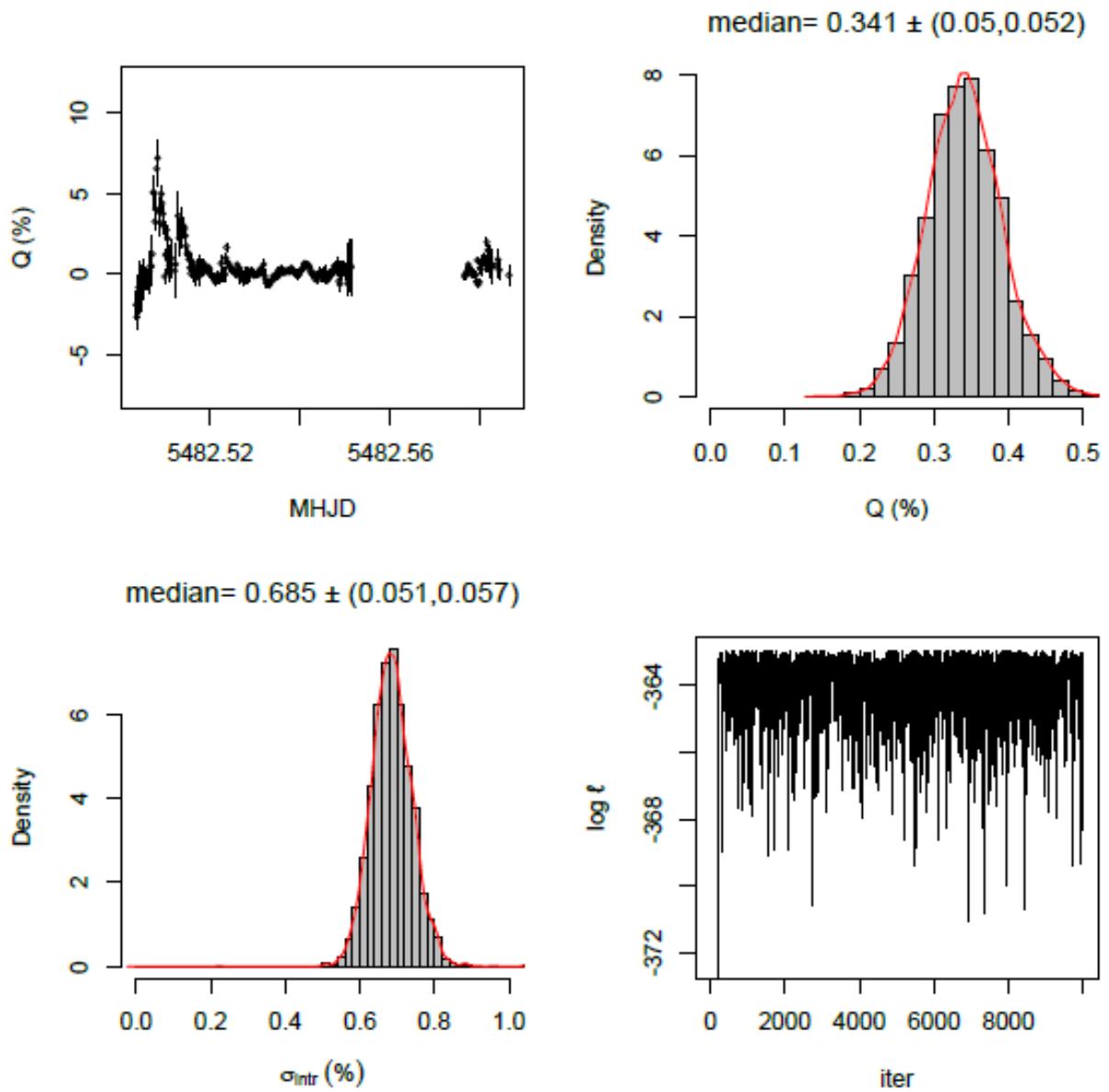


Figura 3.11 - Idem Figura 3.9, para os dados do parâmetro de Stokes Q no dia 12/10/2010. σ_{intr} é igual a $0,69 \pm 0,06\%$.

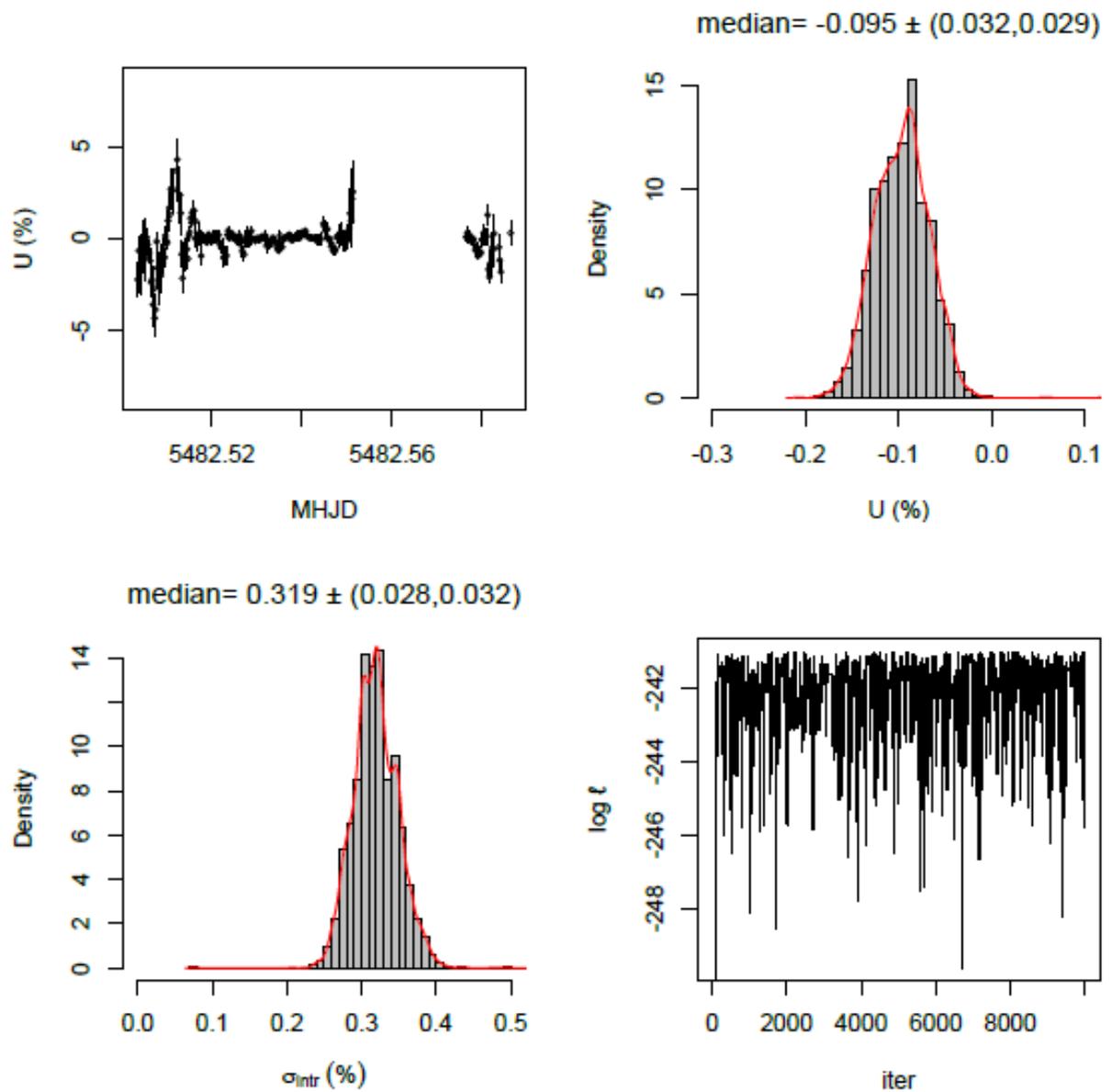


Figura 3.12 - Na polarização linear, os dados do parâmetro de Stokes U no dia 12/10/2010 mostram σ_{intr} igual a $0,32 \pm 0,03\%$.

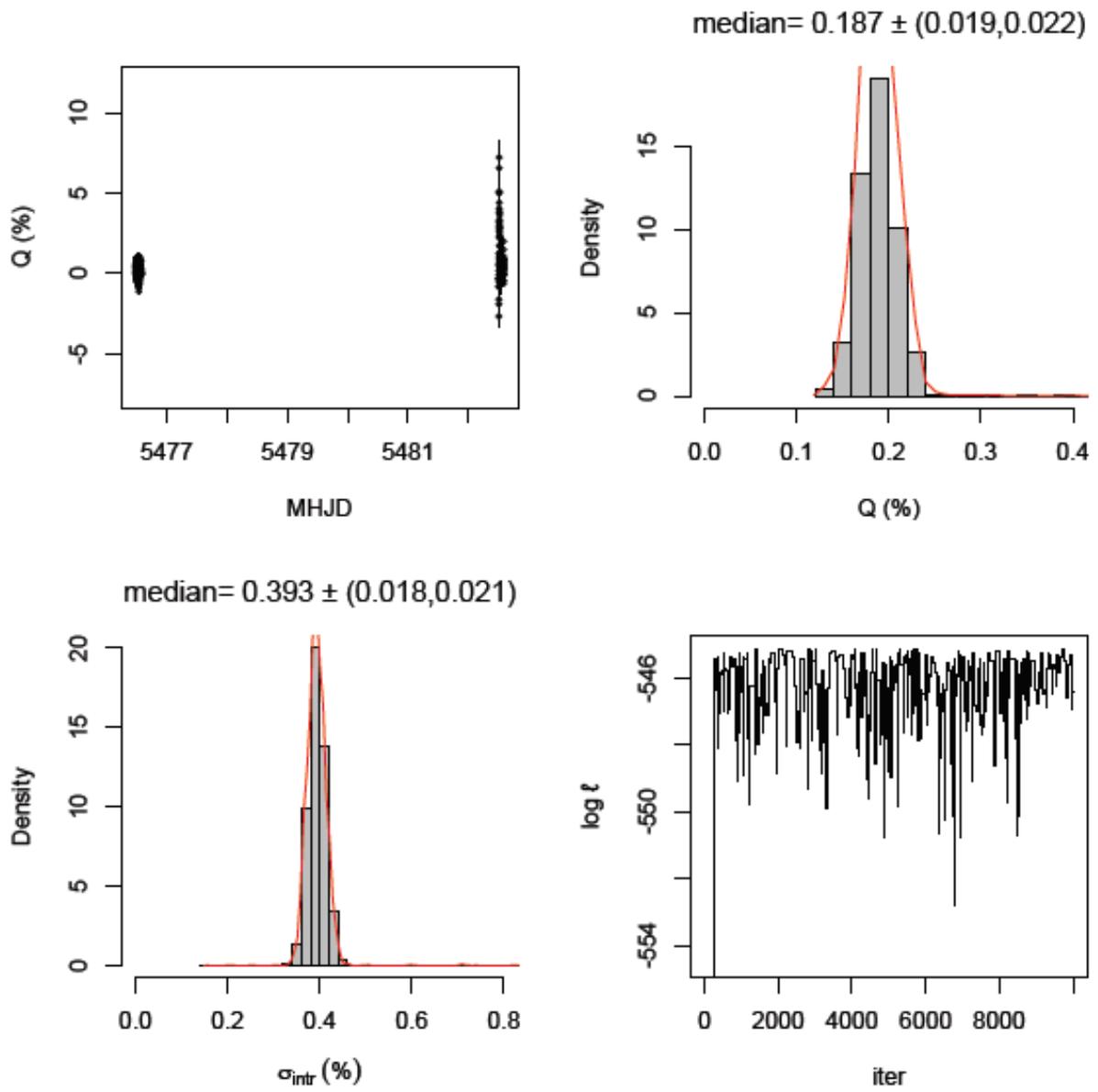


Figura 3.13 - O resultado de σ_{intr} de todo o conjunto de dado dos dois dias de observação mostra variabilidade consistente de $0,39 \pm 0,02\%$ para o parâmetro linear Q .

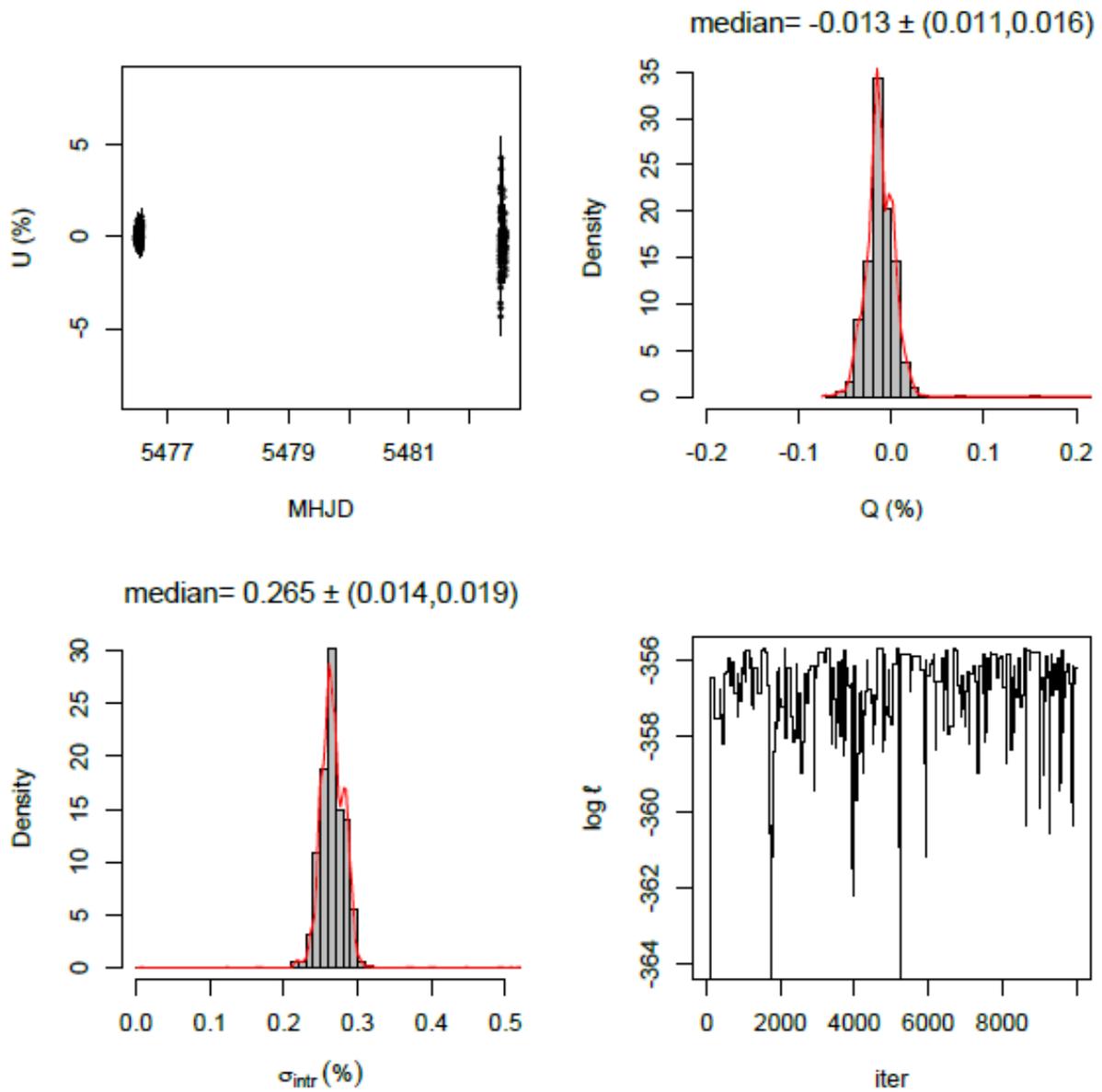


Figura 3.14 - O resultado de σ_{intr} de todo o conjunto de dado dos dois dias de observação mostra variabilidade consistente de $0,27 \pm 0,02\%$ para o parâmetro linear U .

A busca de variabilidade nos dados da polarização circular nos dados do dia 06 de outubro de 2010 é apresentada na Figura 3.15. Observa-se que no painel superior direito, o valor mediano de V é consistente com zero, mas para explicar a aparente variância dos dados é necessário σ_{intr} igual a $0,19 \pm 0,01\%$, que é substancialmente maior que a média das incertezas individuais, igual a $0,14\%$. No conjunto de dados do dia 12 de outubro de 2010, a polarização circular média é diferente de zero, com valor levemente positivo, $0,05 \pm 0,02\%$. A comparação de σ_{intr} igual a $0,29 \pm 0,02\%$ (Figura 3.16) com o valor médio das incertezas, $0,19\%$, indica que pelo menos metade da variabilidade observada no painel superior esquerdo decorre da componente intrínseca. Unindo os dados dos diferentes filtros, a variabilidade intrínseca da polarização circular é consistente nos dois observados, e igual a $0,27 \pm 0,02\%$, Figura 3.17.

O método para a busca de variabilidade não diz nada sobre as propriedades da componente σ_{intr} , além de seu valor mediano e incerteza. A componente pode ou não ter comportamento periódico, mas isso precisa ser examinado com outro tipo de ferramenta.

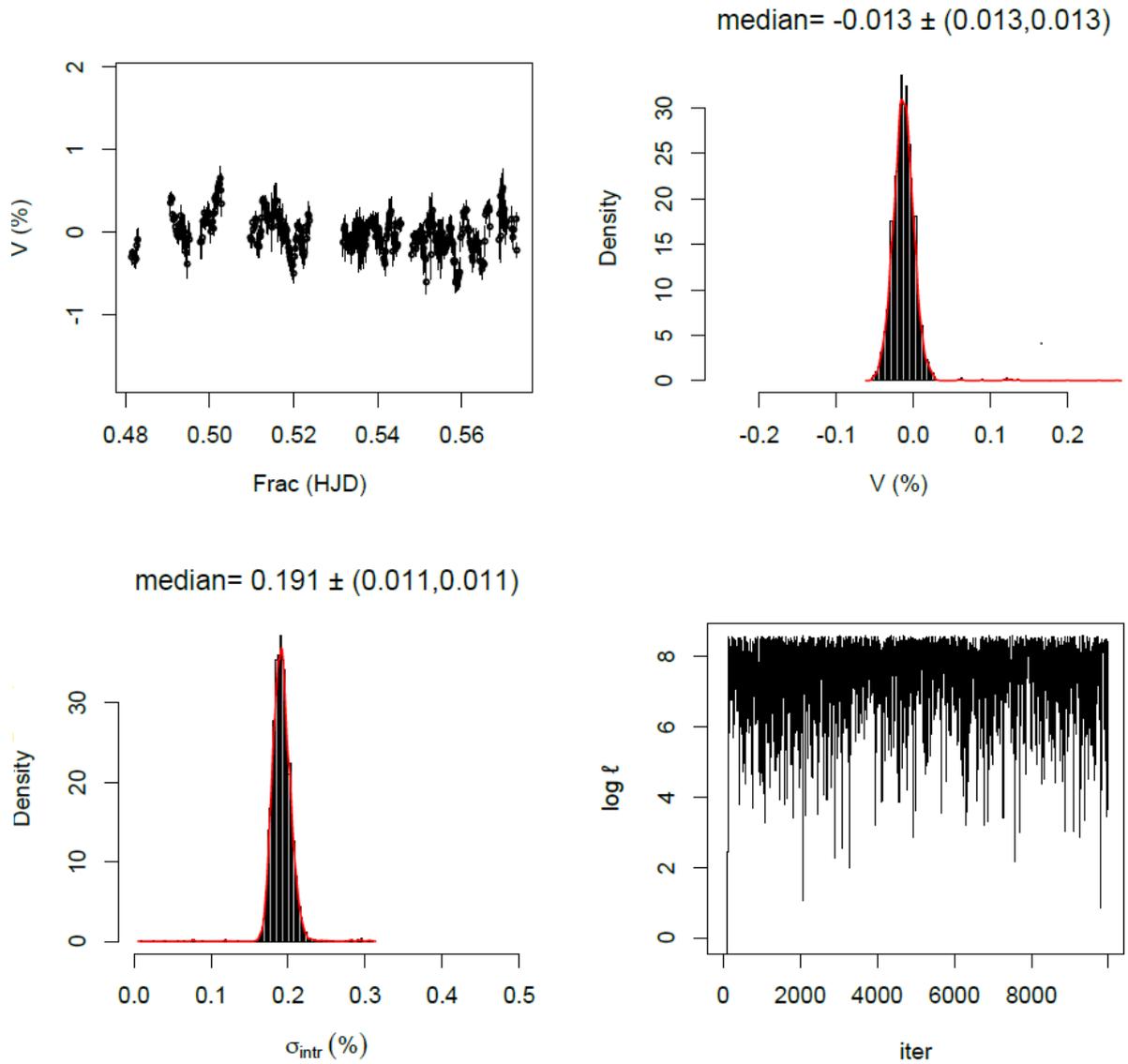


Figura 3.15 - No gráfico do painel inferior esquerdo mostra uma variabilidade intrínseca de $0,19 \pm 0,01\%$ nos dados de polarização circular de LS Peg no dia 06/10/2010.

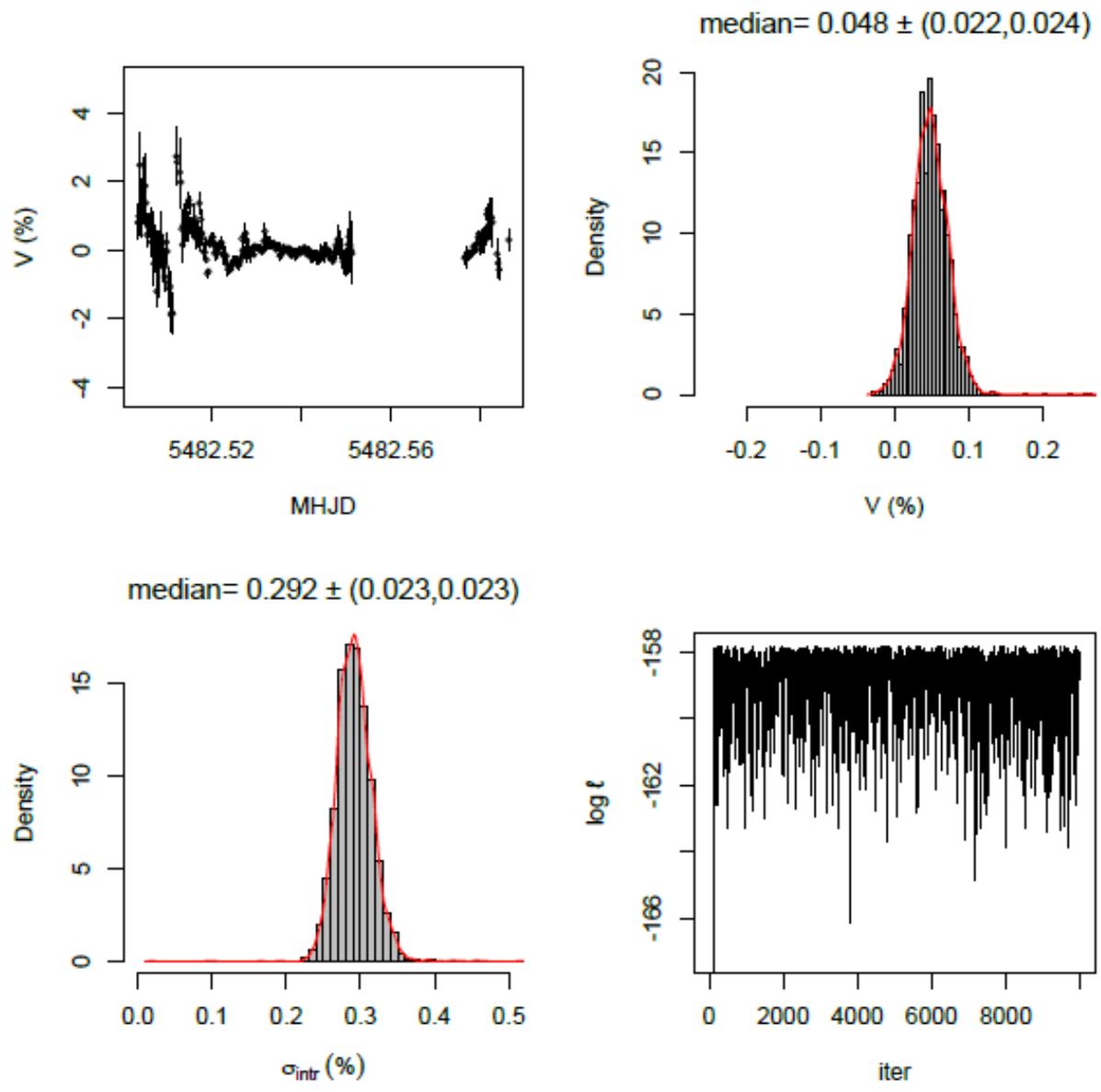


Figura 3.16 - A média da polarização circular nos dados do dia 12/10/2010 é $0,047 \pm 0,022\%$, painel superior direito e a variabilidade intrínseca é $0,28 \pm 0,02\%$, painel inferior esquerdo.

