



OBSERVATÓRIO NACIONAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES
ROTACIONAIS DE ASTEROIDES EM ÓRBITAS
PRÓXIMAS DA TERRA ATRAVÉS DO PROJETO
IMPACTON

FILIPPE VIEIRA DE MELO MONTEIRO

ORIENTADORA: DRA. DANIELA LAZZARO

RIO DE JANEIRO - RJ
2016

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ROTACIONAIS DE ASTEROIDES
EM ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA ATRAVÉS DO PROJETO IMPACTON

Filipe Vieira de Melo Monteiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro
Julho de 2016

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ROTACIONAIS DE ASTEROIDES
EM ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA ATRAVÉS DO PROJETO IMPACTON

Filipe Vieira de Melo Monteiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCTI COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

Prof. Dra. Daniela Lazzaro,

Prof. Dr. Simone Ieva,

Prof. Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal,

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2016

Vieira de Melo Monteiro, Filipe

Determinação das Propriedades Rotacionais de Asteroides em Órbitas Próximas da Terra Através do Projeto IMPACTON/Filipe Vieira de Melo Monteiro. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2016.

XVII, 161 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Daniela Lazzaro

Dissertação (mestrado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 153 – 161.

1. Asteroides próximos da Terra. 2. Período de rotação. 3. Observação. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

Aos meus pais, Marinalva e Zito, por participarem de minha longa e destemida jornada de longos anos de esforço e superação, e pelo grande incentivo dado desde a minha infância para o meu desenvolvimento intelectual e profissional, pela constante fonte de inspiração e força de vontade para superar os obstáculos dessa árdua, porém, compensadora trajetória. Obrigado pelo apoio que vocês tem me dado, por se angustiarem com as minhas derrotas e vibrarem com as minhas vitórias. Obrigado por me ensinarem a lutar pelos meus sonhos.

De um modo bem carinhoso e em especial, à minha eterna namorada Plícida Maria da Silva Arcoverde que com muito empenho e dedicação, paciência e amor fez com que a distância assim como as batalhas travadas ao longo deste mestrado tornassem meros instrumentos de inspiração para vitória plena e bem sucedida.

Agradecimentos

Depois de muito esforço e dedicação, chego ao fim desta minha jornada que não seria possível sem o apoio e colaboração de muitos, para os quais aqui apresento meus agradecimentos.

Agradeço a todos os meus 13 tios e tias, pelo apoio a minha carreira e pela felicidade de sempre. **Aos meus 35 primos**, pela alegria de sempre ao nos encontrarmos. Em especial, agradeço a minha **vóvó Juju**, pelo carinho que sempre tem me dado. E também não posso deixar de lembrar e agradecer aos meus avôs, **vovô Bui e vovô Toinho**, e minha avó **vovó Adelaide**, que já não estão mais entre nós, mas com certeza estão muito felizes por mais esta conquista.

À meus pais, Marinalva e Zito, por todo o amor derramado sobre mim.

À Márcia e ao Romero, meus sogros, pelo acolhimento dado desde os primeiros dias em que coloquei os pés em Bonança.

À Plícida, minha noiva, pelo apoio nos momentos difíceis em que precisei estar seguro e forte.

Ao Observatório Nacional, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Ao grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional: a todos os professores e alunos, pela oportunidade de participar de um grupo qualificado e diversificado onde é feita uma constante discussão de diversos temas científicos.

Aos amigos observadores: Carol, Carmen, Pedro, Florian, Hissa e Plícida, pelas noites de observação na sala de operações remotas, pelas pizzas, pelas conversas, risadas, mas principalmente pelas noites de descanso que vocês me proporcionaram.

Ao professor e amigo Dr. Antonio Carlos S. Miranda pelo incentivo e pelas conversas que despertaram em mim uma grande paixão pela Astronomia, que me ajudou com alegria a concluir o curso de Física e agora o mestrado em Astronomia.