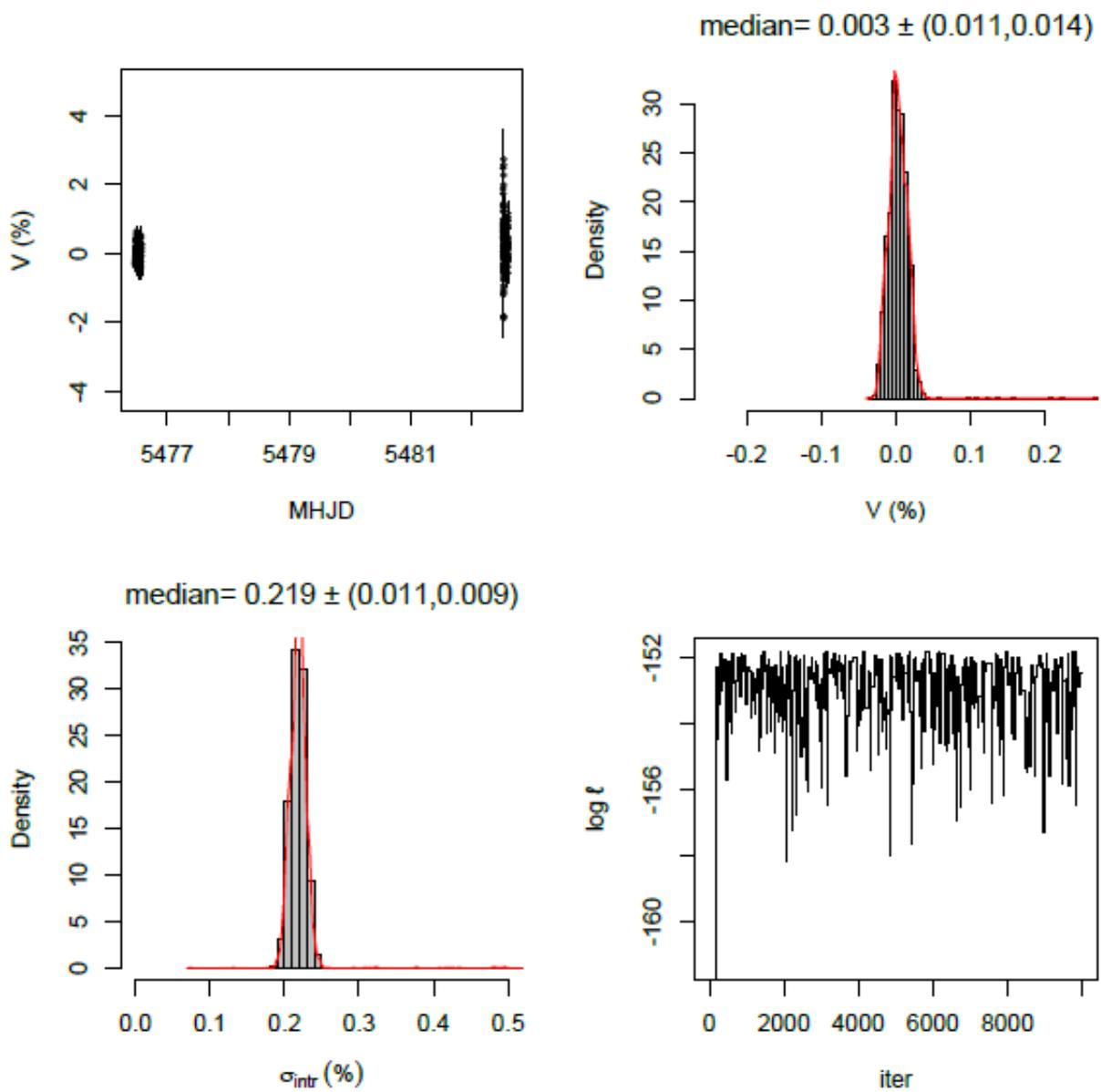


Figura 3.17 - Resultado da variabilidade intrínseca na polarização circular com todo o conjunto de dados de LS Peg. O painel inferior esquerdo mostra a componente igual a $0,27 \pm 0,02\%$.

3.4.2 Busca por sinais periódicos

Com o objetivo de encontrar sinal periódico nos dados fotométricos e polarimétricos pelo método mais eficiente, calculamos espectros de potência por três técnicas. São elas:

String-length (SL), calcula a soma dos comprimentos nos segmentos de reta dos pontos sucessivos (m_i, ϕ_i) no espaço de fase, dada pela Equação 3.5. Os períodos mais prováveis são dados pelo mínimo dessa soma. Esse método é eficiente para determinar períodos de séries em que há poucos pontos desigualmente espaçados no tempo (DWORETSKY, 1983).

$$P_{SL} = \sum_{i=1}^{N-1} [(m_i - m_{i-1}^2) + (\phi_i - \phi_{i-1})^2]^{1/2} + [(m_i - m_n^2) + (\phi_1 - \phi_n + 1)^2]^{1/2}; \quad (3.5)$$

Transformada discreta de Fourier (DFT), definida pelo espectro de potência, sendo os períodos mais prováveis os picos no espectro de potência (ao contrário do SL, portanto). Para N pontos discretos no tempo, temos:

$$P(\omega_j) = \left(\frac{1}{N}\right) \left[\left(\sum_k x_k \cos \omega_j t_k \right)^2 + \left(\sum_k x_k \sen \omega_j t_k \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

sendo ω_j , a frequência em $j = -N/2, \dots, N/2-1$, x_k os pontos da série nos tempos t_k ;

Lomb-Scargle (LS), variação da técnica de Fourier que realiza análise de periodicidades em séries não igualmente espaçados no tempo (LOMB, 1976; SCARGLE, 1982):

$$P(\omega_j) = \left(\frac{1}{2}\right) \left\{ \frac{\left[\sum_k x_k \cos \omega(t_k - \tau) \right]^2}{\sum_k \cos^2 \omega(t_k - \tau)} + \frac{\left[\sum_k x_k \sen \omega(t_k - \tau) \right]^2}{\sum_k \sen^2 \omega(t_k - \tau)} \right\}, \quad (3.7)$$

onde τ é definido por,

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_k \sen(2\omega t_k)}{\sum_k \cos(2\omega t_k)}. \quad (3.8)$$

Entre os métodos citados, usaremos o Lomb-Scargle, pois o método *string-length* não mostrou sinal de periodicidade e o resultado do método DFT foi similar ao LS em muitos casos, mas como os dados são irregularmente espaçados no tempo optamos por utilizar o Lomb-Scargle.

Em cada conjunto de dados, os pontos com erros muito maiores que o erro típico foram retirados da análise para não introduzir um sinal espúrio. Além disso, a busca por sinal periódico foi realizada até a frequência máxima da amostragem, denominada de frequência de Nyquist. No entanto, como os picos de potência significativos foram encontrados em frequências inferiores a 100 ciclos d^{-1} (que corresponde a 14,4 minutos de período), apresentaremos os resultados até essa frequência. O período encontrado é considerado provável, quando o pico de potência é superior a potência de falso alarme correspondente a 1%. Porém, também apresentamos a potência de falso alarme com probabilidade de 0,1% e 0,01%.

3.4.2.1 Fotometria

Os periodogramas das duas noites de observação do sistema LS Peg são apresentados na Figura 3.18: em azul, dia 06 de outubro de 2010, filtro V, e em vermelho, dia 12 de outubro de 2010, filtro R. Os picos de potências significativos são aproximadamente iguais para ambos os dados: (i) potências acima de 11 que representam falso alarme de 1%; (ii) potências acima de 13 que representam falso alarme de 0,1% e (iii) potências acima de 15 que representam falso alarme de 0,01%. Assim, nota-se que nos dados do dia 06 existem cinco picos com potência acima de 11. Em ordem crescente de frequência são: $113,40 \pm 34,08$ minutos; $50,02 \pm 2,57$ min; $25,24 \pm 1,33$ min; $21,18 \pm 1,25$ min e $16,92 \pm 0,80$ min. Nos dados do dia 12 temos 4 picos de potência: $156,68 \pm 88,90$ min; $58,88 \pm 12,5$ min; $27,31 \pm 1,03$ min; $19,63 \pm 0,81$ min. Os erros foram estimados pela largura à meia altura do pico.

Os períodos encontrados nos dados dos dois de observação mais relevantes são o de 25 – 27 min, por serem os mais próximos do período de 29,6 min encontrado nos dados polarimétricos do [Rodríguez-Gil et al. \(2001\)](#), e o de 19–21 min, que correspondem em média ao período de 20 min na fotometria de [Taylor et al. \(1999\)](#). Esses períodos são também encontrados quando unimos todo o conjunto de dados fotométricos, nos diferentes filtros. Na Figura 3.19, os períodos encontrados com potência acima de 14, que representam falso alarme de 0,1%, são em ordem crescente de frequência: $140,87 \pm 72$ min, $55,15 \pm 12,78$ min, $26,28 \pm 1,90$ min; $20,32 \pm 1,14$ min e $16,68 \pm 0,78$ min.

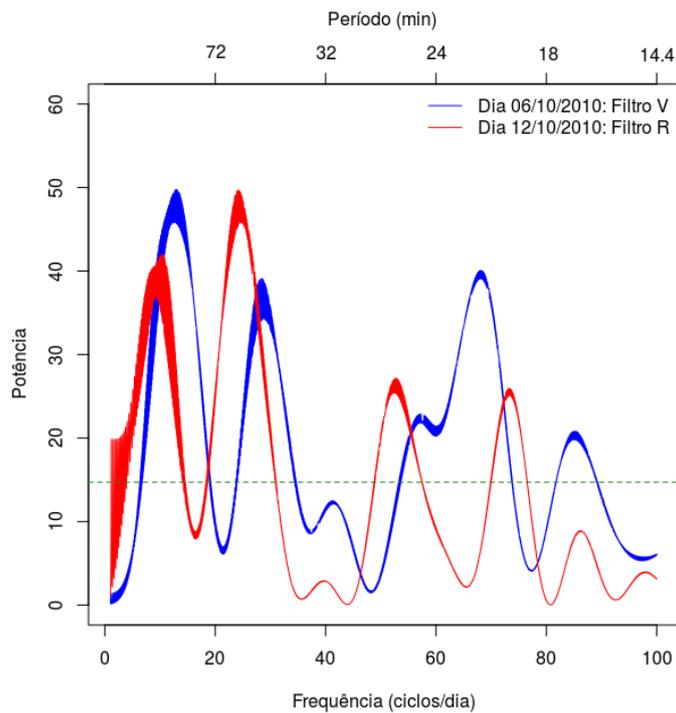


Figura 3.18 - Periodograma dos dados fotométricos no filtro V do dia 06/10/2010, em azul, e no filtro R do dia 12/10/2010, em vermelho. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

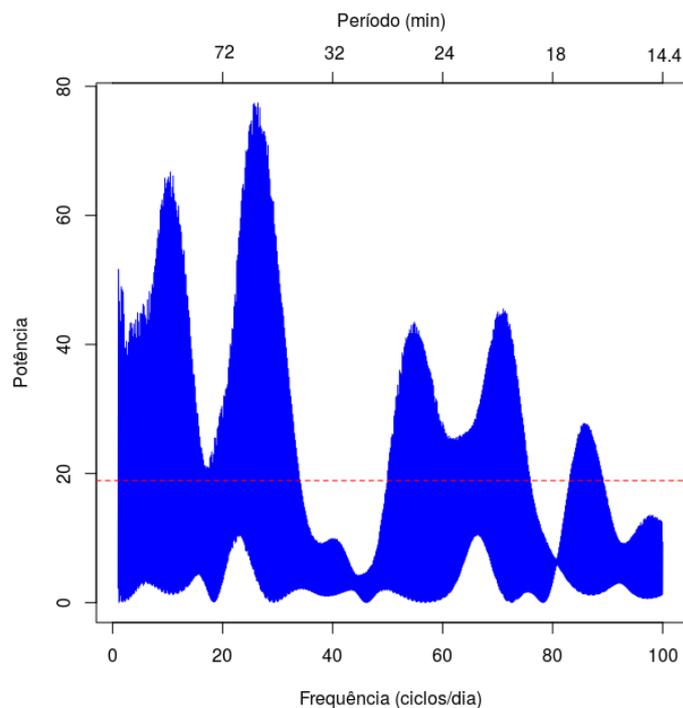


Figura 3.19 - Periodograma de todos os dados fotométricos do sistema LS Peg. Os períodos são em ordem crescente de frequência: $140,87 \pm 72$ min, $55,15 \pm 12,78$ min, $26,28 \pm 1,90$ min; $20,32 \pm 1,14$ min; $16,68 \pm 0,78$ min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

Para verificar se os períodos encontrados em LS Peg podem ser espúrios e decorrentes da amostragem dos dados ou de algum outro efeito observacional, realizamos também uma busca por período na estrela de campo, HH95 Peg2-2. No periodograma mostrado na Figura 3.20 é possível observar que nos dados do dia 06 de outubro há dois picos de potência proeminentes em $38,03 \pm 4,00$ min e em $26,80 \pm 1,38$ min, mas ambos com potências irrelevantes em relação aos dados de LS Peg. Em 12 de outubro, os únicos picos de potência significativos são os períodos, 83 ± 25 min e 202 ± 53 min, que podem ser efeito das imagens de baixa qualidade no início da observação, pois estão também presentes nos dados de LS Peg.

Assim, podemos concluir que o período em torno de 20 min é o sinal mais consistente nos dados de LS Peg, pois além de ser recorrente nos dois dias de observação, com potência significativa em ambos os dados e no conjunto de dados total, com potência superior a potência do período de 26 min, não é encontrado nos dados da estrela de campo em nenhum dos dias observados.

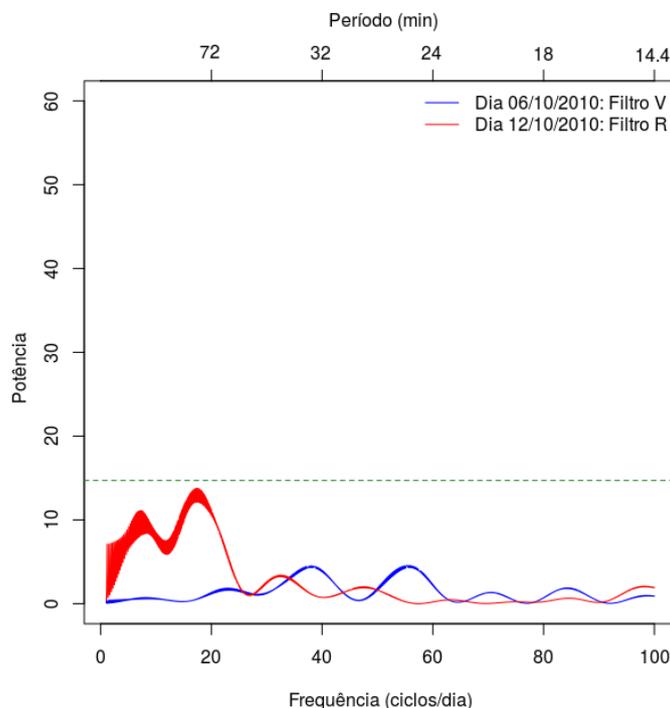


Figura 3.20 - Periodograma dos dados fotométricos da da estrela HH95 Peg2-2 em azul no filtro V, em vermelho no filtro R. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

3.4.2.2 Polarimetria

O espectro de potência da polarização linear para os parâmetros de Stokes Q e U nos dois dias de observação é mostrado na Figura 3.21. Em ambos os periodogramas, é notório a presença de um pico de potência no intervalo de frequência entre 60 – 80 ciclos d^{-1} , que corresponde aos seguintes períodos: em Q, $21,10 \pm 1,25$ min no filtro V e $20,69 \pm 1,21$ min no filtro R e em U, $24,75 \pm 2,14$ min no filtro V e $17,82 \pm 0,68$ min no filtro R.

Analisando o periodograma da estrela de campo HH95 Peg2-2 (Figura 3.22), o parâmetro Q apresenta, em ambos os filtros na frequência entre 60 – 80 ciclos d^{-1} , os períodos $17,44 \pm 1,07$ min no filtro V e $15,55 \pm 0,83$ min no filtro R, cujas potências são da mesma ordem que nos dados de LS Peg. É possível que os períodos em torno de 20 min em Q, sejam provenientes de sinal espúrio e devem ser desconsiderados. No entanto, nos dados do parâmetro U, nesse intervalo de frequência, os picos de potências são inferiores a 6, isso significa que o período médio de 21 min em U nos dados do objeto LS Peg são inerentes ao próprio objeto tipo SW Sex.

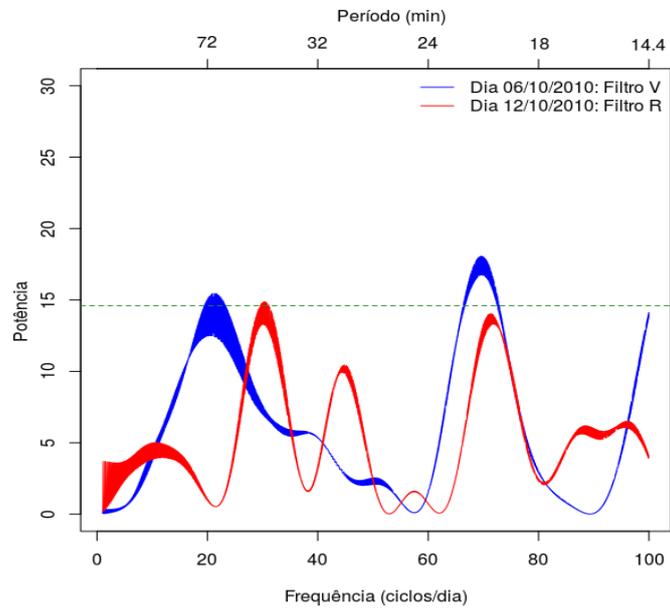
Apresentamos na Figura 3.23 o periodograma do conjunto de dados da polarização circular. No filtro V, o pico mais proeminente encontra-se em $19,04 \pm 1,02$ min, com probabilidade de falso alarme ao nível de 0,01% igual a uma potência de 14,8, o que indica que este resultado é estatisticamente significativo. Outros períodos também encontrados foram: $121,28 \pm 47,60$ min; $52,66 \pm 5,93$ min e $16,48 \pm 1,02$ min. No filtro R, o sinal em $18,84 \pm 1,25$ min é altamente significativo, a probabilidade de falso alarme em 0,01% corresponde a uma ordenada de 14,5. Nesta condição, os demais períodos presentes são; $113,40 \pm 85,21$ min; $23,22 \pm 1,50$ min; $15,84 \pm 0,87$ min.

Aplicamos o Lomb-Scargle também nos dados da polarimetria circular da estrela de campo HH95 Peg2-2, Figura 3.24. No dia 06 de outubro de 2010, em azul, dois picos de potência são relevantes, um em $25,15 \pm 1,21$ min e o outro em $17,60 \pm 1,56$ min. Como este último valor é similar ao período de $19,04 \pm 1,02$ min encontrado no filtro V de LS Peg, é provável que exista algum sinal espúrio contribuindo no intervalo de frequências entre 60 – 80 ciclo d^{-1} . No entanto, tal comportamento não é observado no filtro R, de modo que o período em $18,84 \pm 1,25$ min é sinal de LS Peg.

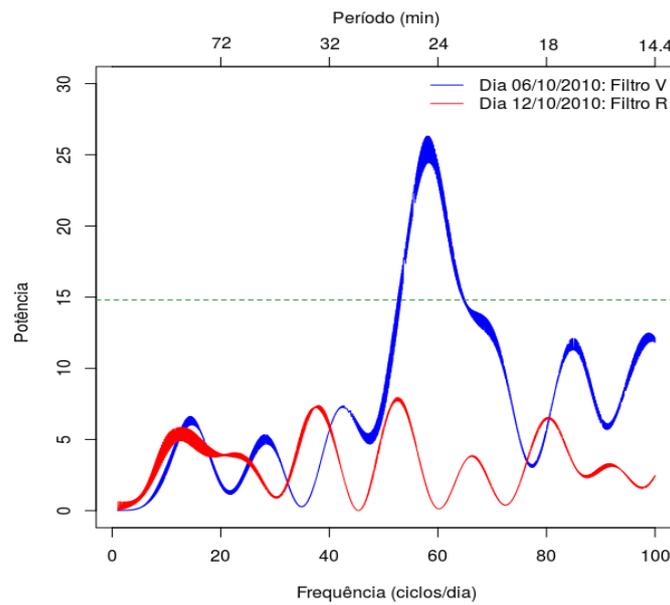
A presença de um período em torno de 19 minutos nos dados dos dias 6 e 12 de outubro de 2010 prevalece até mesmo no teste em que combinarmos os dados dos filtros R e V, mesmo sendo a polarização circular função do filtro. A Figura 3.25 mostra que o maior pico do Lomb-Scargle refere-se ao período de $18,91 \pm 1,02$ min,

indicando que o fenômeno é coerente de uma data para outra. Além disso, este período produz uma amplitude de 0,5% nesse conjunto de dados, como mostra o diagrama de fase da Figura 3.26.

As curvas de luz e de polarização linear e circular em fase do sistema LS Peg são apresentadas na Figura 3.27. Estes gráficos são obtidos por uma média suavizada no intervalo (*bin*) de fase. Usando a época de efeméride da Taylor et al. (1999), HJD, igual a $2450358.8964 \pm 0,0009$, e o período encontrado nos nossos dados polarimétricos, que em ambos os dias de observação foram aproximadamente $0,013 \text{ d}^{-1}$ ou 18,72 min.

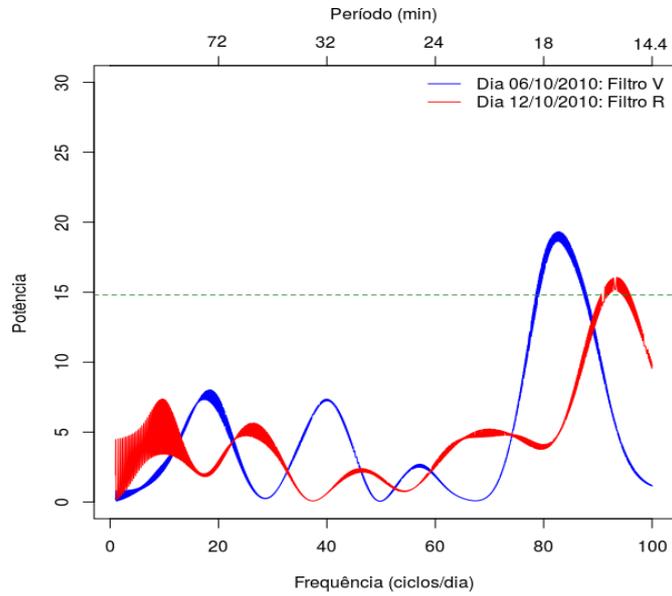


(a) Parâmetro Q

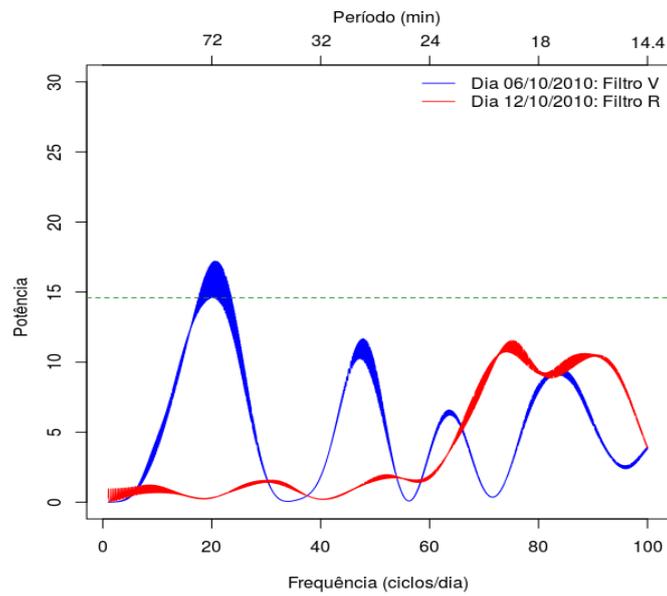


(b) Parâmetro U

Figura 3.21 - Periodogramas dos dados de polarimetria linear no sistema LS Peg, nos parâmetros de Stokes Q e U para os dias observados 06/10/2010, em azul e 12/10/2010, em vermelho. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.



(a) Parâmetro Q



(b) Parâmetro U

Figura 3.22 - Periodogramas dos dados de polarimetria linear na estrela HH95 Peg2-2, para os parâmetros de Stokes Q e U para os dias observados 06/10/2010, em azul e 12/10/2010, em vermelho. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

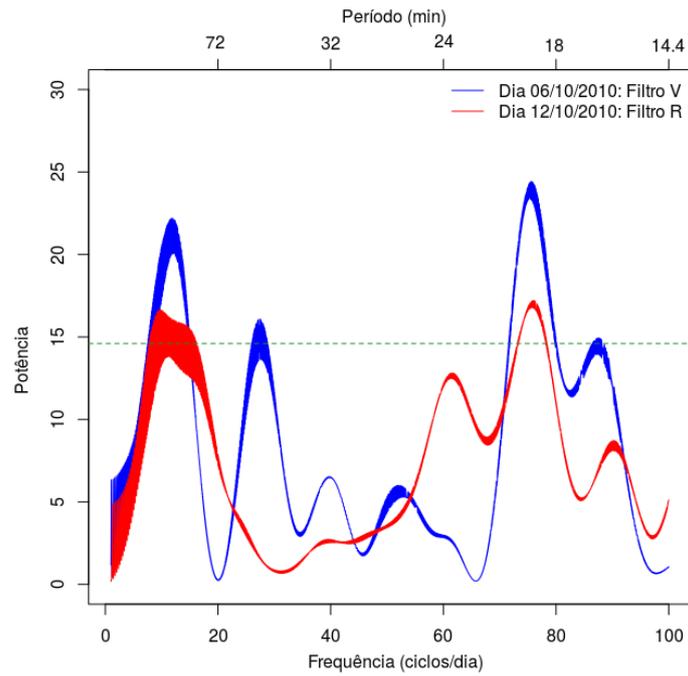


Figura 3.23 - Periodograma dos dados de polarimetria circular. Pico de potência proeminente em torno de 19 min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

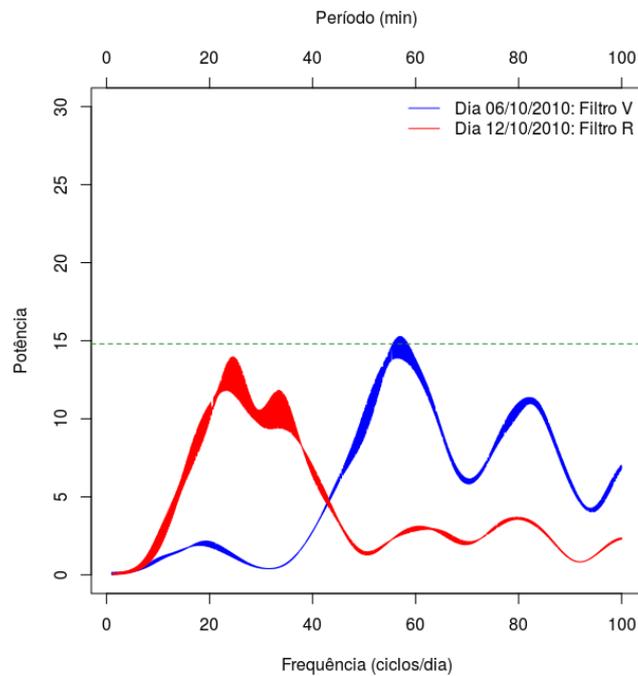


Figura 3.24 - Periodograma dos dados de polarimetria circular da estrela de campo HH95 Peg2-2. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

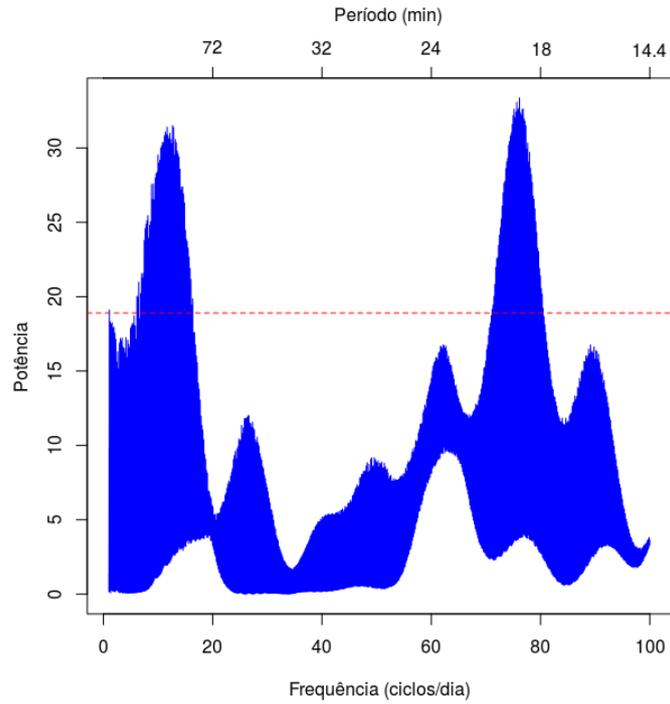


Figura 3.25 - Periodograma dos dados de todos polarimetria circular com todos os filtros. Pico de potência proeminente em 18,91 min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

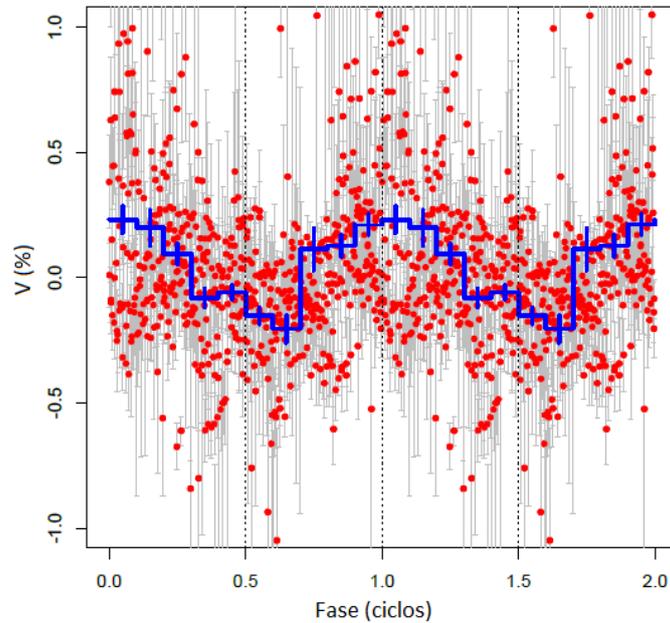
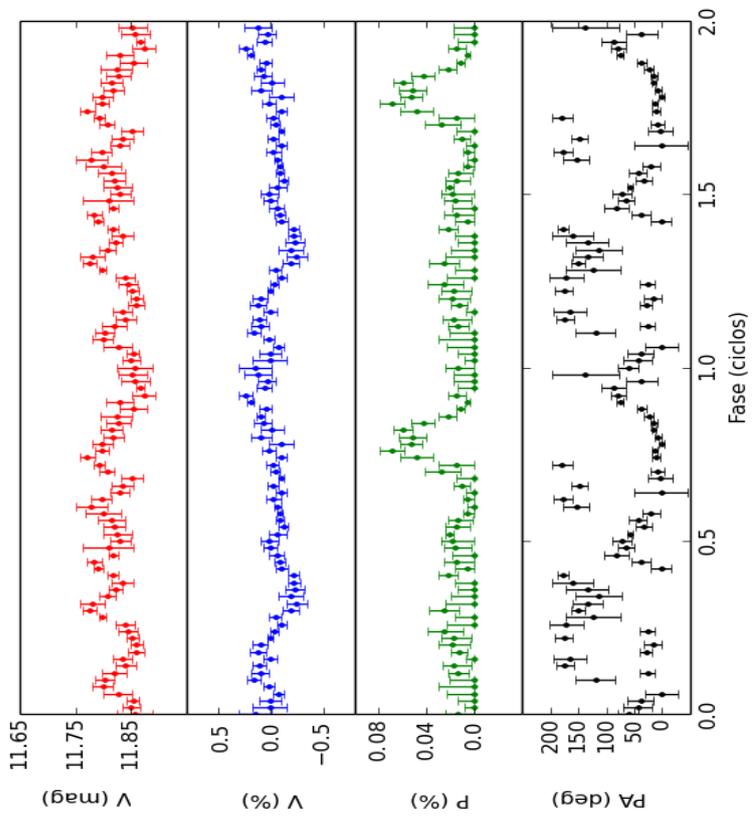
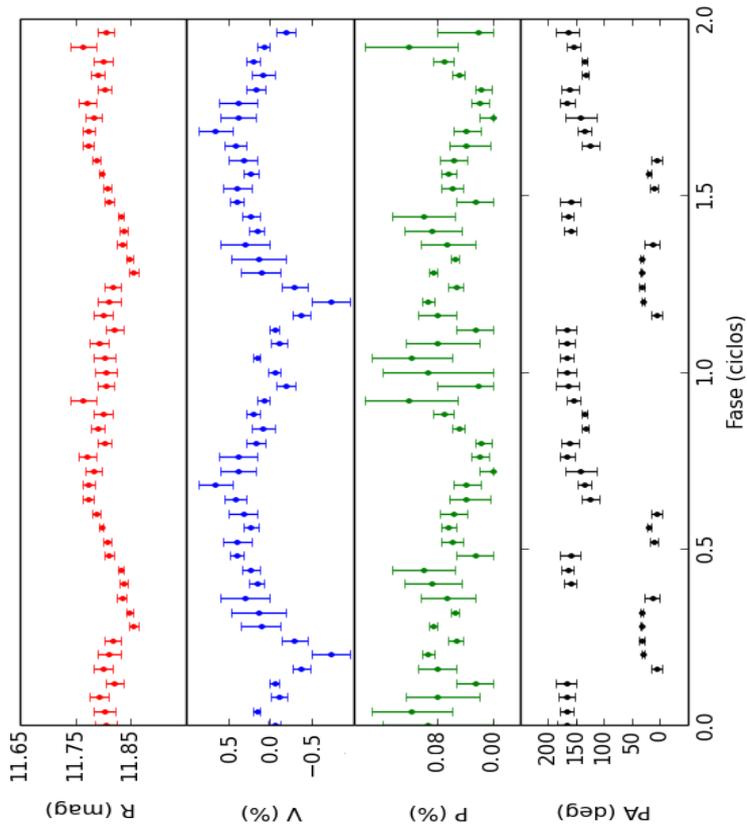


Figura 3.26 - Diagrama de fase da polarização circular do conjunto de todos os dados de LS Peg no período de 18,91 min, $T_0 = 5476.5933$ em HJD e bin=10.



(a) Dia 06/10/2010: Filtro V, bin=50



(b) Dia 12/10/2010: Filtro R, bin=25

Figura 3.27 - Diagrama de fase de LS Peg nos dois dias de observação usando o período igual a 18,72 min.

3.5 Discussão e conclusões

Neste capítulo, apresentamos uma busca por sinais de acreção magnética em LS Peg, usando fotometria diferencial e polarimetria obtida no OPD (LNA). Os métodos abordados consistiram em: (i) encontrar sinal de variabilidade intrínseca nos dados fotométricos e polarimétricos e (ii) buscar por período coerente na fotometria e na polarimetria, que possa ser associado ao período de rotação da AB.

O resultado da fotometria diferencial indica que LS Peg estava em estado alto, com magnitude em torno de 11 mag. Se LS Peg possui uma estrutura magnética que emite radiação ciclotrônica intrinsecamente polarizada, essa polarização é diluída pelo fluxo proveniente do disco. Assim, o estado de alto brilho, caso o aumento de brilho em LS Peg seja proveniente do disco, não seria favorável à detecção de polarização.

Em nossos dados, a média da polarização circular é menor que a sua dispersão. Porém, isso não é necessariamente equivalente a um valor nulo de polarização, pois se a polarização circular varia em torno de zero e se as observações são distribuídas ao longo de muitos ciclos, obtemos uma média próxima a zero. Assim, é importante verificar se existe uma componente de variabilidade intrínseca. Inicialmente, isso foi feito comparando a dispersão da polarização circular média, $\sigma_{\langle V \rangle}$, com o erro médio das medidas de polarização circular, $\langle \sigma_V \rangle$. Em seguida, aplicamos um método estatisticamente mais robusto. Em ambas as análises, a polarimetria de LS Peg mostra a existência de uma componente intrínseca e variável, estimada em $\pm 0,2\%$ no filtro V e $\pm 0,3\%$ no filtro R.

A busca por sinais periódicos revelou a presença de uma componente com período da ordem de 20 min, tanto na fotometria diferencial quanto na polarimetria de LS Peg. A Tabela 3.4 mostra os valores combinando os dois filtros utilizados. É interessante notar que os períodos fotométrico e polarimétrico são bastante parecidos e praticamente idênticos, considerando as barras de erro. Porém, o período fotométrico é também consistente com o batimento entre o período da polarização e o orbital (20,4 min). A amplitude da polarização circular é da ordem de 0,2%, ligeiramente menor que a encontrada por [Rodríguez-Gil et al. \(2001\)](#), na banda B. Essas diferenças na amplitude não chegam a ser inconsistentes considerando que os dados correspondem a distintas regiões espectrais e eventualmente diferentes estados de brilho.

Na Tabela 3.4, apresentamos um resumo com todos os períodos disponíveis na litera-

tura e os resultados encontrados neste trabalho. É evidente a presença de um período fotométrico da ordem de 20 min em vários trabalhos. Alguns autores interpretaram-no como devido à rotação da anã branca, mas a não-coerência dessa modulação, apresentada em trabalhos subsequentes, levou à interpretação que essa variabilidade seria devida as OQPs. Isso foi de certo modo reforçado por [Rodríguez-Gil et al. \(2001\)](#) que encontra a polarização circular modulada em torno de 30 min. Como a polarização circular é sempre interpretada como o P_{rot} , a rotação da AB seria de 30 min e não de 20 min. Porém, nossos resultados confirmam a presença de polarização circular, modulada em torno de 20 min. Assim, os nossos resultados reacendem a discussão sobre a origem da variabilidade em LS Peg. É importante ressaltar que os dados de [Rodríguez-Gil et al. \(2001\)](#) não tem resolução temporal para encontrar o período de 20 min, pois a frequência de Nyquist corresponde a um período de 20 min. Por outro lado, o período em raios X encontrado por [Baskill et al. \(2005\)](#), da ordem de 31 min, tem como explicação mais plausível a rotação da AB.

Tabela 3.4 - Períodos encontrados para LS Peg.

Períodos	Tipo de dados	Interpretação	Referência
4,2 h	Espectroscopia	Período orbital	Szkody (1995)
19 min	Fotometria	Período de rotação da AB	Garnavich e Szkody (1992)
20,7 min	Fotometria	OQPs	Taylor et al. (1999)
29,6 min	Pol. Circular	Período de rotação da AB	Rodríguez-Gil et al. (2001)
33,5 min	Espectroscopia	Período de batimento	Rodríguez-Gil et al. (2001)
30,9 min	Raios X	Período de rotação da AB	Baskill et al. (2005)
$20,3 \pm 1,1$ min	Fotometria	Período de rotação da AB	Este trabalho
$18,9 \pm 1,0$ min	Pol. Circular	Período de rotação da AB	Este trabalho

Poderia o período da AB de LS Peg estar variando? Isso é observado em várias PIs, onde o período da anã branca varia ao longo do tempo, crescendo (*spin up*) e/ou decrescendo, *spin down* ([MUKAI, 2014](#); [PATTERSON, 1994](#), por exemplo). Porém, não se espera um variação de 20 para 30 min ([PATTERSON, 1991](#), por exemplo). Por outro lado, algumas PIs com alta taxa de acreção, como AE Aqr, GK Per e V795 Her, também apresentam oscilações quasi-periódicas. Um possível explicação para oscilações de período constante, mas incoerentes, seria a variação da localização da região pós-choque sobre a superfície da AB devido as alterações na região de acoplamento decorrentes da mudança do raio da magnetosfera devido à variação da densidade do fluxo na região do acoplamento.

4 CURVAS DE LUZ E POLARIZAÇÃO

Neste capítulo, iremos apresentar os resultados e a análise preliminar dos dados fotométricos e polarimétricos dos outros objetos tipo SW Sex estudados. Na Seção 4.1, abordamos o sistema 1H 0204-023; na Seção 4.2, o objeto SW Sex; na Seção 4.3, apresentamos o sistema V442 Oph e na Seção 4.4, V380 Oph. Algumas propriedades destes sistemas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades dos objetos tipo SW Sex estudados neste capítulo.

Objeto	P_{orb} (h)	i (°)	M_1 (M_{\odot})	M_2 (M_{\odot})	\dot{M} ($M_{\odot}ano^{-1}$)	d (pc)	Referência
1H 0204-023	3,36	35-52	0,75	0,22	-	438	1,5
V380 Oph	3,70	42 ± 13	$0,58 \pm 0,19$	-	1×10^{-9}	648	2,5
V442 Oph	2,98	75	0,4	0,2	1×10^{-8}	437	3,4,5
SW Sex	3,24	> 75	0,44	0,3	3×10^{-9}	584	4,5,6

Legenda:

P_{orb} - Período orbital;

i- Ângulo de inclinação do objeto em relação à linha de visada;

M_1 - Massa da primária;

M_2 - Massa da secundária;

\dot{M} - Taxa de transferência de matéria para a primária;

d- distância;

1-Rodríguez-Gil et al. (2007b);

2-Zellem et al. (2009);

3-Hoard et al. (2014);

4-Ballouz e Sion (2009);

5-Ak et al. (2008);

6-Groot et al. (2001).

4.1 1H 0204-023

O sistema 1H 0204-023 foi classificado como uma VC do tipo *novalike* por Downes et al. (2005). Espectros no óptico mostram contínuo no azul, presença da linha He II $\lambda 4686$ em emissão, semelhante às VCs magnéticas, e linhas de emissão com picos simples e duplos, sendo um sistema não eclipsante (RODRÍGUEZ-GIL et al.,

2007b).

Oscilações rápidas de aproximadamente 15 a 20 minutos são observadas nas curvas de velocidade radial nas bordas da linha H α (*flarings*). Nos dados de Rodríguez-Gil et al. (2007b), os periodogramas da velocidade radial exibem duas frequências; a orbital em torno de 7,15 d^{-1} equivalente ao período de 0,1398 d e em 72,5 d^{-1} , correspondendo ao período de $19,9 \pm 0,9$ min, que é estatisticamente coerente com e sem a presença do período orbital. A curva de velocidade radial em fase com 19,9 min apresentam amplitudes que variam entre ± 400 km s $^{-1}$, como mostra a Figura 4.1. Os autores interpretam esse resultado como o possível período de rotação da AB.

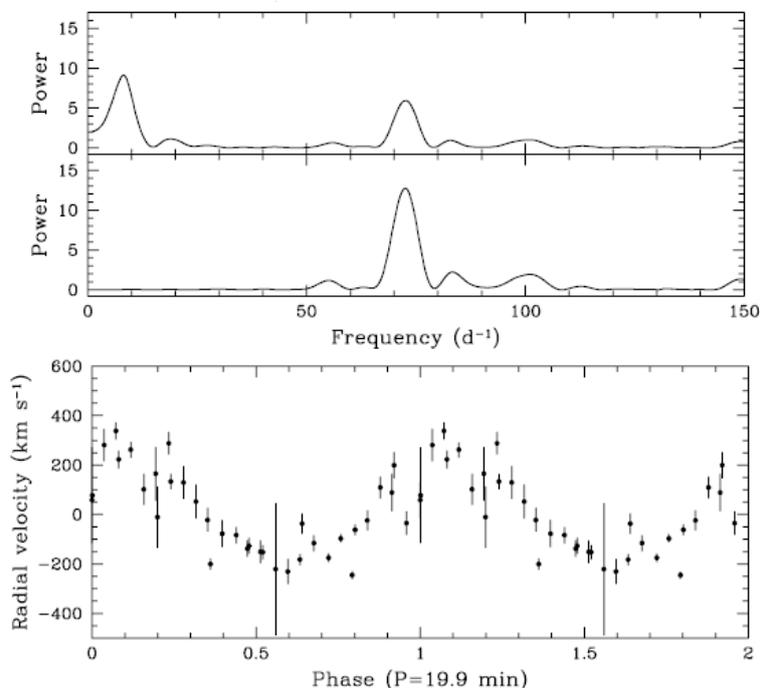


Figura 4.1 - Periodograma da linha H α do sistema 1H 0204-023, com e sem a frequência orbital (7,15 d^{-1}) existe um período de $19,9 \pm 0,9$ min como mostram os painéis superiores. No painel inferior, curva de velocidade radial em fase com o período de 19,9 min.

Fonte: Rodríguez-Gil et al. (2007b).

4.1.1 Fotometria diferencial

Nos catálogos NOMAD e USNO-A2.0, usados na calibração fotométrica, a magnitude do sistema 1H 0204-023 é 12,9 mag no filtro V e 13,4 mag no filtro R. Em nossos dados, compostos por duas noites de observações em cada filtro (vide, Tabela 2.1), as magnitudes encontradas foram: no filtro V, $14,16 \pm 0,02$ mag e $15,13 \pm 0,02$ mag;

no filtro R, $14,47 \pm 0,03$ mag e $14,25 \pm 0,03$ mag. Os erros apresentados é o desvio padrão das magnitudes das estrelas de campo com magnitude similar a 1H 0204-023 e não é incluso a variabilidade intrínseca da VC e nem o erro de calibração. Em média, o erro da calibração absoluta é 0,5 mag no filtro V e 0,6 mag no filtro R. Este resultado é calculado pelo desvio padrão do Δ_{mag} das estrelas de campo. Sendo Δ_{mag} , a diferença das magnitudes medidas (mag_{med}) e as encontradas na literatura (mag_{lit}), Tabela 4.2. Nesta tabela, os valores de mag_{med} é a média ponderada com seus os erros dos dois dias de observação.

As magnitudes do sistema 1H 0204-023, em média, são $14,64 \pm 0,02$ mag e $14,38 \pm 0,03$ mag, respectivamente no filtro V e no filtro R. Estes resultados são consistentes com o intervalo de magnitude encontrado em Downes et al. (2005) de 14 a 15 mag e com as magnitudes existentes no banco de dados do AASVO (*American Association of Variable Star Observers*).

A estrela de referência escolhida, 0879-0037361, mostrou ser intrinsecamente invariável: as curvas de luz das estrelas de campo e a do objeto 1H 0204-023, Figura 2.9 – pág. 40, apresentam distintas variabilidades, evidência de que não há efeito introduzido pela estrela de referência escolhida.

Tabela 4.2 - Magnitudes das estrelas de campo em 1H 0204-023.

Estrelas de campo	Filtro	mag_{med}	mag_{lit}	Δ_{mag}	Catálogo
0879-0037361	V	-	15,1	-	NOMAD
	R	-	14,4	-	USNO-A2.0
0879-0037409	V	$18,52 \pm 0,02$	17,97	0,55	NOMAD
	R	$17,62 \pm 0,02$	18,20	-0,58	USNO-A2.0
0879-0037413	V	$18,52 \pm 0,02$	17,97	0,55	NOMAD
	R	$16,89 \pm 0,01$	17,90	-1,01	USNO-A2.0
0879-0037423	V	$14,39 \pm 0,02$	14,34	0,05	NOMAD
	R	$13,59 \pm 0,01$	14,00	-0,41	USNO-A2.0
0879-0037427	V	$17,10 \pm 0,08$	16,91	0,19	NOMAD
	R	$16,52 \pm 0,02$	16,00	0,52	USNO-A2.0
0879-0037424	V	$18,06 \pm 0,02$	17,97	0,09	NOMAD
	R	$17,52 \pm 0,08$	18,50	-0,98	USNO-A2.0

As curvas de luz do objeto são mostradas nos painéis superiores da Figura 4.2 e da Figura 4.3, respectivamente nos filtros V e R. Além da presença do *flickering*, comum nas VCs, apenas no filtro V, nota-se um aumento de 1 mag num intervalo

de 6 dias, analisando os objetos de campo este comportamento é presente apenas no objeto tipo SW Sex.

4.1.2 Polarimetria

O objeto 1H 0204-023 não tem na literatura medidas de polarização circular. A Tabela 4.3 apresenta as médias da polarização circular e linear para as quatro noites de observação nos filtro V e R. Esses valores em média ponderada com o erro são: no filtro V, dias 06 e 11 de outubro de 2010, $-0,052 \pm 0,037\%$ e no filtro R, dias 05 e 12 de outubro de 2010, $0,057 \pm 0,040\%$. Estas medidas não são devido à polarização instrumental, pois as estrelas de campo apresentam distintos valores de $\langle V \rangle$. Além disso, os resultados do sistema 1H 0204-023 são consistentes com zero, mas como discutido na Seção 3.3 para LS Peg, se a polarização for variante em torno de zero ao longo dos ciclos, a média torna-se próxima de zero. Assim é a existência de variabilidade intrínseca que melhor determina a presença de variabilidade.

A busca de variabilidade usando o método de [Almaini et al. \(2000\)](#) não foi realizada nesse objeto, mas uma análise nos parâmetros estatísticos $\sigma_{\langle V \rangle}$ e $\langle \sigma_V \rangle$, em geral, indicam que existe variabilidade na polarização circular.

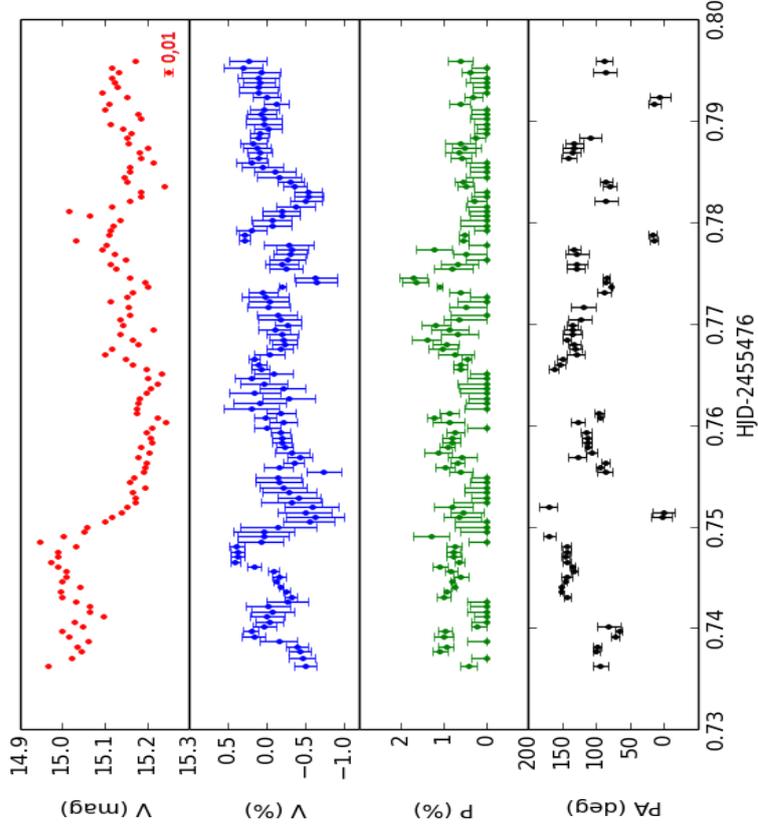
Tabela 4.3 - Resultado da polarização para o sistema 1H 0204-023.