À amiga Maryory, pela parceria de 2 anos vivendo sobre o mesmo teto desde a nossa chegada no RJ. **Aos amigos do ON: Carmen, Carol, Carlos Basante, Sandro, Vladimir (El petralha), Mário de Prá, Eduardo, Walter, Anderson, Flora, Isabela, Diego e Felipes**, pelos papos na sala, na copa ou nos corredores. **Aos amigos de Recife: Mário, Wagner, Elias, Luciano e Romulo**, pela amizade de todos esses anos.

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiou este trabalho.

À equipe do projeto IMPACTON, pelos esforços concedidos a elaboração e implantação de uma infraestrutura no Sertão de Pernambuco (Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica) para pesquisa de pequenos corpos do Sistema Solar.

Ao super técnico do IMPACTON, Roberto Souza, pelas soluções rápidas para os problemas enfrentados, e por ser um profissional paciente e prestativo.

À Teresinha Rodrigues, por toda dedicação e disposição constante para manter o OASI em pleno funcionamento para que este trabalho tivesse êxito.

Ao mestre, Dr. Sergio Silva, pela parceria durante todo o desenvolvimento deste trabalho, seja com as observações ou com as diversas dúvidas com relação à redução dos dados. Gracias muchacho!!

Especialmente agradeço **à minha orientadora, Dra. Daniela Lazzaro**, por sua grandiosa paciência e parceria incentivadora na escolha desse tema e pela oportunidade de participar do projeto IMPACTON. Obrigado pela atenção e dedicação dados ao longo de todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ROTACIONAIS DE ASTEROIDES EM ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA ATRAVÉS DO PROJETO IMPACTON

Filipe Vieira de Melo Monteiro

Julho/2016

Orientador: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

Neste trabalho foram obtidos dados fotométricos de 35 asteroides próximos da Terra (NEA). Estes dados foram obtidos no telescópio de 1m do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (Itacuruba, PE), e foram utilizados para determinar o período de rotação, estimativas da forma e direção do eixo de rotação dos NEA observados. A determinação dessas propriedades físicas são importantes para um melhor entendimento da formação e evolução tanto dos objetos estudados como da população dos NEA quando analisados de forma coletiva. Além disso, este estudo se torna fundamental quando se trata de objetos que podem vir a colidir com a Terra um dia. Apenas cerca de 7% dos NEA conhecidos (cerca de 14.500) tem seus períodos de rotação determinados, e apenas 1% tem suas direções de rotação. A partir deste problema, considera-se que é necessário aumentar a amostra de objetos próximos da Terra com propriedades rotacionais determinadas, para que as estatísticas sejam cada vez mais representativas do comportamento desse conjunto. Neste trabalho utilizamos os métodos de ajuste em série de Fourier para a determinação do período, e o de inversão de curvas de luz, para a obtenção da direção do eixo de rotação e modelo de forma. Determinamos ao todo 26 períodos de rotação, com valores compreendidos entre alguns minutos e 11 horas, e para 7 asteroides fizemos uma estimativa do período de rotação. Entre os NEA com período determinado foi também obtida a direção do eixo de rotação e um modelo de forma para 2 desses objetos.

Abstract of Dissertation presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DETERMINATION OF ROTATIONAL PROPERTIES OF NEAR-EARTH
ASTEROIDS THROUGH IMPACTON PROJECT