Objetos	Data	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)	$\langle Q \rangle$ (%)	$\langle U \rangle$ (%)
1H 0204-023	06/10/2010	-0,008	0,210	0,145	0,066	$0,357 \pm 0,023$	$-0,042 \pm 0,023$
0879-0037361		0,058	0,336	0,267	0,145	$0,283 \pm 0,031$	$-0,334 \pm 0,044$
0879-0037423		0,025	0,289	0,201	0,138	$0,260 \pm 0,024$	$-0,154 \pm 0,027$
1H 0204-023	11/10/2010	-0,112	0,246	0,209	0,089	$-0,031 \pm 0,042$	$-0,324 \pm 0,039$
0879-0037361		0,061	0,256	0,198	0,077	$-0,269 \pm 0,044$	$0,071 \pm 0,042$
0879-0037423		-0,014	0,214	0,151	0,056	$0,126 \pm 0,026$	$-0,056 \pm 0,038$
1H 0204-023	05/10/2010	0,092	0,200	0,125	0,097	$0,180 \pm 0,054$	$-0,088 \pm 0,029$
0879-0037361		-0,029	0,160	0,093	0,108	$0,273 \pm 0,039$	$-0,204 \pm 0,045$
0879-0037423		0,112	0,227	0,074	0,128	$0,020 \pm 0,052$	$-0,053 \pm 0,024$
1H 0204-023	12/10/2010	0,022	0,300	0,167	0,075	$0,183 \pm 0,030$	$-0,163 \pm 0,043$
0879-0037361		0,089	0,291	0,182	0,094	$-0,010 \pm 0,032$	$-0,151 \pm 0,039$
0879-0037423		0,006	0,193	0,111	0,051	$0,148 \pm 0,018$	$-0,122 \pm 0,025$

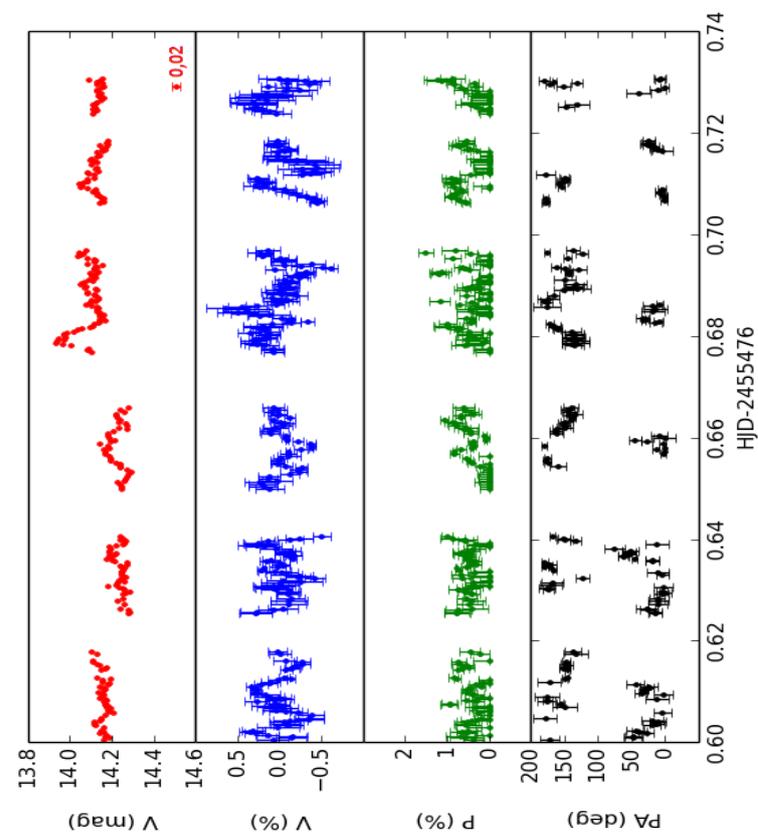
As curvas de polarização circular, linear e o ângulo de posição são apresentadas na Figura 4.2 para o filtro V e na Figura 4.3 para o filtro R. Comparando essas curvas

com as obtidas da estrela de campo, 0879-0037423, Figura 4.4 e na Figura 4.5, verificamos que no filtro R o resultado do objeto de ciência é consistente, pois V , em 0879-0037423 é próximo de zero. Já no filtro R, principalmente no dia 11, existe uma aparente variabilidade na estrela de comparação, que torna a variabilidade observada no objeto de ciência pouco confiável.

Analisando as curvas notamos que os picos de polarização circular são concentrados no intervalo de $\pm 0,5\%$. Os picos de polarização linear (P) aumentam quando V é igual a zero. Este fenômeno ocorre em polares, e é explicado pelas propriedades da emissão ciclotrônica proveniente de uma região vista numa linha de visada que varia. Além disso, comparando as curvas do filtro V, no dia 11, em que a magnitude do objeto está em estado mais baixo de brilho, nota-se uma maior variabilidade nos dados. Os ângulos de polarização não são preferencialmente direcionados nem nos objetos de ciência e nem nas estrelas de campo, isso mostra que possivelmente não há polarização linear no meio interestelar.

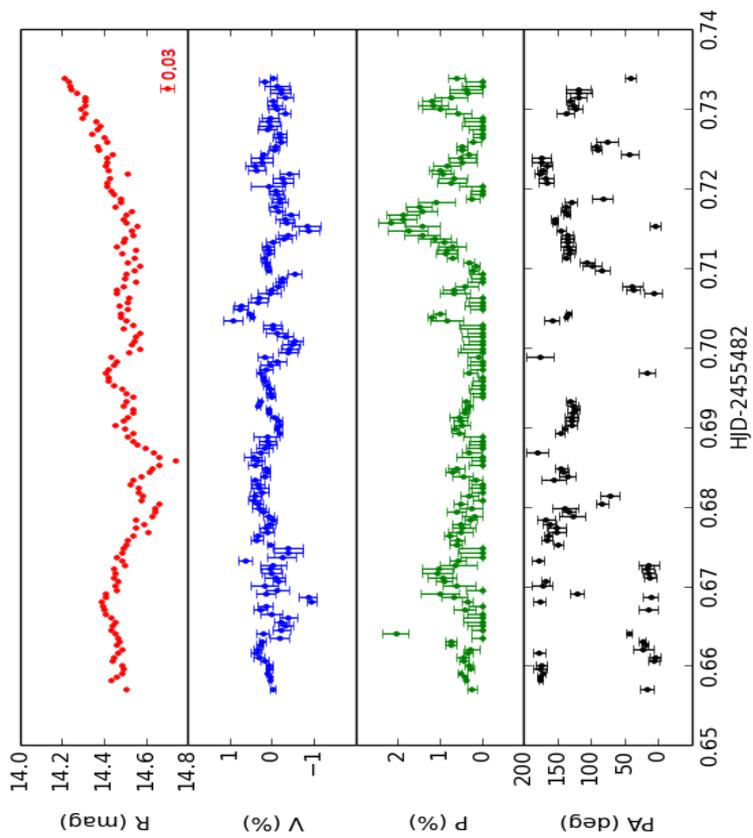


(b) Dia 11/10/2010

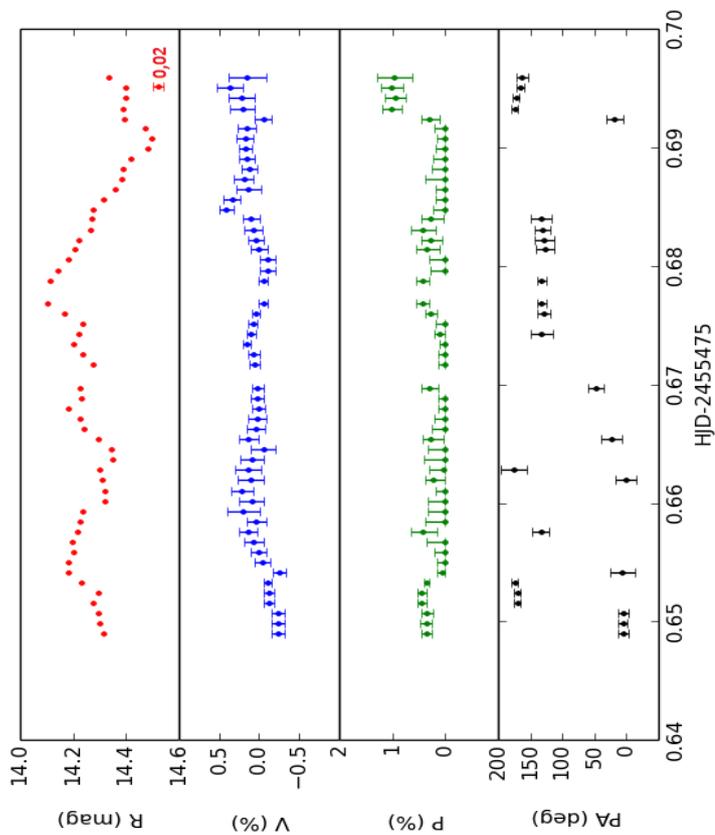


(a) Dia 06/10/2010

Figura 4.2 - Curvas de luz e polarização de 1H 0204-023 no filtro V.

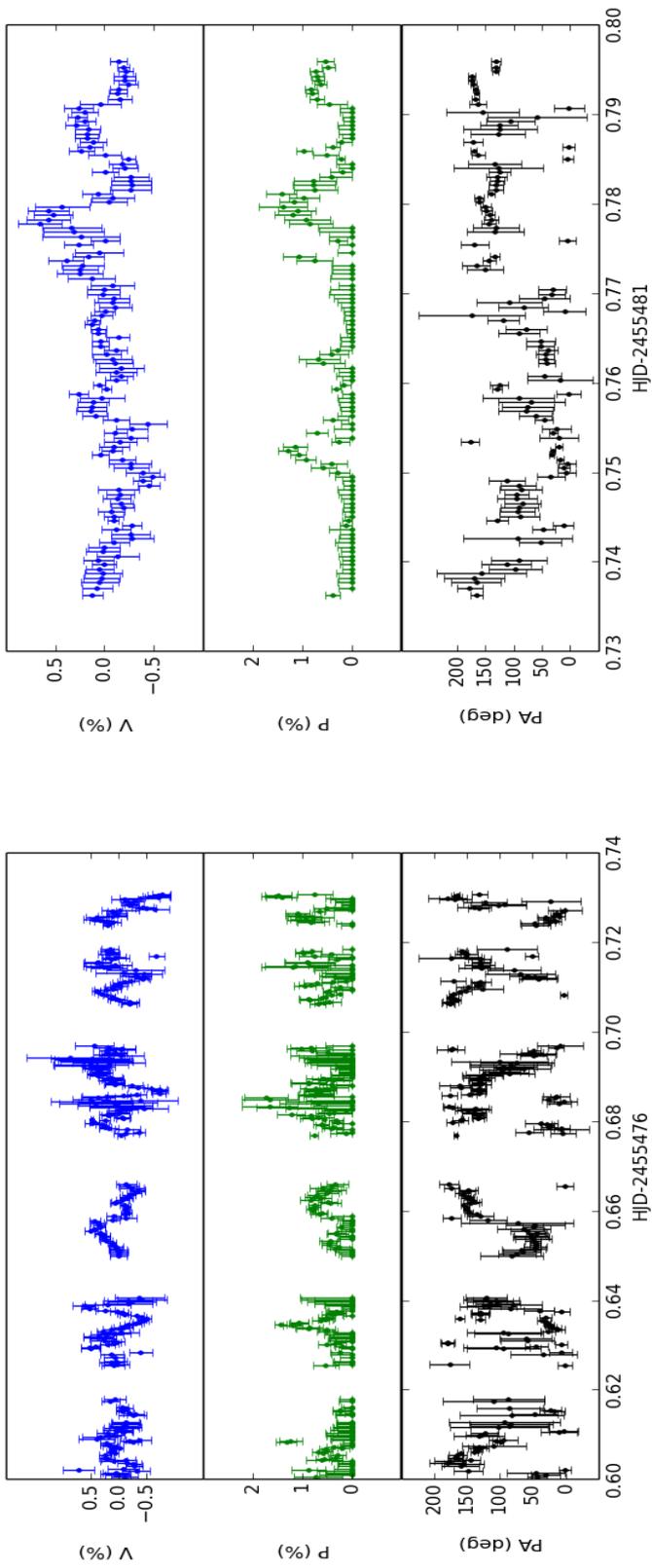


(b) Dia 12/10/2010



(a) Dia 05/10/2010

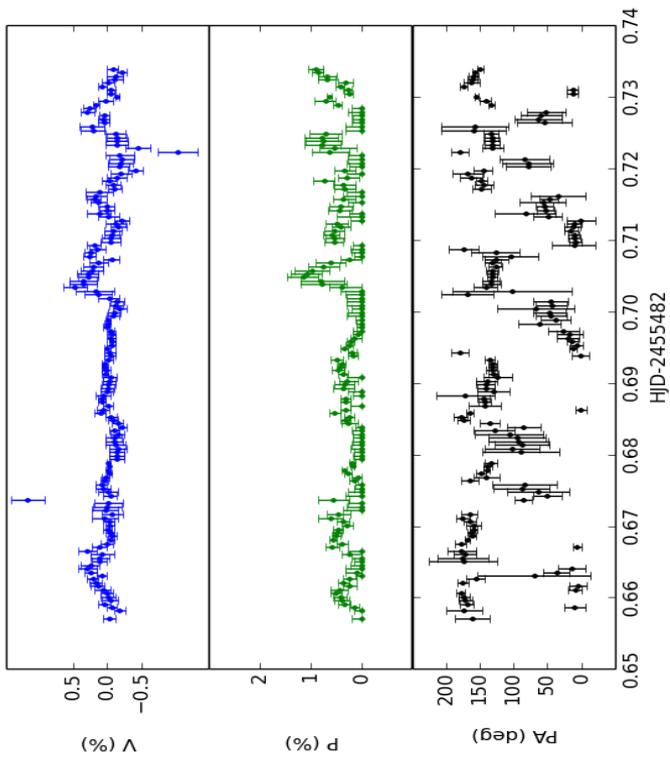
Figura 4.3 - Curvas de luz e polarização de 1H 0204-023 no filtro R.



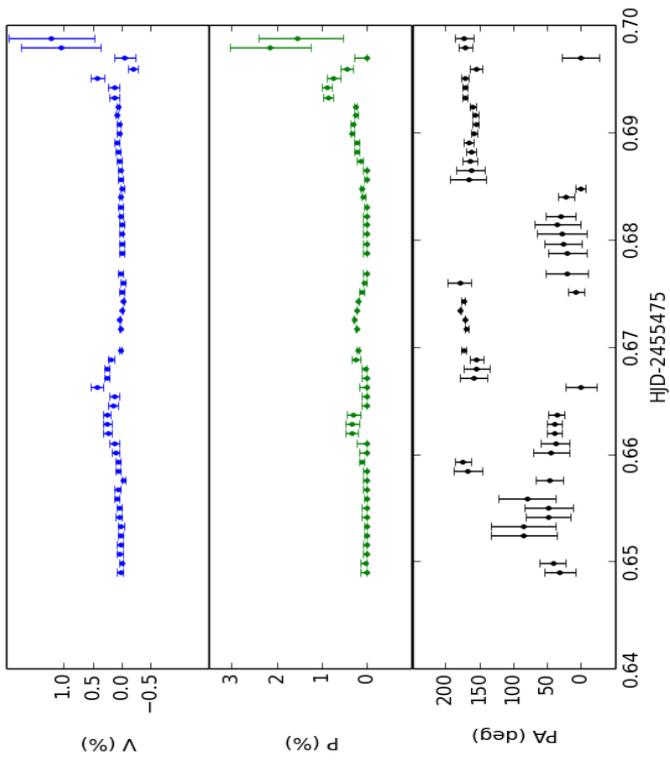
(a) Dia 06/10/2010

(b) Dia 11/10/2010

Figura 4.4 - Curvas de polarização da estrela 0879-0037423 presente no campo do sistema 1H 0204-023 no filtro V.



(b) Dia 12/10/2010



(a) Dia 05/10/2010

Figura 4.5 - Curvas de polarização da estrela 0879-0037423 presente no campo do sistema 1H 0204-023 no filtro R.

4.1.3 Busca por sinais periódicos

A busca por sinal periódico nos dados fotométricos e polarimétricos do sistema 1H 0204-023 foi realizada pelo método Lomb-Scargle, maiores detalhes na Seção 3.4.2. Na fotometria, o periodograma para todos os dias observados é apresentado na Figura 4.6: dia 05, em azul; dia 6, em vermelho; dia 11, em verde e dia 12, em preto. As potências acima de 13 indicam os período prováveis, com falso alarme de 0,01%, os períodos com potência inferior não foram considerados na análise. As frequências comuns em todos os conjuntos de dados foram em; 0 – 20 ciclos dias⁻¹, de período da ordem de centenas minutos, representando a metade do período orbital e em 20 – 40 ciclos dias⁻¹, de período em torno de 47 a 50 minutos. Esse valor é também consistente ao somarmos todos os dados fotométricos, mesmo sendo em filtros diferentes. Na Figura 4.7, os períodos encontrados são: $182,1 \pm 25$ min e $49,34 \pm 17,12$ min.

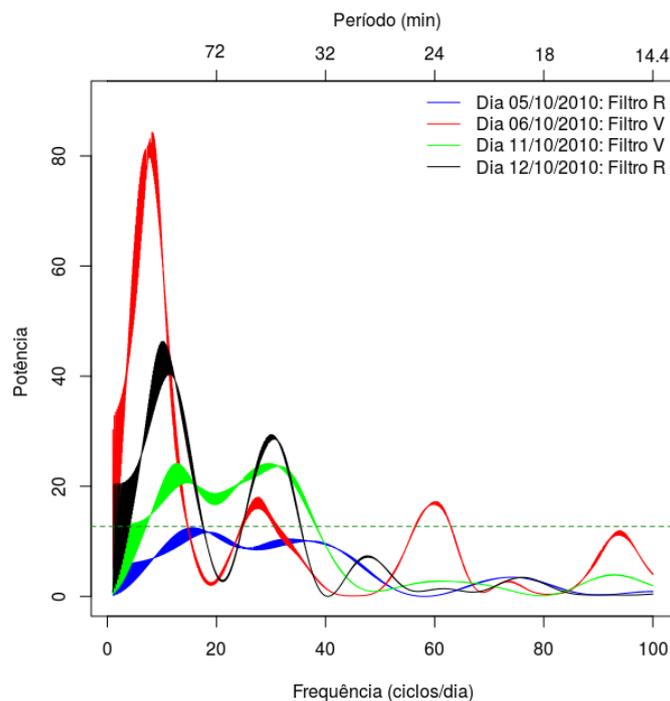


Figura 4.6 - Periodograma dos dados fotométricos do sistema 1H 0204-023 para cada dia observado; em azul, dia 05; em vermelho, dia 6; em verde, dia 11 e em preto, dia 12. Existe um sinal periódico em 28 – 30 ciclos dias⁻¹. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

Analisando o periodograma da estrela de campo, Figura 4.8, notamos que em sua maioria, os períodos encontrados no objeto de ciência não estão presentes na estrela de campo, de modo que estes períodos são do próprio objeto variável. No dia 12 de outubro de 2010, entretanto temos o período próximo de 136 min encontrado na estrela de campo, que devem portanto ser sinal espúrio nos dados.

Na polarimetria, por influência do trabalho do [Rodríguez-Gil et al. \(2007b\)](#), concentramos nossa busca principalmente no intervalo de frequência entre 60 – 80 ciclos d^{-1} , para buscar o período em torno de 20 min, que os autores encontram nos *flarings* da linha $H\alpha$. O periodograma dos dados por dia observado é apresentado na Figura 4.9, este resultado mostra evidência no período mencionado, mesmo que o sinal não tenha atingido picos de potência estatisticamente significativo.

O periodograma por filtro dos dados polarimétricos é apresentada na Figura 4.10. Os períodos encontrados são: no filtro V, com potência acima de 13 (falso alarme em 0,01%), $91,18 \pm 22,5$ min; $59,18 \pm 12,78$ min; $33,09 \pm 3,04$ min; e $20,97 \pm 1,50$ min e no filtro R, $32,99 \pm 3,03$ min e no filtro R, com potência superior a 10, $106,48 \pm 31,60$ min e $22,05 \pm 2,32$ min. Portanto, nos dados da polarização circular por filtro encontramos o período na ordem de 20 min. No entanto, o periodograma da estrela de campo, Figura 4.11, também apresenta o período de 20 min.

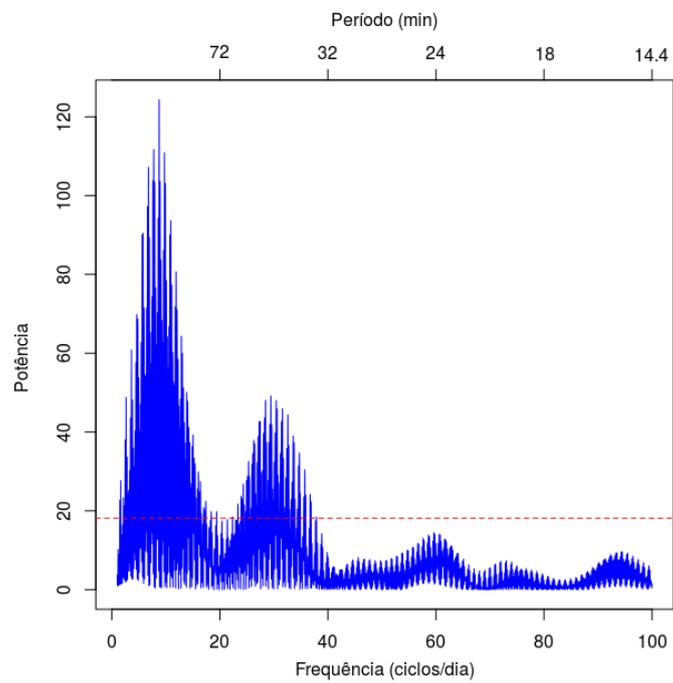


Figura 4.7 - Periodograma com todo o conjunto de dados fotométricos do sistema 1H 0204-023. Os períodos com potência acima de 20, representando falso alarme de 0,01% são: $182,1 \pm 225$ min e $49,34 \pm 17,12$ min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

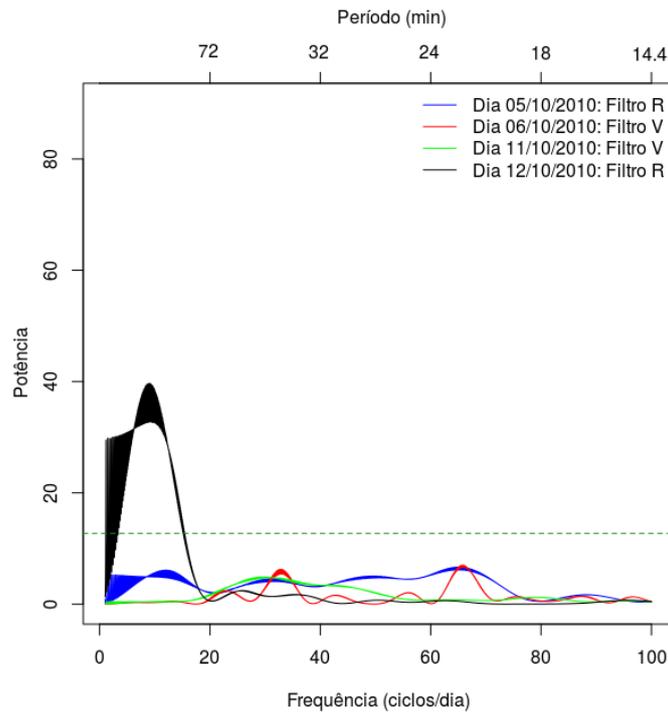


Figura 4.8 - Periodograma dos dados fotométricos da estrela de campo, 0879-0037423, do sistema 1H 0204-023. O pico proeminente no dia 12/10/2010 é aproximadamente 136 min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

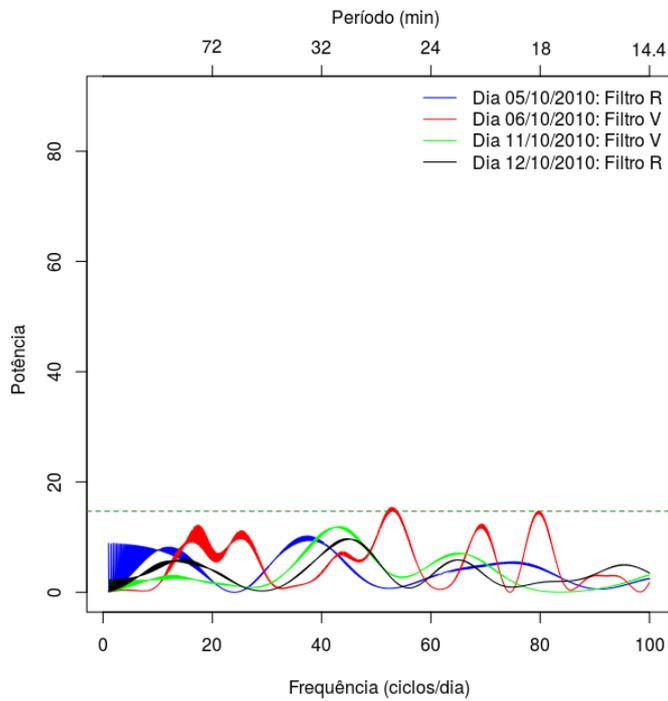


Figura 4.9 - Periodograma dos dados polarimétricos do sistema 1H 0204-023. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

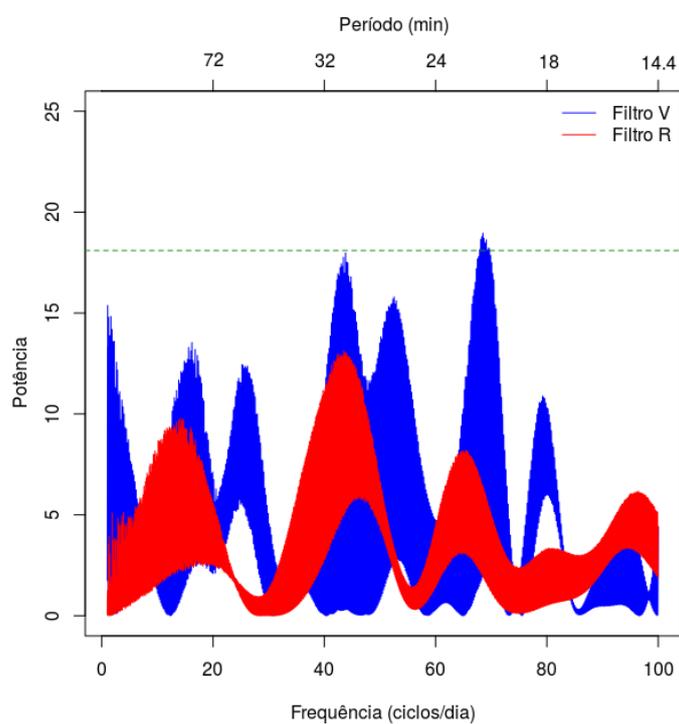


Figura 4.10 - Periodograma por filtro dos dados polarimétricos do sistema 1H 0204-023. Em azul, filtro V e em vermelho, filtro R. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

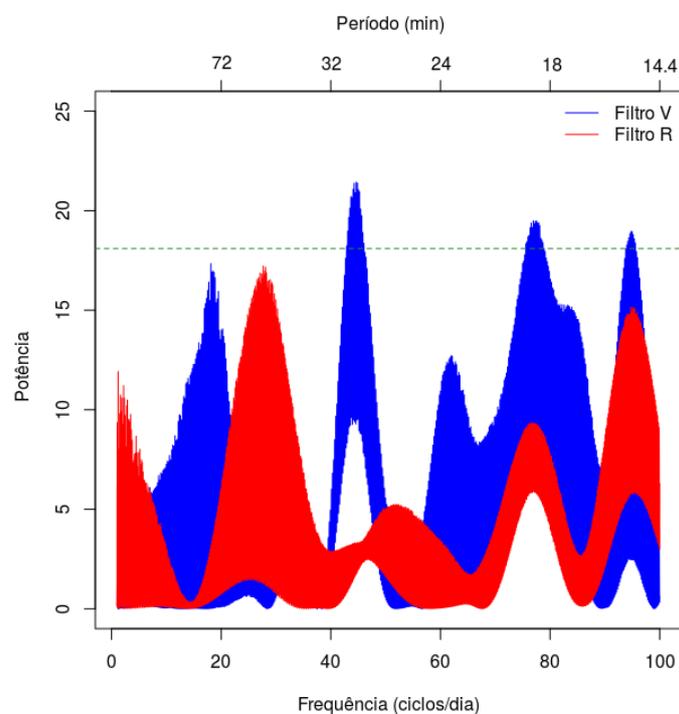


Figura 4.11 - Periodograma por filtro dos dados polarimétricos da estrela de campo do sistema 1H 0204-023 por filtro. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

4.2 SW Sex

O sistema SW Sex, protótipo da subclasse, foi descoberto como um objeto com excesso de UV, linhas em emissão de alta excitação, com a linha de He II λ 4686 sendo duas vezes mais intensa que a linha H β , e picos de emissão simples, mesmo apresentando eclipses profundos e assimétricos (GROOT et al., 2001).

Em Dhillon et al. (2013), os espectros das linhas de Balmer mostram a presença de duas componentes emissoras de velocidades: em 300 km s^{-1} , a emissão mais forte na Figura 4.12 e a outra em -400 km s^{-1} , a emissão mais fraca. Os autores interpretam estes componentes, presentes também nos eclipses, como resultado da emissão do disco de acreção e de uma mancha quente extensa. Além disso, não foi encontrado periodicidade nos *flarings* das linhas em emissão.

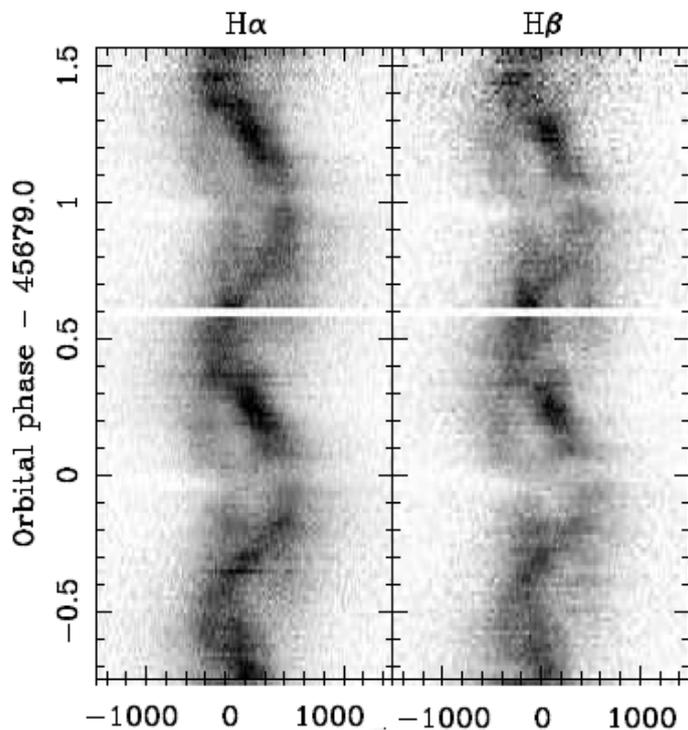


Figura 4.12 - Curva de velocidade radial das linhas H α e H β mostrando duas componentes emissoras, a mais forte em 300 km s^{-1} e a mais fraca em -400 km s^{-1} .

Fonte: Dhillon et al. (2013)

4.2.1 Fotometria diferencial

Os primeiros resultados fotométricos do sistema SW Sex indicam uma magnitude no filtro V igual a 14,8 mag, com a profundidade dos eclipses em 1,9 magnitudes

(DHILLON et al., 1997).

No filtro R, a magnitude disposta no catálogo NOMAD é 14,15 mag. Já o resultado calibrado em nossos dados foi $14,63 \pm 0,08$. Esse erro não inclui a dispersão intrínseca da VC e o erro de nível, que é 0,17 mag. A Tabela 4.13 apresenta a fotometria da estrelas de campo usadas no cálculo desses erros. A curva de luz de SW Sex apresentada na Figura 4.1.1 –painel superior– inclui parcialmente dois eclipses.

Tabela 4.4 - Magnitudes das estrelas de campo em SW Sex no filtro R.

Estrelas de campo	Mag_{med}	Mag_{lit}	Δ_{mag}	Catálogo
SW Sex-2	-	12,93	-	NOMAD
0868-0242123	$15,97 \pm 0,55$	15,86	0,11	NOMAD
0868-0242128	$16,84 \pm 0,78$	16,56	0,28	NOMAD
0868-0242131	$16,74 \pm 0,70$	17,93	-1,19	NOMAD

4.2.2 Polarimetria

A primeira medida de polarização circular no óptico do objeto SW Sex foi realizada por Stockman et al. (1992) na banda $\lambda\lambda$ 3200 – 8600 Å, cujo resultado em 16 min de integração mostrou-se consistente com zero, com V igual a $-0,02 \pm 0,09$ %. Em Thorstensen et al. (1991), com uma hora de observação centrada no eclipse na banda $\lambda\lambda$ 3200–8600 Å, a polarização circular encontrada foi $0,06 \pm 0,04$ %, também próxima a zero.

Neste trabalho, a média da polarização circular encontrada foi $-0,043 \pm 0,805\%$, apresentando sinal de variabilidade intrínseca, com a dispersão de V aproximadamente 3 vezes maior que o erro médio. Além disso, os resultados das estrelas de campo não indicam polarização circular espúria causada pelo instrumento.

Nas curvas de polarização, Figura 4.13, foram desconsiderados da análise um conjunto de pontos em HJD pertencentes aos intervalos entre 0,58 – 0,60. Esses pontos também estão presentes nas curvas das estrelas de campo, como mostra a Figura 4.14(a) e devem ser resultado de imagens com baixa qualidade. Na curva de polarização circular picos significativos estão variando em torno de $\sim 1\%$ são medidos.

Na polarimetria linear, os parâmetros de Stokes Q e U apresentam valores mé-

dios consistentes com zero, mas variável, com pico maiores em V igual a zero, na Figura 4.13. Como descrito anteriormente, esse é um efeito comum na emissão ciclônica em polares.

Tabela 4.5 - Resultado da polarização do sistema SW Sex.

Objetos	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)	$\langle Q \rangle$ (%)	$\langle U \rangle$ (%)
SW Sex	-0,043	0,805	0,289	0,203	$-0,054 \pm 0,083$	$-0,057 \pm 0,075$
SW Sex-2	-0,019	0,258	0,140	0,159	$0,036 \pm 0,041$	$0,071 \pm 0,067$
SW Sex-7	-0,018	1,099	0,549	0,231	$-0,501 \pm 0,116$	$0,361 \pm 0,136$

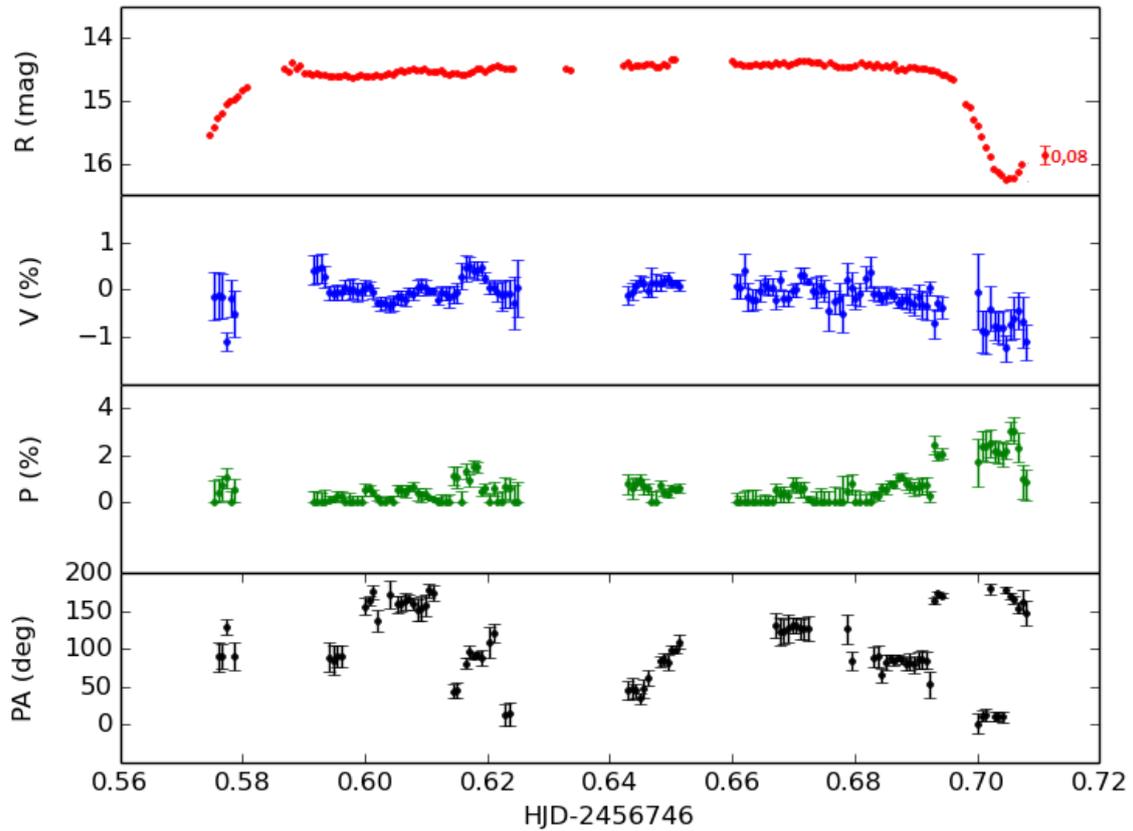
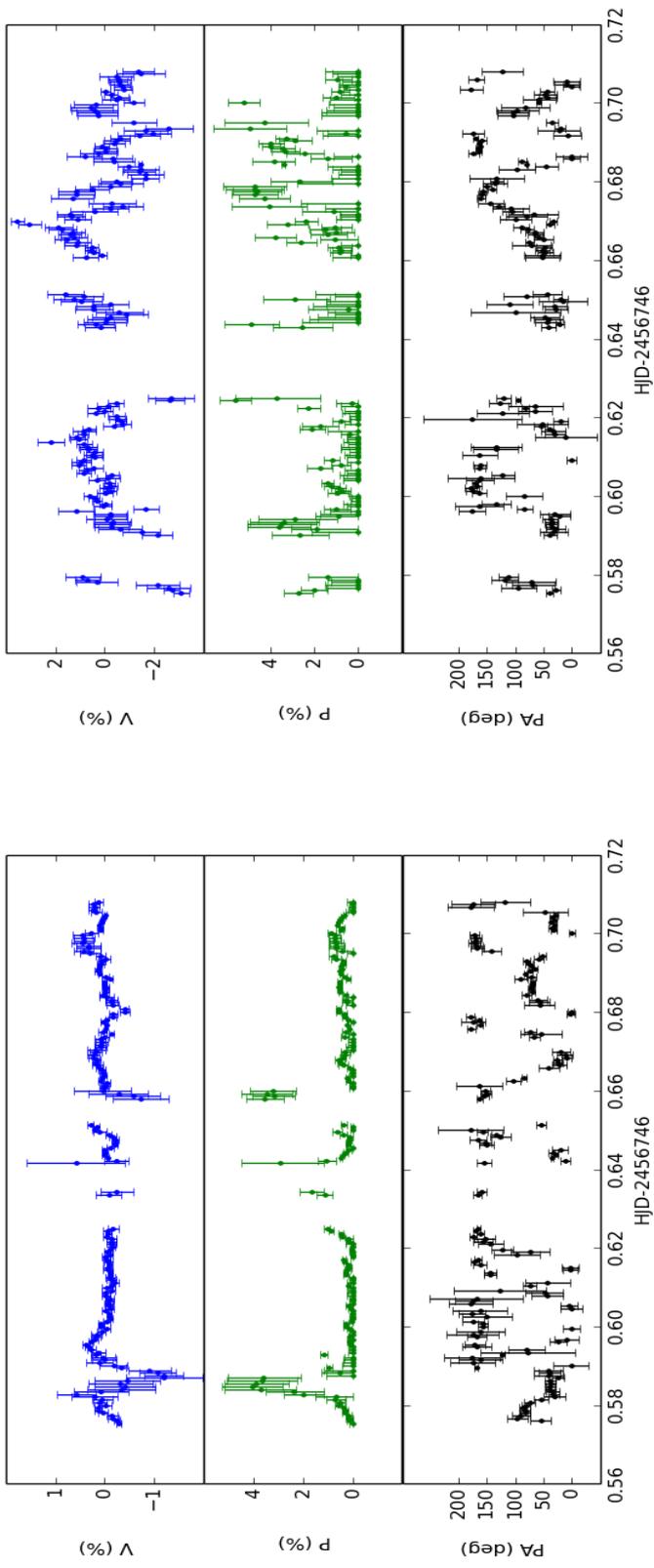


Figura 4.13 - Curvas de luz e polarização do sistema SW Sex.



(a) SW Sex-2

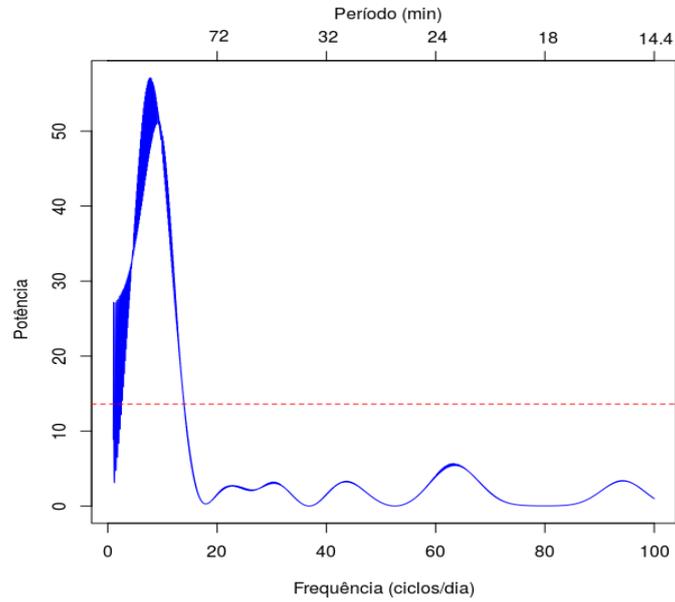
(b) SW Sex-7

Figura 4.14 - Curvas de polarização das estrelas de campo do sistema SW Sex no filtro R.

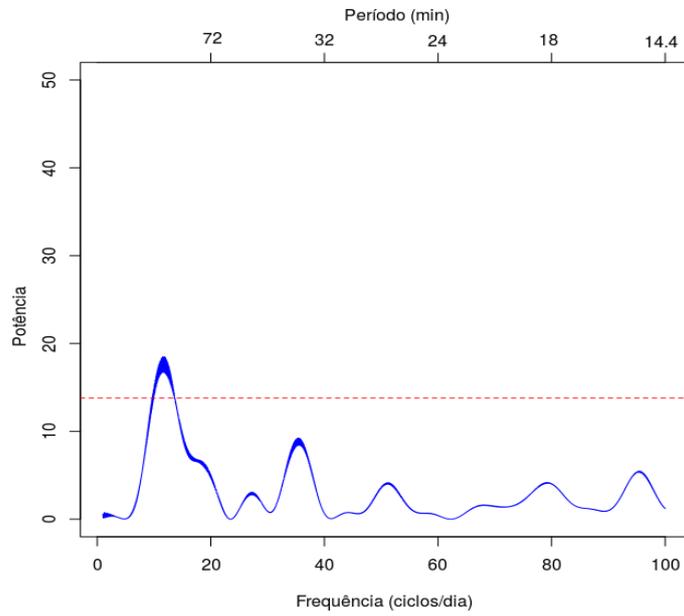
4.2.3 Busca por sinais periódicos

A Figura 4.15(a) apresenta o periodograma dos dados fotométricos do sistema SW Sex. Nesse conjunto de dados, retiramos os dados correspondentes ao tempo de eclipse e os pontos fora do valor típico encontrados. Nesses dados, encontramos apenas um pico de potência, que corresponde a metade do período orbital, aproximadamente 172 min. No entanto, um período de $124,06 \pm 90$ min é também observado na estrela de campo, SW Sex-7, como mostra a Figura 4.15(b). De modo que, nos dados fotométricos não temos um período consistente.

Nos dados polarimétricos, Figura 4.16(a), para um falso alarme de 0,01% a ordenada de potência deve ser superior a 14. Assim o único pico de potência significativo é o de período igual a $236,23 \pm 160$ min. Esse período também está presente na estrela de campo, assim como outros períodos menos significativos, Figura 4.16(b). De modo geral, não é possível atribuir um período estatisticamente significativamente na polarimetria circular.

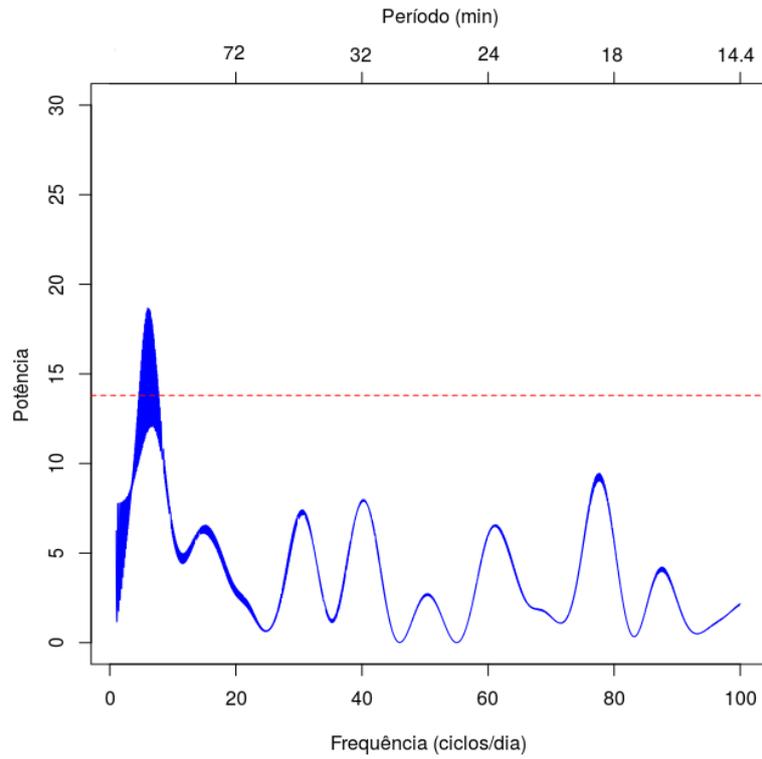


(a) SW Sex

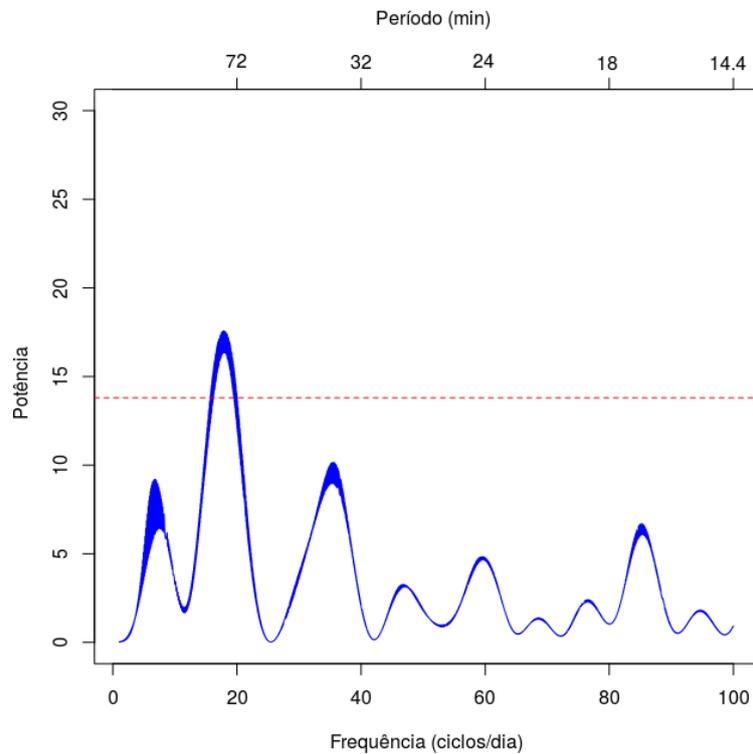


(b) SW Sex-7

Figura 4.15 - Periodogramas dos dados fotométricos do sistema SW Sex e da estrela de campo, SW Sex-7. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.



(a) SW Sex



(b) SW Sex-7

Figura 4.16 - Periodograma dos dados polarimétricos do sistema SW Sex e da estrela de campo, SW Sex-7. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

4.3 V442 Oph

O objeto V442 Oph foi identificado como uma *novalike* por Szkody e Wade (1980) pelas características fotométricas e espectroscópicas que apresentavam, como a forte emissão da linha HeII λ 4686. Hoard et al. (2000) sugeriu que essas propriedades eram similares aos objetos tipo SW Sex.

As curvas de luz do sistema V442 Oph são caracterizadas pela presença de oscilações quasi-periódicas que predominam em 1.000 segundos. Nos dados de Patterson et al. (2002), compostos por 25 noites de observação, em distintas épocas, o periodograma de dados fotométricos, Figura 11 do referido artigo, mostram períodos em 19,45 min e em 16,02 min.

4.3.1 Fotometria diferencial

O objeto V442 Oph apresenta magnitudes na banda V entre 12,6 mag a 15,5 mag, e num estado típico em 14 mag (BALLOUZ; SION, 2009). A cobertura fotométrica do banco de dados da AAVSO é bastante esparsa, as poucas medidas de magnitudes concentram-se entre o intervalo de 13,5 – 14,3 mag. No catálogo NOMAD, a magnitude de V442 Oph encontrada é 13,42 mag no filtro V e 13,45 no filtro R.

Em nossos dados as magnitudes foram $13,60 \pm 0,01$ e $13,37 \pm 0,05$ nos filtros V e R, respectivamente. Considerando o erro do nível de 0,11 mag no filtro V e 0,19 mag no filtro R. O cálculo do desvio padrão de Δ_{mag} , Tabela 4.6, forneceu os erros de calibração.

Tabela 4.6 - Magnitudes das estrelas de campo em V442 Oph.

Estrelas de campo	Filtro	Mag_{med}	Mag_{lit}	Δ_{mag}	Catálogo
0737-0410665	V	-	14,54	-	NOMAD
	R	-	13,97	-	NOMAD
0737-0410547	V	$16,09 \pm 0,01$	16,26	-0,17	NOMAD
	R	$15,13 \pm 0,08$	15,15	-0,02	NOMAD
0737-0410574	V	$14,26 \pm 0,01$	14,20	0,06	NOMAD
	R	$13,38 \pm 0,05$	13,68	-0,3	NOMAD
0737-0410750	V	$14,20 \pm 0,01$	14,22	-0,02	NOMAD
	R	$13,58 \pm 0,04$	13,84	-0,26	NOMAD
0737-0410980	V	$15,48 \pm 0,01$	15,42	0,06	NOMAD
	R	$14,35 \pm 0,05$	14,76	-0,41	NOMAD

O painel superior da Figura 4.17 mostra a curva de luz de V442 Oph nos filtros V e R. Nota-se que este sistema não eclipsante apresenta *flickerings*. Aparentemente encontra-se em estado alto de brilho, ligeiramente inferior a magnitude típica, próximo a 14 mag.