Filipe Vieira de Melo Monteiro

July/2016

Advisor: Daniela Lazzaro

Department: Astronomy

Photometric data for 35 Near-Earth Asteroids (NEA) were obtained in the present work. The data were acquired at the 1-m telescope of the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI - (Itacuruba, PE) and were used to derive the rotational period and an estimate of the shape and the spin direction of the observed asteroids. These physical properties are fundamental in order to achieve a better knowledge on the formation and evolution not only of the observed bodies but also of the NEA population as a whole. Moreover, these properties are of utmost relevance in the case of objects which might collide with Earth in the future. Presently, only 7% of the nearly 14,500 known NEA do have their rotational period determined and for just 1% of these also the spin direction is known. It is thus clear the need for an increase of the sample of objects with known rotational properties in order to perform robust statistical analyses. In the present study the rotational period was determined using a Fourier series analysis method, while the spin direction and shape were derived using a lightcurve inversion method. The rotational period, varying from 5 minutes up to 11 hours, for 26 asteroids was here derived while an indication was obtained for other 7 objects. For 2 asteroids among those with determined rotational period, we also derived the spin direction and a shape model.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução e Motivação	1
1.1 Asteroides próximos da Terra - NEA	1
1.2 Propriedades rotacionais dos NEA	9
1.3 IMPACTON	15
2 Metodologia	17
2.1 A curva de luz e a geometria de observação	17
2.2 Determinação do Período de Rotação	21
2.3 Determinação da direção de polo e da forma	24
2.4 Fotometria relativa ou diferencial	27
3 Observações astronômicas e processamento dos dados	32
3.1 Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI	33
3.1.1 Telescópio	34
3.1.2 Cúpula	39
3.1.3 Câmera CCD e sistema de filtros	40
3.1.4 Outros equipamentos	41
3.2 A amostra	43
3.3 Observação e processamento dos dados	45
4 Resultados e Discussões	54
4.1 NEA com propriedades rotacionais e modelo de forma determinados .	56
4.1.1 (348400) 2005 JF21	56
4.1.2 (436724) 2011 UW158	61
4.2 NEA com período de rotação determinados	68
4.2.1 (31221) 1998 BP26	69
4.2.2 (52381) 1993 HA	71
4.2.3 (68278) 2001 FC7	73

4.2.4	(88263) 2001 KQ1	74
4.2.5	(138847) 2000 VE62	78
4.2.6	(141354) 2002 AJ29	80
4.2.7	(142040) 2002 QE15	83
4.2.8	(155110) 2005 TB	87
4.2.9	(163243) 2002 FB3	89
4.2.10	(194268) 2001 UY4	92
4.2.11	(250706) 2005 RR6	94
4.2.12	(315098) 2007 EX	96
4.2.13	(337069) 1998 FX134	98
4.2.14	(337866) 2001 WL15	100
4.2.15	(425713) 2011 BK24	104
4.2.16	(430544) 2002 GM2	107
4.2.17	(436775) 2012 LC1	109
4.2.18	(442243) 2011 MD11	112
4.2.19	(450160) 2000 RM12	114
4.2.20	(459872) 2014 EK24	115
4.2.21	1998 GL10	118
4.2.22	2015 CA1	121
4.2.23	2015 FS332	123
4.2.24	2016 HL	126
4.3	Curvas de luz incompletas	128
4.3.1	(9400) 1994 TW1	128
4.3.2	(86666) 2000 FL10	130
4.3.3	(152679) 1998 KU2	132
4.3.4	(154807) 2004 PP97	135
4.3.5	(189008) 1996 FR3	137
4.3.6	(235756) 2004 VC	139
4.3.7	(423747) 2006 CX	141
4.4	Curvas de luz com pouca variação ou com grande dispersão	142
4.4.1	(413192) 2002 VY94	142
4.4.2	2012 TM139	143
4.5	Discussão	145
5	Conclusões e perspectivas	151
	Referências Bibliográficas	153

Lista de Figuras

1.1	<i>Ilustração esquemática das órbitas características dos diferentes subgrupos de NEA.</i>	4
1.2	<i>Ilustração mostrando a diferença entre a órbita de um asteroide próximo da Terra típico (em azul) e um PHA (em laranja). Os PHAs possuem órbitas mais próximas à da Terra, chegando a aproximadamente 8 milhões de km, e eles são grandes o suficiente para sobreviver à passagem pela atmosfera terrestre e causar danos em escalas regionais ou superior. Figura retirada de http://www.jpl.nasa.gov/wise/newsfeatures.cfm?release=2012-138.</i>	5
1.3	<i>No gráfico é dada a localização dos planetas interiores do Sistema Solar, de Mercúrio até Júpiter, e os pequenos corpos desta região, no dia 5 de julho de 2016. Os NEA estão representados em vermelho. Gráfico retirado de http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot.html.</i>	7
1.4	<i>Dependência da latitude eclíptica (β) da direção do eixo de rotação com o diâmetro. Gráfico retirado de Hanuš et al. (2011).</i>	13
1.5	<i>Distribuição da latitude eclíptica da direção do eixo de rotação de NEA. Gráfico retirado de Silva (2015).</i>	14
2.1	<i>Geometria de observação Sol-Asteroide-observador onde são indicados os ângulos de aspecto, θ, e de fase solar, α. Figura retirada de Silva (2015).</i>	18
2.2	<i>Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos de aspecto.</i>	19
2.3	<i>Variação do ângulo de fase observado em diferentes geometrias orbitais. Figura retirada de Buchheim (2010).</i>	20
2.4	<i>Forma da curva de luz conforme sua dependência com a forma do asteroide, a geometria da observação, o espalhamento da luz pela superfície e irregularidades, e as variações de albedo do asteroide.</i>	20
2.5	<i>Ilustração da curva de luz gerada em função do tempo da rotação de um objeto oblato irregular.</i>	22

2.6	<i>Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, as estrelas do campo e ao céu. (a) Esquema da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide (círculo de raio a) e ao céu (anel $b - c$). (b) Representação real da abertura na qual é medida a magnitude instrumental do asteroide 2002AJ29, das estrelas de referência (Ref1) e de verificação (Ck1) a partir do software MaxIm DL. A partir do número de contagens dentro da abertura do objeto subtraído do valor do fundo do céu deriva-se a magnitude instrumental do objeto.</i>	29
2.7	<i>Curvas de luz do asteroide (436724) 2011 UW158 e da estrela de verificação utilizando magnitudes relativas. As magnitudes são obtidas a partir da diferença entre a magnitude instrumental do objeto e da estrela de comparação. O erro médio em cada ponto fotométrico da curva de luz do asteroide é de aproximadamente 0,007 magnitude.</i>	31
3.1	<i>Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI.</i>	34
3.2	<i>Telescópio de 1,0 metro do projeto IMPACTON. Vista (a) lateral e (b) traseira do telescópio.</i>	34
3.3	<i>Desenho óptico do redutor/corretor focal.</i>	35
3.4	<i>Tubo do telescópio.</i>	36
3.5	<i>Esquema do suporte do espelho.</i>	37
3.6	<i>Esquema da montagem alto-azimutal, como a instalada no OASI.</i>	37
3.7	<i>Imagem típica da tela Autoslew, software de automação do telescópio.</i>	38
3.8	<i>Cúpula do OASI</i>	39
3.9	<i>Porcentagem de eficiência quântica em função do comprimento de onda para o modelo Apogee Alta U42 (curva vermelha). A curva em azul mostra a eficiência quântica para o CCD modelo U42-UV que tem maior eficiência próximo do ultravioleta e menor na região do visível.</i>	40
3.10	<i>Câmera CCD Apogee, modelo Alta U42, acoplada à roda de filtros.</i>	41
3.11	<i>Imagens do céu de Itacuruba/PE em noites de observação feitas pela All-Sky. (a) Sem nuvens e (b) com nuvens.</i>	41
3.12	<i>Vista da All-Sky e da estação meteorológica, além da antena receptora do link de internet.</i>	42
4.1	<i>Curvas de luz de (34840) 2005 JF21 de julho a novembro/2015.</i>	57
4.2	<i>Curvas de fase para (348400) 2005 JF21 com os dados de setembro, outubro e novembro/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	59
4.3	<i>Curva de fase para (348400) 2005 JF21 retirada de Stephens and Warner (2016).</i>	60
4.4	<i>Curva de fase para o satélite de (348400) 2005 JF21 retirada de Stephens and Warner (2016).</i>	60