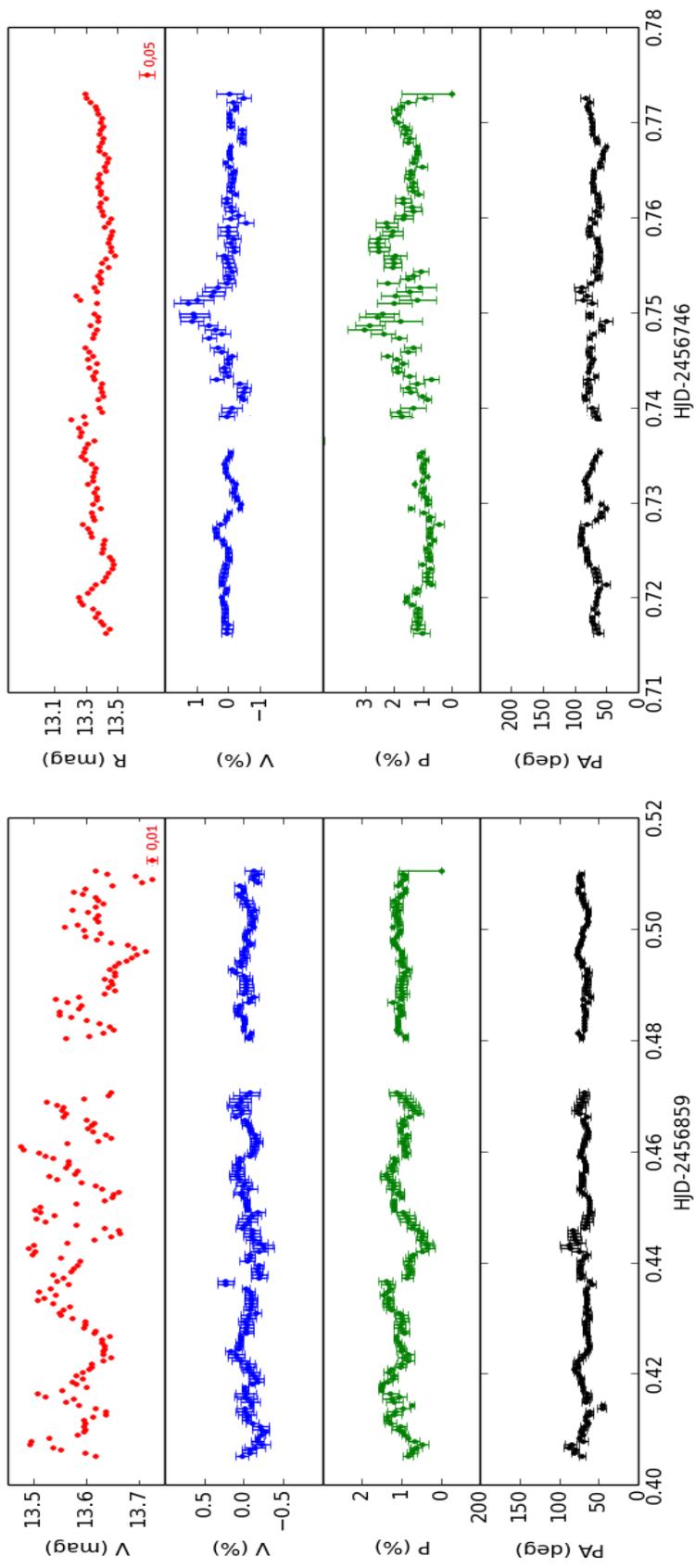
4.3.2 Polarimetria

A polarização circular medida por Stockman et al. (1992) para o sistema V442 Oph foi $0,01 \pm 0,05\%$ na banda $\lambda\lambda 3200 - 8600 \text{ \AA}$. Encontramos a polarização média, $-0,04 \pm 0,09\%$ no filtro V e $-0,05 \pm 0,45\%$ no filtro R, Tabela 4.7. No dia 20 de junho de 2014, os valores de $\langle\sigma_V\rangle$ e $\sigma_{\langle V\rangle}$ são praticamente iguais, de modo que, é possível que não exista componente intrínseca de variabilidade, portanto, neste filtro a polarização circular pode ser consistente com zero. A mesma análise para o filtro R, dia 29 de março de 2014, mostra a dispersão duas vezes maior que $\sigma_{\langle V\rangle}$. As medidas da polarização nas estrelas de campo não indicam sinal de polarização instrumental.

As curvas de polarização de V442 Oph e da estrela de campo, 0737-0410980, são apresentadas na Figura 4.17 e Figura 4.18, respectivamente. Em ambas as figuras, observa-se que, nas curvas do ângulo de polarização linear, PA é uniforme no intervalo entre $50^\circ - 100^\circ$. Isso significa que existe contribuição do meio interestelar na polarização linear neste objeto e que os valores dos parâmetros de Stokes Q e U, apresentados na Tabela 4.7, devem ser ainda subtraídas pelo fator polarização do meio interestelar, que exige realizar um outro procedimento de redução.

Tabela 4.7 - Resultado da polarização do sistema V442 Oph.

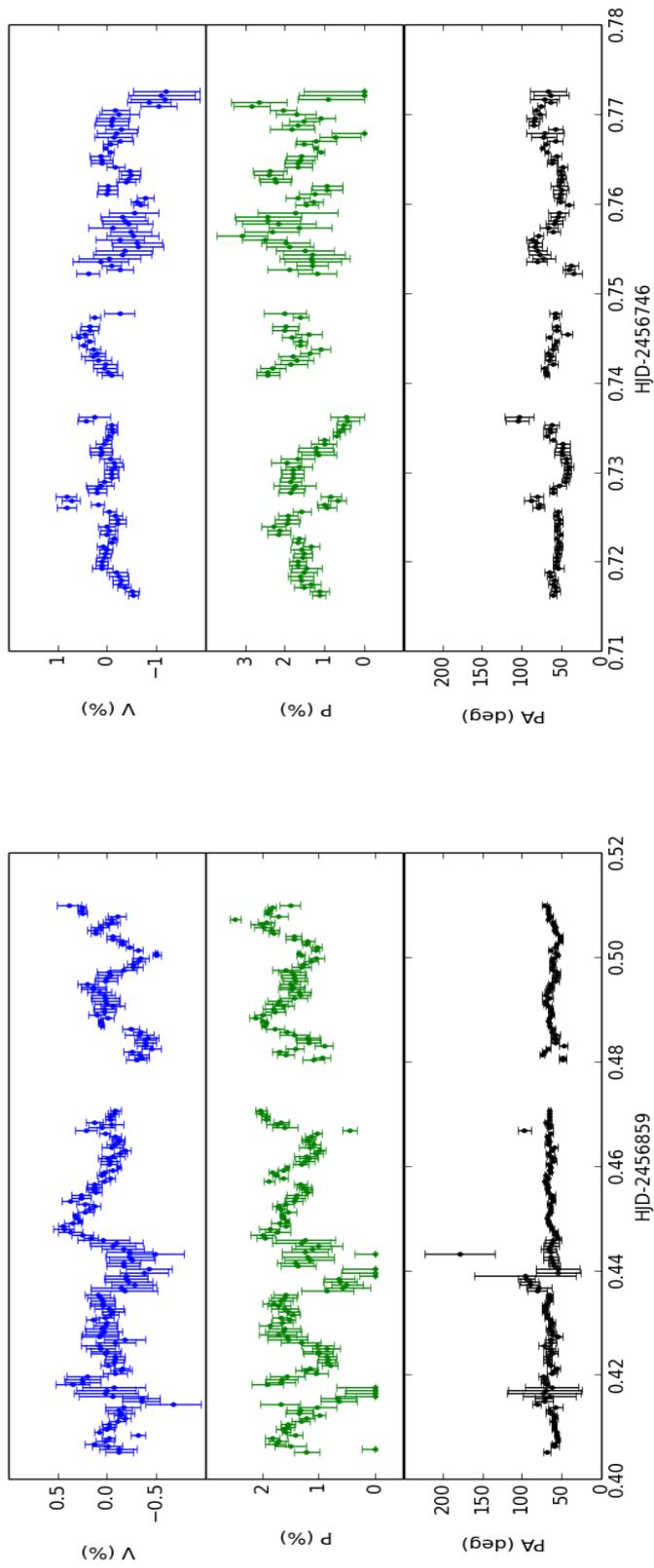
Objetos	Data	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)	$\langle Q \rangle$ (%)	$\langle U \rangle$ (%)
V442 Oph	20/07/2014	-0,044	0,090	0,075	0,030	$-0,780 \pm 0,014$	$0,691 \pm 0,017$
0737-0410665		-0,035	0,201	0,117	0,070	$-0,943 \pm 0,026$	$1,217 \pm 0,029$
0737-0410980		-0,093	0,347	0,182	0,125	$-1,020 \pm 0,043$	$0,461 \pm 0,042$
V442 Oph	29/03/2014	-0,048	0,454	0,203	0,187	$-0,932 \pm 0,039$	$0,623 \pm 0,059$
0737-0410665		-0,171	0,430	0,263	0,159	$-0,697 \pm 0,056$	$1,051 \pm 0,089$
0737-0410980		-0,353	0,855	0,312	0,206	$-1,192 \pm 0,071$	$0,556 \pm 0,102$



(a) Dia 20/07/2014: Filtro V

(b) Dia 29/03/2014: Filtro R

Figura 4.17 - Curvas de luz e polarização de V442 Oph para os diferentes dias de observação. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.



(a) Dia 20/07/2014

(b) Dia 29/03/2014

Figura 4.18 - Curvas de polarização da estrela de referência 0737-0410665 do sistema V442 Oph. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

4.3.3 Busca por sinais periódicos

O periodograma da Figura 4.19 é o resultado do Lomb-Scargle aplicado aos dados fotométricos do sistema V442 Oph. Os períodos, com potência acima de 14 indicando um falso alarme de 0,01%, são: no filtro V, $202,42 \pm 146,94$ min e no filtro R, $12,53 \pm 0,44$ min. É interessante notar que no filtro V, entre $100 - 150$ ciclos d^{-1} , também existe um período de $12,26 \pm 0,52$ min. Esses períodos não são encontrados no periodograma da estrela de campo, 0737-0410665, como mostra a Figura 4.20.

No teste realizado com todo o conjunto de dados, juntando a fotometria dos filtros V e R, o período de 12 min representa o maior pico de potência, sendo portanto, consistente nas duas observações (Figura 4.21). Nestes dados, outro período estatisticamente consistente é 181,66 min, aproximadamente igual ao período orbital (179,03 min).

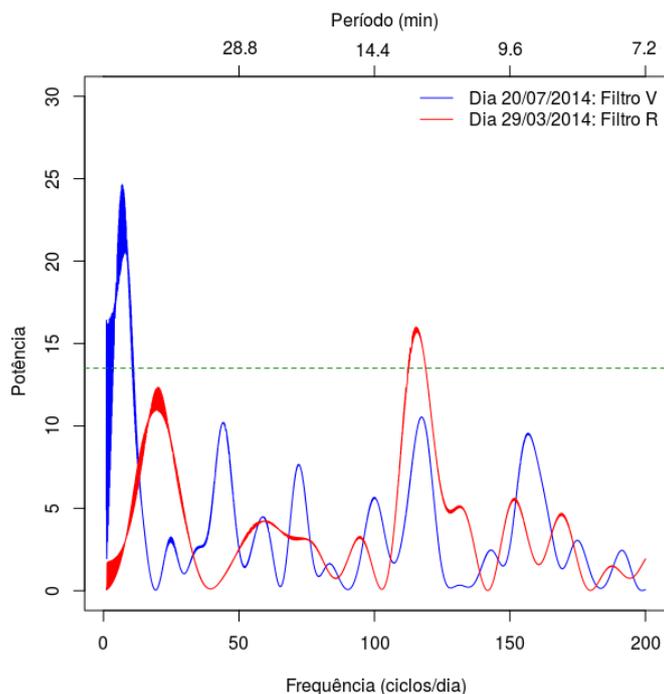


Figura 4.19 - Periodograma dos dados fotométricos do sistema V442 Oph. Em azul, missão de junho de 2014 no filtro V e em vermelho, missão de março de 2014 no filtro R. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

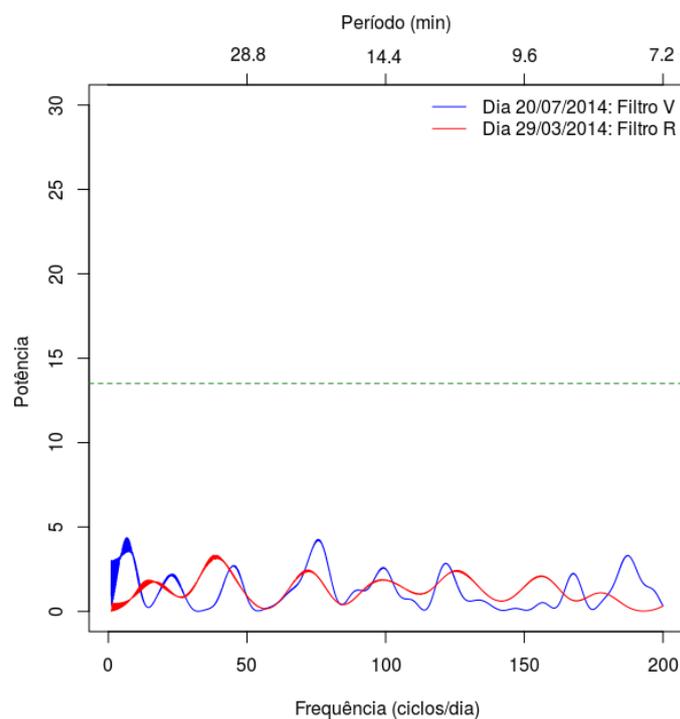


Figura 4.20 - Periodograma dos dados fotométricos da estrela de campo do sistema V442 Oph, 0737-0410665. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

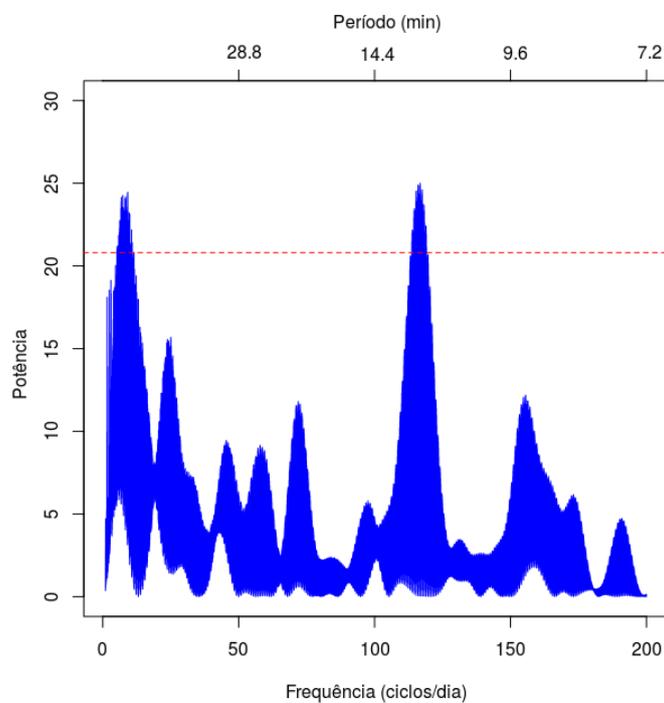
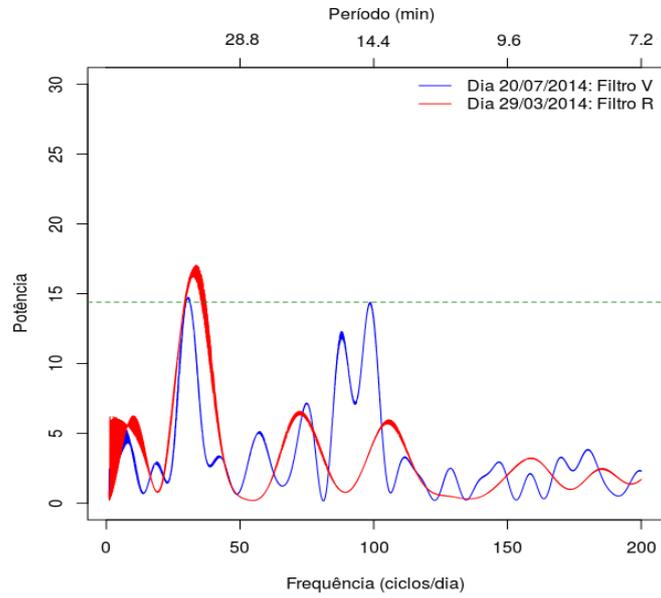


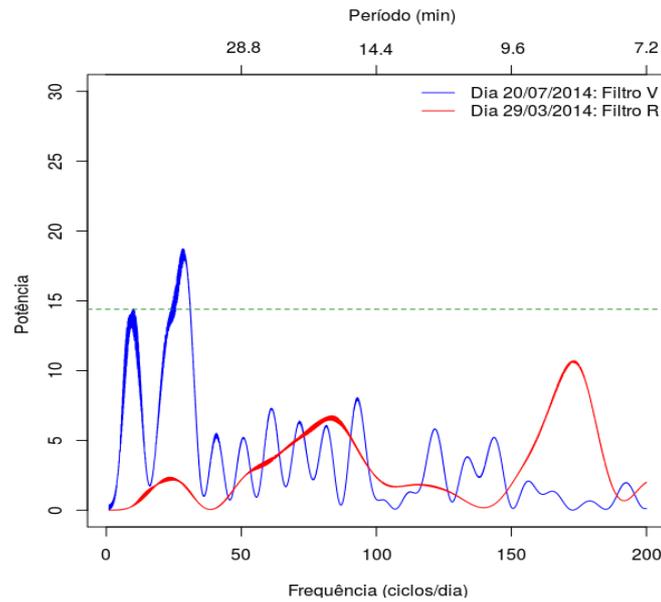
Figura 4.21 - Periodograma de todo o conjunto de dados fotométricos do sistema V442 Oph. Existe um período consistente em ~ 12 min. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

Na busca por sinal periódico na polarimetria, a Figura 4.22(a) mostra o periodograma para os dois dias de observação. Os períodos com potência superior a 14, falso alarme em 0,01%, foram em ordem crescente de frequência: $46,85 \pm 10,49$ min; $16,37 \pm 0,74$ min, no filtro V e $43,89 \pm 9,27$ min no filtro R. Com potência inferior a 14, encontramos um período coincidente entre os dados na ordem dos 40 min, e outro bem definido em torno de 20 min.

Comparando o periodograma da estrela de campo 0737-0410665 (Figura 4.22(b)) com o periodograma do sistema V442 Oph, nota-se que no filtro R não há pico de potência significativo, de modo que os sinais periódicos observados no objeto são intrínsecos a VC. No entanto, no filtro V encontramos alguns períodos, com ordenada na potência em torno de 8, que tornam os sinais em 20 min e em 47 min duvidosos. Assim, os dados do dia 29 de março de 2014 são significativos.



(a) V442 Oph



(b) 0737-0410665

Figura 4.22 - Periodogramas dos dados polarimétricos do sistema V442 Oph e de sua estrela de campo, 0737-0410665. Os períodos em torno de 20 min e 40 min é apenas consistente nos dados em filtro R. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

4.4 V380 Oph

O sistema não eclipsante V380 Oph, classificado como uma *novallike* por Shafter (1985), é um membro da subclasse SW Sex pelas características espectroscópicas apontadas pelo Rodríguez-Gil et al. (2007b), tais como: (i) fortes linhas de Balmer em emissão com picos simples; (ii) emissão de curvas-S com alta velocidade, de amplitudes aproximadamente iguais a 200 km s^{-1} ; (iii) linhas em absorção na fase 0,5.

Nas curvas de luz no óptico, Shugarov et al. (2005) encontraram a presença de dois períodos: 0,148 d, que é 3,8% menor que o P_{orb} , que é igual a $0,154107 \pm 0,000001$ d (~ 221 min), sugerindo ser o efeito de *superhumps* negativos e outro em 4,5 d, semelhante ao período de AH Men em 4 d e interpretado por Rodríguez-Gil et al. (2007b) como resultado de um disco de acreção em precessão.

A intensidade dos componentes de alta velocidade das curvas-S não são uniformes e *flarings* periódicos são observados. Em Rodríguez-Gil et al. (2007b), periodogramas tanto da curva de velocidade radial quanto da largura equivalente de $H\alpha$ apresentam um período dominante em torno de 31 d^{-1} ($46,7 \pm 0,1$ min). Os autores sugerem que este período é relativo à rotação da anã branca magnética.

4.4.1 Fotometria diferencial

O objeto V380 Oph apresenta estados altos e baixos de brilho, com magnitudes em torno de 14,5 a 17, como mostra a Figura 4.23 nos filtros V e R, em verde e em vermelho, respectivamente. Nota-se que sua magnitude pode variar em até 2,5 magnitudes em curta escala de tempo. Desse modo, este objeto pode ser classificado como uma estrela do tipo VY Scl.

No catálogo NOMAD usado na calibração, a magnitude de V380 Oph é no filtro V igual a 14,64. Encontramos magnitude de $14,94 \pm 0,01$ mag no filtro V, com erro de calibração igual a 0,04, calculada pelas estrelas de campo, Tabela 4.8. Analisando a magnitude encontrada do objeto, o mesmo pode está em estado de alto brilho. A curva de luz é apresentada no painel superior da Figura 4.24.

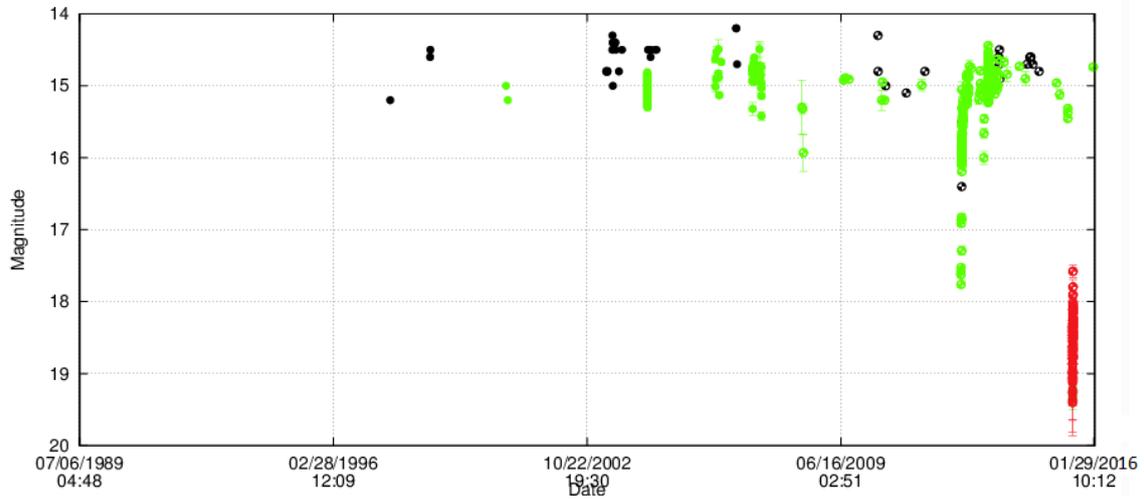


Figura 4.23 - Curvas de luz do sistema V380 Oph. Os pontos em preto são no visível, em verde no filtro V e em vermelho no filtro R.

Fonte: AAVSO (2016)

Tabela 4.8 - Magnitudes das estrelas de campo em V380 Oph no filtro V.

Estrelas de campo	Mag_{med}	Mag_{lit}	Δ_{mag}	Catálogo
0960-0317393	-	13,9	-	NOMAD
0960-0317393	$12,26 \pm 0,01$	12,53	-0,27	NOMAD
0960-0317346	$13,77 \pm 0,01$	13,81	-0,04	NOMAD
0960-0317341	$13,95 \pm 0,01$	13,92	0,03	NOMAD
0960-0317432	$14,51 \pm 0,01$	14,23	0,28	NOMAD
0960-0317262	$13,26 \pm 0,01$	13,27	-0,01	NOMAD

4.4.2 Polarimetria

A primeira medida da polarimetria circular do sistema V380 Oph foi $-0,12 \pm 0,16\%$ na banda $\lambda\lambda 3200 - 8600 \text{ \AA}$ (STOCKMAN et al., 1992). Nos nossos dados o valor médio no filtro V encontrado foi $0,003 \pm 0,160\%$, com baixa evidência de variabilidade, pois $\langle\sigma_V\rangle$ é similar ao valor $\sigma_{\langle V\rangle}$, Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resultado da polarização do sistema V380 Oph no filtro V.

Objetos	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)	$\langle Q \rangle$ (%)	$\langle U \rangle$ (%)
V380 Oph	0,003	0,160	0,111	0,047	$-0,520 \pm 0,026$	$0,295 \pm 0,025$
0960-0317393	-0,028	0,146	0,064	0,026	$-0,732 \pm 0,016$	$0,197 \pm 0,015$
0960-0317432	-0,037	0,129	0,075	0,034	$-0,794 \pm 0,016$	$0,265 \pm 0,016$

A curva de polarização circular e linear, na Figura 4.24 do sistema V380 Oph apresenta uma variabilidade entre o intervalo HJD de 0,48 – 0,50, que é também presente nas curvas de polarização das estrelas de campo: a estrela de referência 0960-0317393 e a estrela 0960-0317432 (Figura 4.25). Este pico de polarização não deve ser considerado intrínseco ao objeto de estudo devido as incertezas observacionais. Além disso, o ângulo de posição linear apresenta ser constante, em torno de $50^\circ - 100^\circ$, em todas as curvas. Esse comportamento deve ser atribuído a existência de polarização linear no meio interestelar, e deve ser corrigida dos nosso dados.