4.5	<i>Modelo de forma para (348400) 2005 JF21. Esta forma foi obtida utilizando apenas dados do OASI.</i>	61
4.6	<i>Curvas de luz de (436724) 2011 UW158 de maio, junho e julho/2015. . .</i>	62
4.7	<i>Curvas de luz de (436724) 2011 UW158 de setembro e outubro/2015. . .</i>	63
4.8	<i>Curvas de fase para (436724) 2011 UW158 com os dados de maio e junho/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	64
4.9	<i>Curvas de fase para (436724) 2011 UW158 com os dados de julho, setembro e outubro/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	65
4.10	<i>Modelo de forma para (436724) 2011 UW158. Esta forma foi obtida utilizando apenas dados do OASI.</i>	66
4.11	<i>Imagens de delay-doppler de (436724) 2011 UW158 obtidas em 18 de julho de 2015 a partir do Goldstone radar observatory, usando o instrumento DSS-14 para transmitir e o Green Bank Telescope (GBT) para receber. A resolução é de $7,5 \text{ m} \times 5 \text{ Hz}$. Fonte: http://echo.jpl.nasa.gov/</i>	68
4.12	<i>Curvas de luz de (31221) 1998 BP26.</i>	69
4.13	<i>Curva de fase para (31221) 1998 BP26 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	70
4.14	<i>Curva de fase para (31221) 1998 BP26 retirada de Hergenrother and Whitley (2009).</i>	71
4.15	<i>Curvas de luz de (52381) 1993 HA obtidas a partir de observações realizadas em dezembro/2015.</i>	72
4.16	<i>Curva de fase para (52381) 1993 HA utilizando as observações de dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	73
4.17	<i>Curvas de luz do asteroide (68278) 2001 FC7.</i>	73
4.18	<i>Curva de fase para (68278) 2001 FC7 onde a linha representa o melhor ajuste.</i>	74
4.19	<i>Curvas de luz de (88263) 2001 KQ1 obtidas a partir das observações realizadas em novembro e dezembro/2015.</i>	75
4.20	<i>Curvas de luz de (88263) 2001 KQ1 obtidas a partir das observações realizadas em dezembro/2015.</i>	76
4.21	<i>Curvas de fase para (88263) 2001 KQ1 com os dados de novembro e dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	77
4.22	<i>Curva de fase para (88263) 2001 KQ1 retirada de Warner (2016b).</i>	78
4.23	<i>Curvas de luz de (138847) 2000 VE62 obtidas a partir das observações realizadas em março, abril e maio/2015.</i>	79
4.24	<i>Curva de fase para (138847) 2000 VE62 utilizando as observações de março, abril e maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste. . .</i>	80
4.25	<i>Curvas de luz de (141354) 2002 AJ29 obtidas a partir das observações realizadas em março/2016.</i>	81

4.26	<i>Curvas de luz de (141354) 2002 AJ29 obtidas a partir das observações realizadas em abril e maio/2015.</i>	82
4.27	<i>Curva de fase para (141354) 2002 AJ29 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	83
4.28	<i>Curvas de luz de (142040) 2002 QE15 obtidas utilizando as observações de outubro/2015.</i>	84
4.29	<i>Curvas de luz de (142040) 2002 QE15 obtidas utilizando as observações de novembro e dezembro/2015.</i>	85
4.30	<i>Curvas de fase para (142040) 2002 QE15 com os dados de outubro, novembro e dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste. . .</i>	86
4.31	<i>Curvas de fase para (142040) 2002 QE15 de Warner (2016a).</i>	87
4.32	<i>Curvas de luz de (155110) 2005 TB.</i>	87
4.33	<i>Curva de fase para (155110) 2005 TB utilizando as observações de novembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	88
4.34	<i>Curva de fase para (155110) 2005 TB retirada de Warner (2016b).</i>	89
4.35	<i>Curva de fase para (155110) 2005 TB retirada de Carbognani and Buzzi (2016).</i>	89
4.36	<i>Curvas de luz de (163243) 2002 FB3 obtidas a partir das observações realizadas em março e abril/2015.</i>	90
4.37	<i>Curva de fase para (163243) 2002 FB3 utilizando as observações de março e abril/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	91
4.38	<i>Curvas de luz de (194268) 2001 UY4.</i>	92
4.39	<i>Curva de fase para (194268) 2001 UY4 utilizando as observações de novembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	93
4.40	<i>Curva de fase para (194268) 2001 UY4 retirada de Warner (2016b).</i>	93
4.41	<i>Curvas de luz de (250706) 2005 RR6.</i>	95
4.42	<i>Curvas de fase para (250706) 2005 RR6 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	96
4.43	<i>Curvas de luz de (315098) 2007 EX obtidas a partir das observações realizadas em abril e maio/2015.</i>	97
4.44	<i>Curva de fase para (315098) 2007 EX utilizando as observações de maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	98
4.45	<i>Curvas de luz de (337069) 1998 FX134 obtidas a partir das observações realizadas em maio e junho/2015.</i>	99
4.46	<i>Curva de fase para (337069) 1998 FX134 com os dados de maio/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	100
4.47	<i>Curvas de luz de (337866) 2001 WL15 obtidas a partir das observações realizadas em dezembro/2015 e março/2016.</i>	101