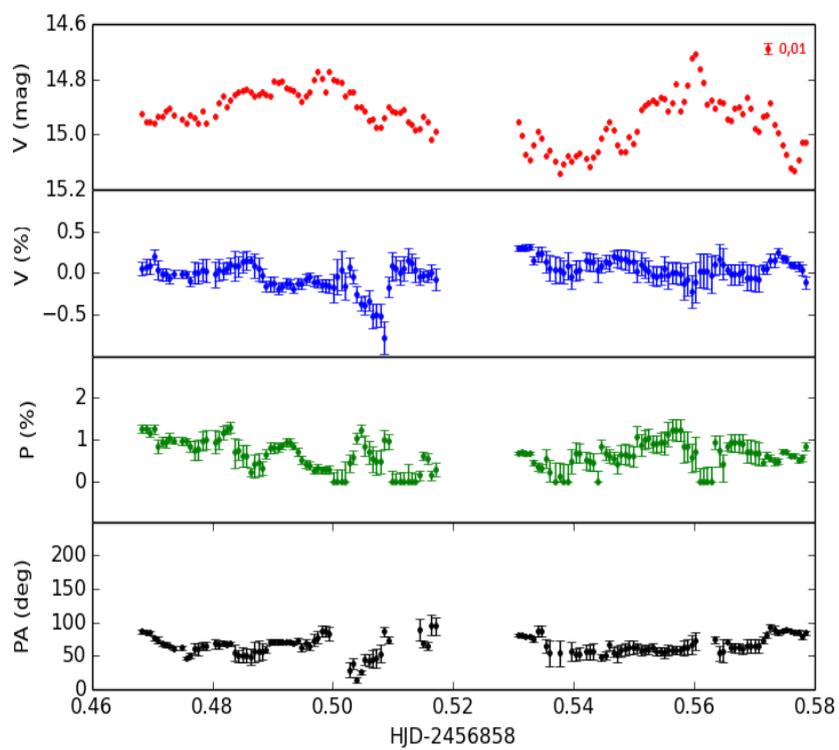
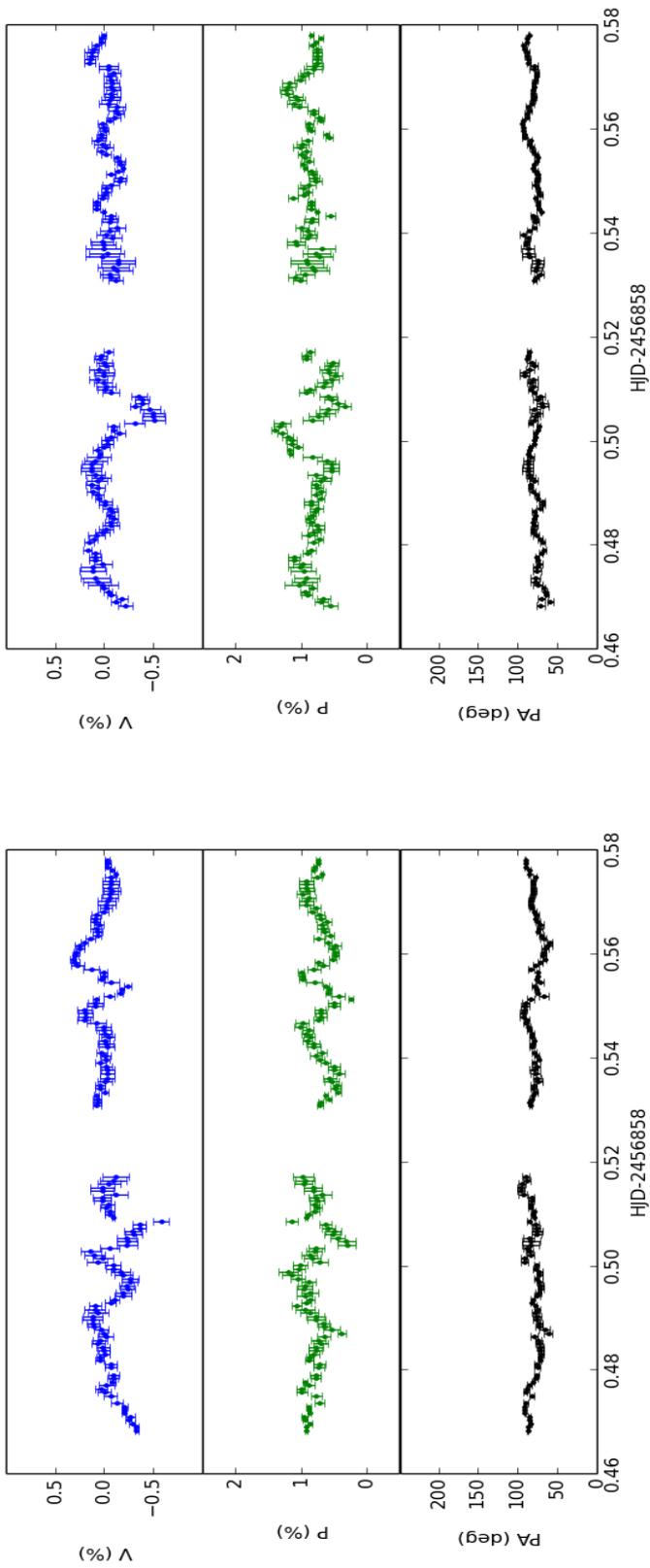


Figura 4.24 - Curvas de luz e polarização do sistema V380 Oph.



(a) 0960-0317393

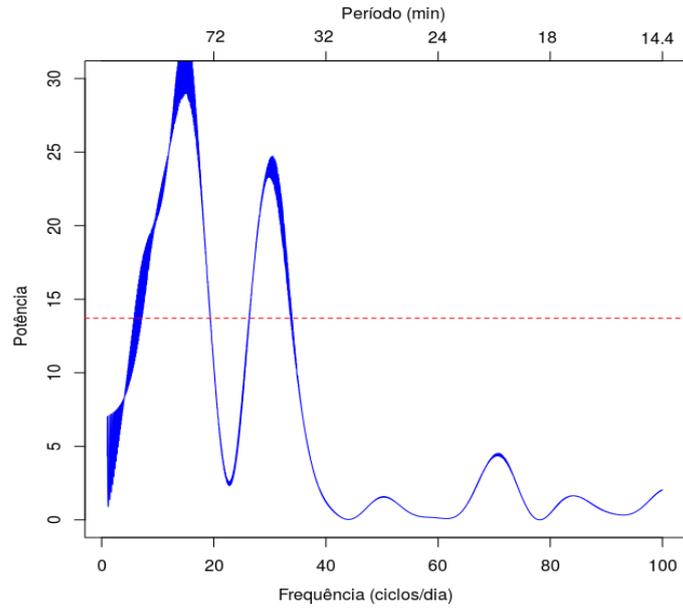
(b) 0960-0317432

Figura 4.25 - Curvas de polarização das estrelas de campo do sistema V380 Oph.

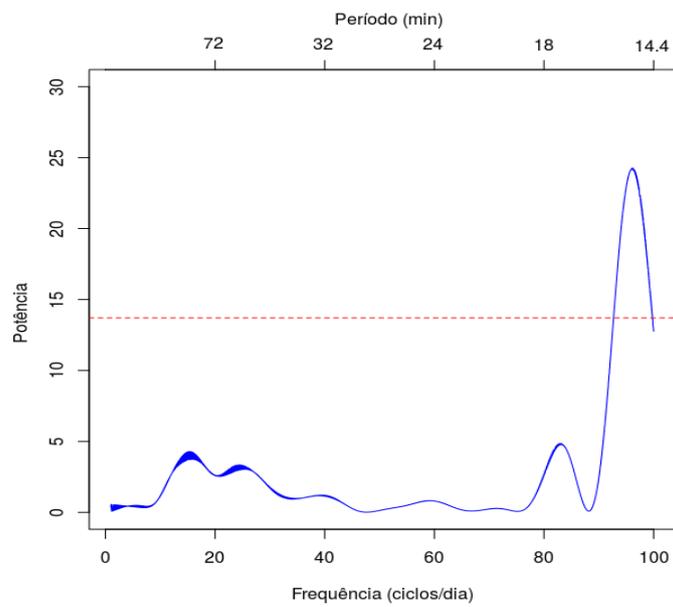
4.4.3 Busca por sinais periódicos

A Figura 4.26(a) e a Figura 4.27(a) mostram os resultados da busca de sinal periódico nos dados fotométricos e polarimétricos, respectivamente, para o sistema V380 Oph. Na fotometria encontramos dois períodos com potência superior a 14, representando um falso alarme em 0,01%: $97,55 \pm 25,60$ min; $47,30 \pm 8,01$ min. Estes períodos não são encontrados na estrela de campo 0960-0317432, periodograma da Figura 4.26(b).

Na polarimetria, os períodos significativos são em ordem crescente de frequência: $130,35 \pm 34,40$ min; $85,59 \pm 10,23$ min e $22,46 \pm 1,40\%$, Figura 4.1.2. O primeiro período é em torno da metade do período orbital, o segundo está presente na estrela de campo, em $50,12 \pm 2,40\%$ com potência na mesma ordem que a VC e o terceiro período, que coincide com o período disposto em Rodríguez-Gil et al. (2007b) também presente nos dados da estrela de campo em $23,20 \pm 1,40\%$, Figura 4.27(b). Portanto, na polarimetria não foi possível encontrar um período estatisticamente consistente.

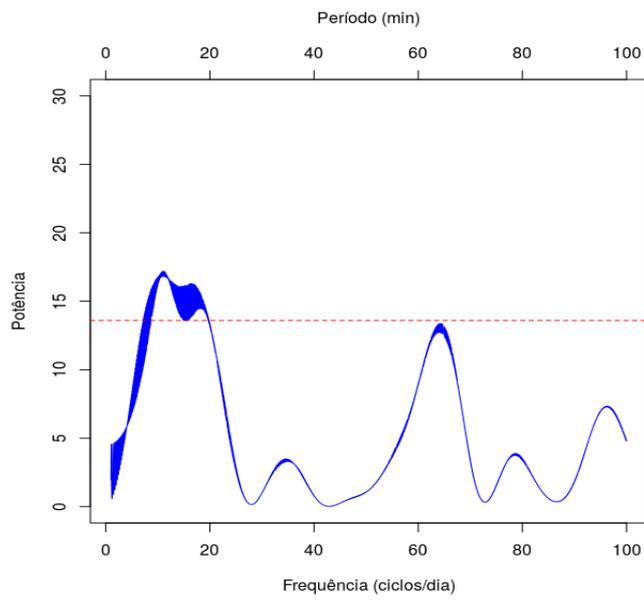


(a) V380 Oph

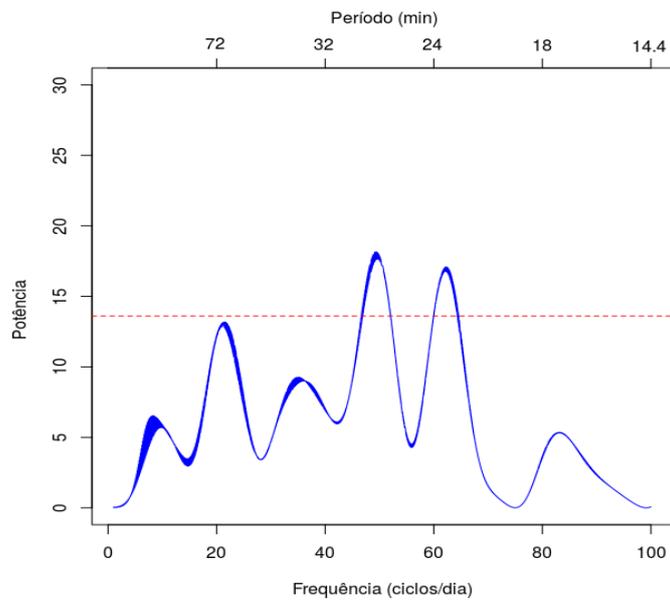


(b) 0960-0317432

Figura 4.26 - Periodograma dos dados fotométricos do sistema V380 Oph e da estrela de campo. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.



(a) V380 Oph



(b) 0960-0317432

Figura 4.27 - Periodograma dos dados polarimétricos do sistema V380 Oph e da estrela de campo. A linha pontilhada indica a potência de falso alarme em 0,01%.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O objetivo deste trabalho foi buscar por indícios de acreção magnética em objetos do tipo SW Sex. Para isso realizamos um estudo fotométrico e polarimétrico de uma amostra composta de cinco sistemas observados no OPD/LNA: LS Peg; 1H 0204-023; SW Sex; V442 Oph e V380 Oph. Além da redução desses dados, esta dissertação apresenta os resultados abaixo.

LS Peg: Por já apresentar polarização circular confirmada na literatura, escolhemos esse objeto para determinar o método de análise dos objetos. Obtive magnitudes que indicam estado alto de brilho, polarização circular e linear com uma componente intrínseca e variável, e o período em torno de 20 min consistente na fotometria e na polarimetria, que interpretamos como o período de rotação da anã branca, mas não podemos excluir que o período fotométrico seja batimento do polarimétrico com o orbital.

1H 0204-023: A fotometria apresentou valores típicos de magnitudes, aproximadamente 14 mag nos filtros V e R. A busca por variabilidade intrínseca foi realizada por uma análise simples, e indicou a presença de variabilidade na polarimetria circular. Nas curvas de polarização, notamos um comportamento similar às polares; picos de polarização linear quando a circular tende a zero. Além disso, encontramos na fotometria um período significativo em 50 min. Na polarimetria, o período da ordem de 20 min não foi estatisticamente significativo. De modo que, não associamos nenhum dos períodos como o período de rotação da anã branca.

SW Sex: A curva de luz apresentou parcialmente dois eclipses no filtro R, com variação na magnitude em 1,5 mag. A polarização circular apresentou sinal de variabilidade intrínseca, mas na busca por periodicidade não encontramos sinal significativo.

V442 Oph: A magnitude encontrada foi em torno de 13,5 mag, resultado típico encontrado na literatura. Apenas encontramos sinal de variabilidade na polarização circular no filtro R. No filtro V, a polarização é consistente com zero. Além disso, é possível que nas medidas da polarização linear tenham uma contribuição do meio interestelar. Análise dos espectros de potência indicam um período em 12 min na fotometria nos filtros V e R. Já na polarimetria, apenas o filtro R apresenta período significativo em torno de 40 min.

V380 Oph: A magnitude encontrada em nossos dados, 14,9 mag no filtro V, indica que o objeto encontra-se em estado de alto brilho. A polarização circular aparentemente não apresenta evidência de variabilidade intrínseca, e a polarização linear tem possivelmente uma componente originada no meio interestelar. Na fotometria, encontramos o período da ordem de 47 min, semelhante a periodicidade dos *flarings* encontrado por [Rodríguez-Gil et al. \(2007b\)](#), mas na polarimetria não encontramos períodos estatisticamente significativos.

A perspectiva para este trabalho de mestrado é que possamos publicar um artigo dos resultados apresentados. Para isso, será necessário:

- concluir a análise dos objetos 1H 0204-023, SW Sex, V442 Oph e V380 Oph, aplicando a busca por variabilidade usando o método do [Almaini et al. \(2000\)](#);
- estimar quantitativamente a polarização linear do meio interestelar, através da redução dos dados com a rotina *AUTO_POL*;
- incluir o objeto UU Aqr, terminando sua redução e realizando o procedimentos de análise.

Destacamos duas possibilidades de continuidade do trabalho apresentado nesta dissertação. Em primeiro lugar, consideramos importante conduzir novas observações de LS Peg de modo a se obter dados em várias noites de observação, usando um único filtro, com o objetivo de obter resultados mais significativos tanto da variabilidade, quanto da periodicidade. Seria também interessante verificar se as OQPs observadas em PIs são polarizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAVSO. American association of variable star observers. 2016. Disponível em: <<https://www.aavso.org>>. Acesso em: 31/01/2016. xv, xvii, 49, 111
- AIZU, K. X-ray emission region of a white dwarf with accretion. **Progress of Theoretical Physics**, v. 49, p. 1184–1194, 1973. 7
- AK, T.; BILIR, S.; AK, S.; EKER, Z. Spatial distribution and galactic model parameters of cataclysmic variables. **New Astronomy**, v. 13, p. 133–143, 2008. 43, 81
- ALMAINI, O.; LAWRENCE, A.; SHANKS, T.; EDGE, A.; BOYLE, B. J.; GEORGANTOPOULOS, I.; GUNN, K. F.; STEWART, G. C.; GRIFFITHS, R. E. X-ray variability in a deep flux-limited sample of qos. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 315, p. 325–336, 2000. 56, 84, 120
- BALLOUZ, R.-L.; SION, E. M. On the accretion rates of sw sextantis nova-like variables. **The Astrophysical Journal**, v. 697, n. 2, p. 1717–1724, 2009. 81, 102
- BASKILL, D. S.; WHEATLEY, P. J.; OSBORNE, J. P. The complete set of asca x-ray observations of non-magnetic cataclysmic variables. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 357, p. 626–644, 2005. 46, 47, 80
- BUCKLEY, D. A. H.; SULLIVAN, D. J.; REMILLARD, R. A.; TUOHY, I. R.; CLARK, M. Lb 1800 - a bright eclipsing cataclysmic variable and a transient x-ray source. **Astrophysical Journal**, v. 355, p. 617–626, 1990. 15
- CASARES, J.; MARTINEZ-PAIS, I. G.; MARSH, T. R.; CHARLES, P. A.; LAZARO, C. V795 her: an sw sex star in the period gap? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 278, p. 219–235, 1996. 12, 14
- CLARKE, D. **Stellar polarimetry**. United Kingdom: Wiley-VCH, 2010. 431 p. 21
- COLLETT, E. **Field guide to polarization**. United Kingdom: CRC Press, 2005. 581 p. xv, 21, 22
- CROPPER, M. Polarization observations of dq her stars and other cataclysmic variables. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 222, p. 225–233, 1986. 15

_____. The polars. **Space Science Reviews (ISSN 0038-6308)**, v. 54, p. 195–295, 1990. 6

DHILLON, V. S.; MARSH, T. R.; JONES, D. H. P. On the nature of sw sex. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 291, p. 694, 1997. 96

DHILLON, V. S.; SMITH, D. A.; MARSH, T. R. The sw sex enigma. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 428, p. 3559–3568, 2013. 9, 11, 13, 95

DOWNES, R. A.; KEYES, C. D. Spectroscopic observations of h-alpha emission stars from the stephenson and stephenson-sanduleak lists. **Astronomical Journal**, v. 96, p. 777–790, 1988. 43

DOWNES, R. A.; WEBBINK, R. F.; SHARA, M. M.; RITTER, H.; KOLB, U.; DUERBECK, H. W. A catalog and atlas of cataclysmic variables: The final edition. **Journal of Astronomical Data**, v. 11, p. 2, 2005. 81, 83

DWORETSKY, M. M. A period-finding method for sparse randomly spaced observations of 'how long is a piece of string?'. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 203, p. 917–924, 1983. 68

FERRARIO, L.; MARTINO, D. de; GANSICKE, B. T. Magnetic white dwarfs. **Space Science Reviews**, v. 191, p. 111–169, 2015. xv, 5

FOSSATI, L.; BAGNULO, S.; MASON, E.; DEGL'INNOCENTI, E. L. Standard stars for linear polarization observed with fors1. **ASP Conference Series**, v. 364, p. 503–513, 2007. 31

GANSICKE, B. T. **Observational population studies of cataclysmic variables - The golden era of surveys**. [S.l.: s.n.], 2005. 3 p. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 330). 11

GARNAVICH, P. M.; SZKODY, P. The unusual cataclysmic variable s193. **Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)**, v. 21, n. 2, p. 81–85, 1992. 44, 80

GARNAVICH, P. M.; SZKODY, P.; GOLDADER, J. S193: A new dq herculis variable? **Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 20, p. 1020, 1988. 44

GROOT, P. J.; RUTTEN, R. G. M.; PARADIJS, J. van. Sw sextantis in an excited, low state. **Astronomy and Astrophysics**, v. 368, p. 183–196, 2001. [12](#), [81](#), [95](#)

HAEFNER, R.; METZ, K. A photometric and polarimetric investigation of the old nova rr pictoris. **Astronomy and Astrophysics**, v. 109, n. 1, p. 171–178, 1982. [15](#)

HELLIER, C. V1315 aquilae and the nature of sw sextantis stars. **Astrophysical Journal**, v. 471, p. 949, 1996. [11](#)

_____. **Cataclysmic Variable Stars: How and why they vary?** United Kingdom: UK: Springer, 2001. [xv](#), [1](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [13](#)

HELLIER, C.; ROBINSON, E. L. Px andromedae and the sw sextantis phenomenon. **The Astrophysical Journal**, v. 431, p. L107–L110, 1994. [12](#)

HENDEN, A. A.; HONEYCUTT, R. K. Secondary photometric standards for northern nova-like cataclysmic variables. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, n. 4, p. 324, 1995. [41](#), [50](#)

HOARD, D. W.; LONG, K. S.; HOWELL, S. B.; WACHTER, S.; BRINKWORTH, C. S.; KNIGGE, C.; DREW, J. E.; SZKODY, P.; KAFKA, S.; BELLE, K.; CIARDI, D. R.; FRONING, C. S.; BELLE, G. T. van; PRETORIUS, M. L. Nova-like cataclysmic variables in the infrared. **The Astrophysical Journal**, v. 786, n. 68, p. 24, 2014. [81](#)

HOARD, D. W.; SZKODY, P.; FRONING, C. S.; LONG, K. S.; KNIGGE, C. Observations of the sw sextantis star dw ursae majoris with the far ultraviolet spectroscopic explorer. **The Astronomical Journal**, v. 126, p. 2473–2486, 2003. [15](#)

_____. _____. **The Astronomical Journal**, v. 126, p. 2473–2486, 2013. [xix](#), [9](#), [10](#), [15](#)

HOARD, D. W.; THORSTENSEN, J. R.; SZKODY, P. Orbital period of the low-inclination sw sextantis star v442 ophiuchi. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 537, p. 936–945, 2000. [102](#)

HOMER, L.; SZKODY, P.; HENDEN, A.; CHEN, B.; SCHMIDT, G. D.; FRASER, O. J.; WEST, A. A. Characterizing three candidate magnetic cataclysmic variables from sdss: Xmm-newton and optical follow-up observations. **Astronomical Journal**, v. 132, p. 2743–2754, 2006. [15](#)

HONEYCUTT, R. K.; SCHLEGEL, E. M.; KAITCHUCK, R. H. Evidence for a bipolar wind in the cataclysmic variable pg 1012-029. **Astrophysics**, v. 302, p. 388–402, 1986. 9, 12

HORNE, K. Disk-anchored magnetic propellers - a cure for the sw sex syndrome. In: HELLIER, C.; MUKAI, K. (Ed.). **Annapolis Workshop on Magnetic Cataclysmic Variables**. [S.l.: s.n.], 1999. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 157), p. 349. 12

KATYSHEVA, N. A.; PAVLENKO, E. P. Cataclysmic variables in the “period gap”. **Astrophysics**, v. 46, p. 114–128, 2003. 4

KNIGGE, C.; BARAFFE, I.; PATTERSON, J. The evolution of cataclysmic variables as revealed by their donor stars. **The Astrophysical Journal Supplement**, v. 194, p. 28–48, 2011. 4

LAMB, D. Q.; MASTERS, A. R. X and uv radiation from accreting magnetic degenerate dwarfs. **Astrophysical Journal**, v. 234, p. L117–L122, 1979. xv, 8

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. **Astrophysics and Space Science**, v. 39, p. 447–462, 1976. 68

MAGALHÃES, A. M.; RODRIGUES, C. V.; MARGONINER, V. E.; PEREYRA, A.; HEATHCOTE, S. High precision ccd imaging polarimetry. In: Roberge, W. G.; Whittet, D. C. B. (Ed.). **Polarimetry of the Interstellar Medium**. [S.l.: s.n.], 1996. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 97), p. 118. 17

MARSH, T. R.; DUCK, S. R. Stroboscopic doppler tomography of fo aqr. **New Astronomy**, v. 1, p. 97–119, 1996. 13

MARTÍNEZ-PAIS, I. G.; RODRÍGUEZ-GIL, P.; CASARES, J. S193: another non-eclipsing sw sex star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 305, p. 661–670, 1999. 12, 15, 43, 45

MUKAI, K. The catalog of ips and ip candidates by right ascension. 2014. Disponível em:
<<http://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/iphone/catalog/alpha.html>>.
Acesso em: 14/03/2016. 80

NASA. **Introduction to Cataclysmic Variables (CVs)**. 2006. Disponível em:
<<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/cvs/cvstext.html>>. Acesso em: 24/01/2016. 13

- PATTERSON, J. Rapid oscillations in cataclysmic variables. vii - gk persei. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 103, p. 1149–1157, 1991. 80
- _____. The dq herculis stars. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 106, n. 697, p. 209–238, 1994. 6, 80
- PATTERSON, J.; FENTON, W. H.; THORSTENSEN, J. R.; HARVEY, D. A.; SKILLMAN, D. R.; FRIED, R. E.; MONARD, B.; O'DONOGHUE, D.; BESHORE, E.; MARTIN, B.; NIARCHOS, P.; VANMUNSTER, T.; FOOTE, J.; BOLT, G.; REA, R.; COOK, L. M.; BUTTERWORTH, N.; WOOD, M. Superhumps in cataclysmic binaries. xxiii. v442 ophiuchi and rx j1643.7+3402. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 114, p. 1364–1381, 2002. xv, 4, 14, 16, 102
- PEREYRA, A. **Dust and magnetic field in dense regions of the interstellar medium**. 2006. 129 p. Tese (Doutorado em Astronomia) — Instituto Astronômico e Geofísico (USP), São Paulo, 2000. 24
- POTTER, S. B.; HAKALA, P. J.; CROPPER, M. 'stokes imaging' of the accretion region in magnetic cataclysmic variables - i. conception and realization. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 297, p. 1261–1268, 1998. 48
- RAMSAY, G.; WHEATLEY, P. J.; NORTON, A. J.; HAKALA, P.; BASKILL, D. The defining characteristics of intermediate polars - the case of three-candidate systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 387, p. 1157–1162, 2008. xv, 47, 48
- RODRIGUES, C. V.; CIESLINSKI, D.; STEINER, J. E. Polarimetry and spectroscopy of the polar rx j1141.3-6410. **Astronomy and Astrophysics**, v. 335, p. 979–984, 1998. 24, 28
- RODRÍGUEZ-GIL, P.; CASARES, J.; MARTÍNEZ-PAIS, I. G.; HAKALA P. AND STEEGHS, D. Evidence of magnetic accretion in an sw sextantis star: Discovery of variable circular polarization in ls pegasi. **The Astrophysical Journal**, v. 548, p. L49–L52, 2001. xv, 12, 13, 15, 44, 45, 46, 48, 69, 79, 80
- RODRÍGUEZ-GIL, P.; CASARES, J.; MARTÍNEZ-PAIS, I. G.; HAKALA, P. J. Detection of variable circular polarization in the sw sex star v795 herculis. In: Gansicke, B. T.; Beuermann, K.; Reinsch, K. (Ed.). **The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects**. [S.l.: s.n.], 2002. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 261), p. 533. 13, 15

RODRÍGUEZ-GIL, P.; GANSICKE, B. T.; HAGEN, H.-J.;
ARAUJO-BETANCOR, S.; AUNGWEROWJIT, A.; PRIETO, C. A.; BOYD, D.;
CASARES, J.; ENGELS, D.; GIANNAKIS, O.; HARLAFTIS, E. T.; KUBE, J.;
LEHTO, H.; MARTÍNEZ-PAIS, I. G.; SCHWARZ, R.; SKIDMORE, W.;
STAUDE, A.; TORRES, M. A. P. Sw sextantis stars: the dominant population of
cataclysmic variables with orbital periods between 3 and 4h. **Monthly Notices of
the Royal Astronomical Society**, v. 377, p. 1747–1762, 2007a. [xv](#), [9](#), [10](#), [11](#), [13](#)

RODRÍGUEZ-GIL, P.; MARTÍNEZ-PAIS, I. G.; RODRÍGUEZ, J. de la C. The
magnetic sw sextantis star rxj1643.7+3402. **Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society**, v. 395, p. 973–978, 2009. [11](#), [12](#), [13](#), [15](#)

RODRÍGUEZ-GIL, P.; POTTER, S. B. Discovery of variable circular polarization
from the remnant of nova chamaeleontis 1953 (rr cha). **Monthly Notice of the
Royal Astronomical Society**, v. 342, p. L1–L4, 2003. [15](#)

RODRÍGUEZ-GIL, P.; SCHMIDTOBREICK, L.; GANSICKE, B. T.
Spectroscopic search for new sw sextantis stars in the 3-4 h orbital period range -
i. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 374, p.
1359–1376, 2007b. [xvi](#), [13](#), [81](#), [82](#), [91](#), [110](#), [115](#), [120](#)

RUDE, G. D.; RINGWALD, F. A. A search for superhumps in the cataclysmic
variable sw sextantis. **New Astronomy**, v. 17, n. 5, p. 533–536, 2012. [41](#)

RYBICKI, G. B. G.; LIGHTMAN, A. P. **Radiative processes in astrophysics**.
New York: Wiley-Interscience, 1979. [7](#)

SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. ii - statistical
aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. **Astrophysical Journal**,
v. 263, p. 835–853, 1982. [68](#)

SCHMIDT, G. D.; ELSTON, R.; LUPIE, O. L. The hubble space telecope
northern-hemisphere grid of stellar polarimetric standards. **The Astronomical
Journal**, v. 104, n. 4, p. 1563–1567, 1992. [29](#), [31](#)

SCHMIDTOBREICK, L. The sw sex phenomenon as an evolutionary stage of
cataclysmic variables. **Central European Astrophysical Bulletin**, v. 37, p.
361–368, 2013. [11](#)

SEMEL, M.; DONATI, J.-F.; REES, D. E. Zeeman-doppler imaging of active
stars. 3: Instrumental and technical considerations. **Astronomy and
Astrophysics**, v. 278, p. 231–237, 1993. [30](#)

- SEMENA, A. N.; REVNIVTSEV, M. G. Estimation of plasma parameters in an accretion column near the surface of accreting white dwarfs from their flux variability. **Astronomy Letters**, v. 38, p. 321–330, 2012. 48
- SEMENA, A. N.; REVNIVTSEV, M. G.; KHAMITOV, I. M.; BURENIN, R. A.; AK, T.; EKER, Z.; PAVLINSKY, M. N. Constraints on accretion column parameters for the intermediate polar ls pegasi from the power spectrum of its optical light curve. **Astronomy Letters**, v. 39, n. 4, p. 227–236, 2013. 41, 43, 48, 49
- SERKOWSKI, K. **Polarimeters for Optical Astronomy**. [S.l.: s.n.], 1974. 135 p. 25
- SHAFTER, A. W. Spectroscopic orbits for the cataclysmic binaries cm delphini, v380 ophiuchi, and vw vulpeculae. **Astronomical Journal**, v. 90, p. 643–646, 1985. 110
- SHUGAROV, S. Y.; KATYSHEVA, N. A.; SEREGINA, T. M.; VOLKOV, I. M.; KROLL, P. Two periods of the variability in v380 oph. **The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects, Proceedings of Astronomical Society of the Pacific Conference**, v. 330, p. 495, 2005. 110
- SILVA, K. M. G. **Modelagem multiespectral da região de acréscimo de polares**. 73 p. Tese de (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.14.14.13/doc/publicacao.pdf>>. 7
- SIMMONS, J. F. L.; STEWART, B. G. Point and interval estimation of the true unbiased degree of linear polarization in the presence of low signal-to-noise ratios. **Astronomy and Astrophysics**, v. 142, p. 100–106, 1985. 27
- SING, D. K.; GREEN, E. M.; HOWELL, S. B.; HOLBERG, J. B.; LOPEZ-MORALES, M.; SHAW, J. S.; SCHMIDT, G. D. Discovery of a bright eclipsing cataclysmic variable. **Astronomy and Astrophysics**, v. 474, p. 951–960, 2007. 15
- SŁOWIKOWSKA, A.; KRZESZOWSKI, K.; ŻEJMO, M.; REIG, P.; STEELE, I. Calibration of the liverpool telescope ringo3 polarimeter. **ARXIV**, 2016. 29
- SLUYS, M. Vorming en evolutie van compacte dubbelsterren. 2006. Disponível em: <<http://hemel.waarnemen.com/Informatie/Sterren/hoofdstuk6.html>>. Acesso em: 23/01/2016. xv, 3

SMITH, D. A.; DHILLON, V. S. The secondary stars in cataclysmic variables and low-mass x-ray binaries. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 301, p. 767–781, 1998. 13

STEPHENSON, C. B. New h-alpha emission stars found above 10 deg galactic latitude. **Astrophysical Journal**, v. 300, p. 779–784, 1986. 43

STOCKMAN, H. S.; SCHMIDT, G. D.; BERRIMAN, G.; LIEBERT, J.; MOORE, R. L.; WICKRAMASINGHE, D. T. A search for circular polarization in cataclysmic variables. **Astrophysical Journal**, v. 401, n. 2, p. 628–641, 1992. 8, 15, 44, 96, 103, 112

SZKODY, P. Subtle signatures of magnetic fields. In: BUCKLEY, D. A. H.; WARNER, B. (Ed.). **Magnetic Cataclysmic Variables**. [S.l.: s.n.], 1995. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 85), p. 54. 80

SZKODY, P.; GARNAVICH, P.; CASTELAZ, M.; MAKINO, F. Ginga and rosat observations of the cataclysmic variable s193. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 106, n. 700, p. 616–618, 1994. 46

SZKODY, P.; GARNAVICH, P.; HOLBERG, J.; SILBER, A.; PASTWICK, L. Iue and voyager observations of the unusual cataclysmic variable s193. **Astronomical Journal**, v. 113, p. 2276–2282, 1997. 46

SZKODY, P.; HENDEN, A.; AGUEROS, M.; ANDERSON, S. F.; BOCHANSKI, J. J.; KNAPP, G. R.; MANNIKKO, L.; MUKADAM, A.; SILVESTRI, N. M.; SCHMIDT, G. D.; STEPHANIK, B.; WATSON, T. K.; WEST, A. A.; WINGET, D.; WOLFE, M. A.; BARENTINE, J. C.; BRINKMANN, J.; BREWINGTON, H. J.; DOWNES, R. A.; HARVANEK, M.; KLEINMAN, S. J.; KRZESINSKI, J.; LONG, D.; NEILSEN, E. H.; NITTA, A.; SCHNEIDER, D. P.; SNEDDEN, S. A.; VOGES, W. Cataclysmic variables from sloan digital sky survey. v. the fifth year (2004). **The Astronomical Journal**, v. 131, p. 973–983, 2006. 15

SZKODY, P.; NISHIKIDA, K.; LONG, K. S.; FRIED, R. X-ray and optical spectra of the unusual cataclysmic variables ls pegasi and t leonis. **The Astronomical Journal**, v. 121, p. 2761–2768, 2001. 44, 46, 50

SZKODY, P.; PICHE, F. The phase 0.5 absorption in v1315 aquilae, sw sextantis, and dw ursae majoris. **Astronomical Journal**, v. 361, p. 235–243, 1990. 9

SZKODY, P.; WADE, R. A. A minisurvey of ?s / unstudied / suspected / variable stars. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 92, p. 806, 1980. 102

TAYLOR, C. J.; THORSTENSEN, J. R.; PATTERSON, J. Ls pegasi: A low-inclination sw sextantis-type cataclysmic binary with high-velocity balmer emission-line wings. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 111, n. 756, p. 184–195, 1999. xv, 10, 43, 44, 45, 47, 50, 69, 73, 80

THORSTENSEN, J. R.; RINGWALD, F. A.; WADE, R. A.; SCHMIDT, G. D.; NORSWORTHY, J. E. A spectroscopic study of the eclipsing cataclysmic binary star pg0818 + 513 - a puzzling novalike variable. **Astronomical Journal**, v. 102, p. 683–687, 1991. xv, 9, 10, 45, 96

TINBERGEN, J. A list of zero-polarization standards. **Astronomical Journal Suppl.**, v. 35, p. 325–326, 1975. 31

TODY, D. The iraf data reduction and analysis system. In: Crawford, D. L. (Ed.). **Instrumentation in astronomy VI**. [S.l.: s.n.], 1986. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 627), p. 733. 24

_____. Iraf in the nineties. v. 52, p. 173, 1993. 24

TOWNSLEY, D. M.; GANSICKE, B. T. Cataclysmic variable primary effective temperatures: Constraints on binary angular momentum loss. **Central European Astrophysical Bulletin**, v. 693, p. 1007–1021, 2009.

TUOHY, I. R.; REMILLARD, R. A.; BRADT, H. V.; BRISSENDEN, R. J. V. 1h 0709-360 - a cataclysmic variable with an orbital period inside the 'period gap'. **Astrophysical Journal**, v. 359, p. 204–210, 1990. 15

VAILLANCOURT, J. E. Placing confidence limits on polarization measurements. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 118, p. 1340–1343, 2006. xv, 27

WARNER, B. **Cataclysmic variable stars**. United Kingdom: Cambridge Astrophysics Series, 1995. 1, 3

WILLIAMS, R. E. Eclipse line profiles in cataclysmic variables - evidence for absence of accretion disks. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 1752–1758, 1989. 12

WOLFE, M. A.; SZKODY, P.; FRASER, O. J.; HOMER, L.; SKINNER, S.; SILVESTRI, N. M. Investigating the sloan digital sky survey cataclysmic variable

sdss j132723.39+652854.2. **The Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 115, p. 1118–1123, 2003. 15

YOUNG, P.; SCHNEIDER, D. P.; SHECTMAN, S. A. Am-herculis - the magnetic maw uncloaks itself. **Astrophysical Journal**, v. 244, p. 1043, 1981. 15

ZACHARIAS, N.; MONET, D. G.; LEVINE, S. E.; URBAN, S. E.; GAUME, R.; WYCOFF, G. L. The naval observatory merged astrometric dataset (nomad). **American Astronomical Society Meeting 205; Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 36, n. 12, p. 1418, 2004. 41

ZELLEM, R.; HOLLON, N.; BALLOUZ, R.-L.; SION, E. M.; GODON, P.; GANSICKE, B. T.; LONG, K. Hubble space telescope stis spectroscopy of the peculiar nova-like variables bk lyn, v751 cygni, and v380 oph. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 121, n. 883, p. 942–951, 2009. 81

APÊNDICE A - CORREÇÃO DE *FLAT-FIELD* POR LÂMINA

Este é um trabalho observacional e buscamos encontrar o procedimento de redução dos dados que forneça os resultados polarimétricos e fotométricos com o menor erro possível. Com este propósito, realizamos um teste para investigar se a correção de *flat-field* pode depender das posições da lâmina promovendo uma maior acuracidade nos resultados dos objetos de ciência.

Durante a observação dos objetos tipo SW Sex, na missão de julho de 2014, foram coletadas cinquenta imagens de *flat-field* para cada uma das dezesseis posições da lâmina no filtro V. Neste apêndice, apresentamos os resultados para 3 procedimentos de redução: (1) utilizando a mesma correção de *flat-field* para todas as posições da lâmina; (2) utilizando uma correção diferente para cada posição e determinada pela média das imagens de *flat* em cada posição e (3) utilizando uma correção de baixa frequência para cada posição e uma mesma correção de alta frequência para todas as posições. Em todos os casos, as imagens foram sempre corrigidas pelo *master bias*.

O procedimento envolvendo a mesma imagem de *flat-field* foi realizada sem combinar as imagens por lâmina, portanto é o método padrão descrito na Seção 2.2. Na correção pela imagem de *flat* por lâmina, as imagens foram agrupadas por lâmina e combinadas pela média com rejeição dos valores que se distanciam da média por mais de 3 vezes o valor do desvio padrão (por pixel), gerando as imagens de *masterflats*, como mostra a Figura A.1, em que dividimos os *masterflats* combinados por posição da lâmina pela imagem do *flat* total combinado. Nestas imagens é possível observar bordas mais escuras em diferentes posições, provavelmente resultado do movimento de rotação da lâmina retardadora.

A sensibilidade pixel a pixel do detector está sempre presente na imagens de *flats* e se manifesta como uma componente com variabilidade em frequências espaciais altas, com valores variando entre pixels contíguos. Por outro lado, o CCD pode ser iluminado de maneira não-uniforme, acompanhado ou não pelo efeito de *vignetting*, resposta que se apresenta como uma variação de frequência mais baixa. Assim, as imagens de *flat-field* podem conter dois tipos de respostas do CCD. O método 3 pressupõe que apenas a resposta de baixa frequência varia com a posição da lâmina, os detalhes do procedimento são descritos a seguir:

Altas frequências, dividimos a imagem de *master flat*, obtida pela média dos *flats* individuais sem normalização e independente da lâmina, pela imagem com apenas o padrão de iluminação;

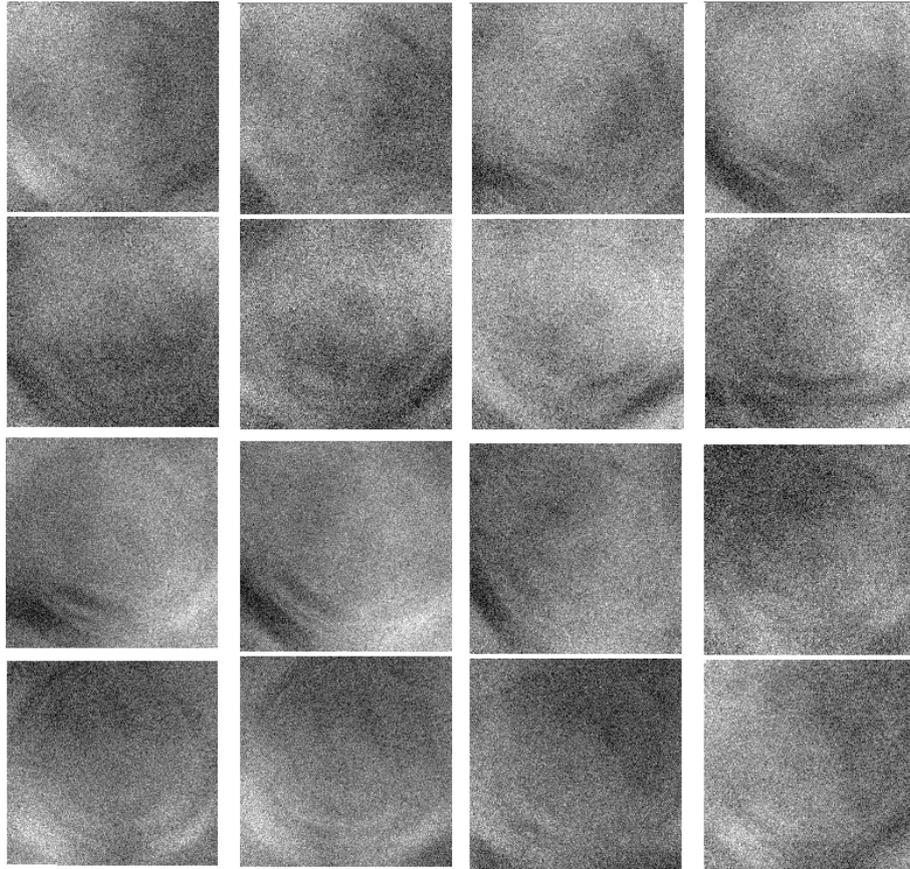
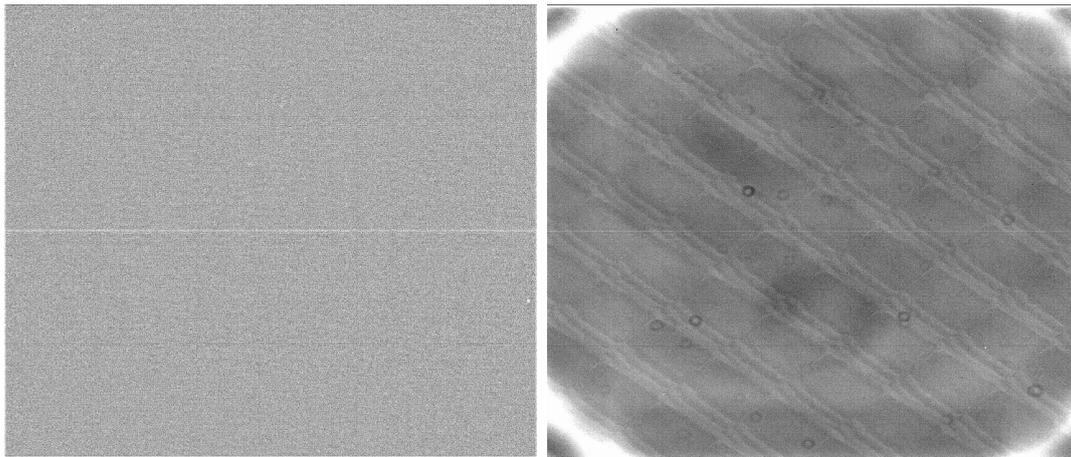


Figura A.1 - Imagens de *flat field* combinadas por lâmina de 1 a 16, da esquerda para direita e de cima para baixo, divididas pela imagem total. Provavelmente as bordas escuras são efeitos do movimento de rotação da lâmina retardadora.

Baixas frequências, usamos as imagens de *master flat* para cada posição da lâmina.

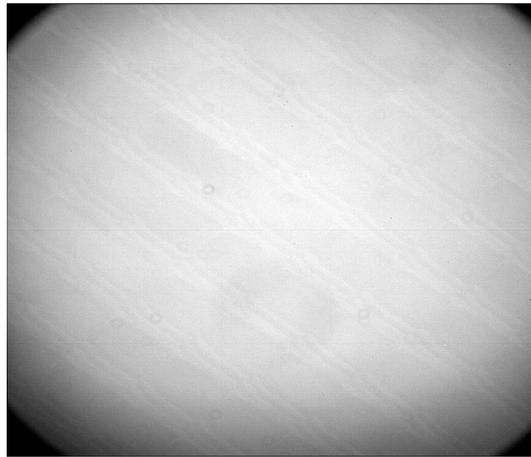
A imagem com apenas o padrão de iluminação foi obtida aplicando na imagem de *master flat* uma suavização para conter as frequências mais altas, que aparecem nas imagens como o padrão de listras inclinadas mostradas na Figura 2.3(b), por exemplo. Com o objetivo de verificar quais rotinas no IRAF seria ideal nesse procedimento, aplicamos um teste: o *boxcar*, que suaviza a imagem pelo tamanho dimensional de uma determinada janela; *mkskycor*, que suaviza pelo tamanho da janela e por um algoritmo de rejeição e o *imsurfit*, que além do tamanho da janela suaviza por uma função. Os resultados mostraram que o *imsurfit* remove o padrão de iluminação das altas frequências melhor que as outras rotinas, mas não completamente, como mostra a Figura A.2

Na Figura A.3 apresentamos as imagens do sistema V442 Oph, em (a), com correção



(a) *Boxcar*

(b) *Mkskycor*



(c) *Imsurfit*

Figura A.2 - Resultados do padrão de iluminação para altas frequências usando diferentes pacotes do IRAF. O melhor resultado é obtido usando a suavização pelo *imsurfit* em que é possível observar o padrão das linhas inclinadas sem comprometimento das bordas.

apenas de *bias*; em (b), com correção do *flat-field* pelo método 3, ou seja usando a correção pelas distintas frequências e em (c) a correção com o método 1, usando a correção pelo *master flat* independente da lâmina. É possível notar que o efeito de escurecimento gradual das bordas da imagem foi corrigido; tanto o método 1 quanto o método 3 mostram boas correções em relação à imagem sem correção por *flat*. O círculo em vermelho indica a estrela em que um simples teste no cálculo da fotometria foi realizado, usando a rotina do Dr. F. Jablonski, PHOTOMEDE. Na Figura A.3(a), a magnitude do feixe 1, que pode ser o feixe ordinário ou o extraordinário, foi $15,75 \pm 0,06$ mag e $15,66 \pm 0,06$ mag no feixe 2. Já na Figura A.3(b), as magnitudes encontradas foram $15,34 \pm 0,06$ mag no feixe 1 e $15,34 \pm 0,05$ mag

no feixe 2, ou seja a correção pelo *flat-field* resultou em contagens iguais para os feixes. Resultado similar ao método 3 foi encontrado pelo método 1, Figura A.3(c), a magnitude do feixe 1 foi $15,32 \pm 0,05$ mag e do feixe 2 foi $15,33 \pm 0,05$ mag. No entanto, a correção destas regiões não afetam diretamente o resultado dos objetos de estudo, pois geralmente a estrela de referência localiza-se no centro da imagem e as estrelas escolhidas como referência e comparação usadas na calibração fotométrica (Seção 2.4.3) são escolhidas próximas da VC e não nas estrelas das extremidades. Aplicando o mesmo teste numa estrela localizada no centro (círculo azul nas figuras), as magnitudes foram iguais em qualquer método de correção de *flat-field*, $12,47 \pm 0,01$ e $12,48 \pm 0,01$, nos feixes 1 e 2, respectivamente.

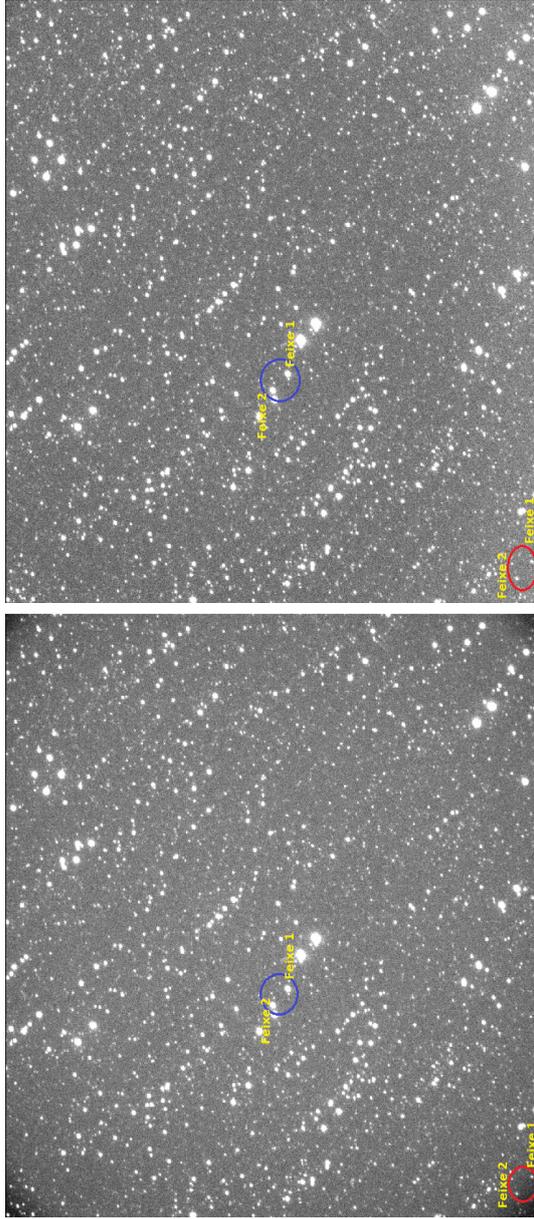
Os resultados da polarização circular de uma estrela fraca nos campos dos sistemas V380 Oph e V442 Oph são dados na Tabela A.1 para os distintos métodos aplicados na correção da imagem de *flat-field*. A diferença da dispersão da polarização circular média, $\langle\sigma_V\rangle$, para as correções pelos métodos 2 e 3 em relação ao método 1, em média é consistente com zero, isto indica que não há um resultado que favoreça os métodos 2 e 3, portanto a correção por *flat-field* para cada posição da lâmina não será aplicado, e não justifica o longo tempo gasto na coleta dos dados de calibração.

Tabela A.1 - Resultado da polarização circular para amostra de cinco objetos tipo SW Sex.

Objetos	Campo da VC	Método	$\langle V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle V \rangle}$ (%)	$\langle \sigma_V \rangle$ (%)	$\sigma_{\langle \sigma_V \rangle}$ (%)
0960-0317196	V380 Oph	1	-0,073	0,316	0,411	0,168
		2	-0,072	0,321	0,428	0,175
		3	-0,061	0,323	0,371	0,185
0737-0410062	V442 Oph	1	-0,084	0,456	0,280	0,130
		2	-0,012	0,455	0,286	0,109
		3	-0,064	0,447	0,291	0,130

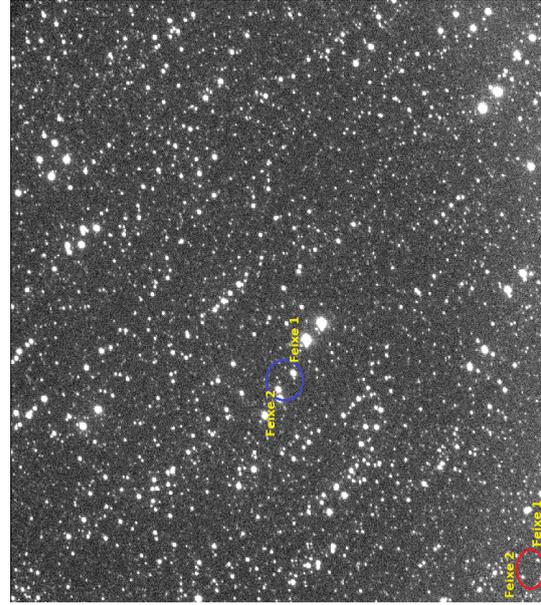
Legenda:

- 1- Método de correção pela imagem de *master flat* com todas as imagens;
- 2- Método de correção pela imagem de *master flat* por lâmina;
- 3- Método de correção pela imagem de *flat-field* por distintas frequências.



(a) Correção de *Bias*

(b) Correção de *flat-field* pelo método 3



(c) Correção de *flat-field* pelo método 1

Figura A.3 - Resultado da correção por *flat-field* no sistema V442 Oph pelos distintos métodos. Visualmente a correção diminuiu o obscurecimento das bordas como mostra a estrela de campo dentro o círculo em vermelho.