4.48	<i>Curvas de luz de (337866) 2001 WL15 obtidas a partir das observações realizadas em março e abril/2016.</i>	102
4.49	<i>Curvas de fase para (337866) 2001 WL15 com os dados de dezembro, março e abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	103
4.50	<i>Curva de fase para (337866) 2001 WL15 retirada de Hicks et al. (2016).</i>	104
4.51	<i>Curvas de luz de (425713) 2011 BK24.</i>	105
4.52	<i>Curva de fase para (425713) 2011 BK24 com os dados de abril/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	106
4.53	<i>Curvas de luz de (436724) 2002 GM2.</i>	108
4.54	<i>Curva de fase de (337069) 2002 GM2 utilizando observações de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	109
4.55	<i>Curva de fase para (436724) 2002 GM2 retirada de Warner (2015).</i>	109
4.56	<i>Curvas de luz de (436724) 2012 LC1.</i>	110
4.57	<i>Curva de fase para 337069 (2012 LC1) com os dados de maio/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	110
4.58	<i>Curva de fase para 436724 (2012 LC1) retirada de Warner (2015).</i>	111
4.59	<i>Curvas de luz para (442243) 2011 MD11.</i>	112
4.60	<i>Curva de fase para (442243) 2011 MD11 sendo que a linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	113
4.61	<i>Curva de fase para (442243) 2011 MD11 retirada de Warner (2016b).</i>	113
4.62	<i>Curvas de luz de (450160) 2000 RM12.</i>	114
4.63	<i>Curva de fase para (450160) 2000 RM12 com os dados de abril/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	115
4.64	<i>Curvas de luz de (337069) 2014 EK24.</i>	116
4.65	<i>Curva de fase para (337069) 2014 EK24 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	117
4.66	<i>Curva de fase para (337069) 2014 EK24 reproduzida de Godunova et al. (2016).</i>	118
4.67	<i>Curvas de luz de 1998 GL10 obtidas utilizando as observações de janeiro e março/2015.</i>	119
4.68	<i>Curvas de luz de 1998 GL10 obtidas utilizando as observações de março/2015</i>	120
4.69	<i>Curva de fase para 1998 GL10 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	121
4.70	<i>Curvas de luz de 2015 CA1.</i>	122
4.71	<i>Curva de fase para 2015 CA1 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.</i>	123
4.72	<i>Curvas de luz de 2015 FS332.</i>	124
4.73	<i>Curva de fase para 2015 FS332 utilizando as observações de outubro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	124

4.74	<i>Curva de fase para 2015 FS332 retirada de Godunova et al. (2016).</i>	125
4.75	<i>Curva de fase para 2015 FS332 retirada de Warner (2016a).</i>	126
4.76	<i>Curvas de luz de 2016 HL.</i>	127
4.77	<i>Curva de fase para 2016 HL utilizando as observações de maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	127
4.78	<i>Curvas de luz de (9400) 1994 TW1 utilizando as noites de setembro/2015.</i>	129
4.79	<i>Curva de fase para (9400) 1994 TW1 retirada de Warner (2016a).</i>	129
4.80	<i>Curvas de luz de (86666) 2000 FL10 utilizando as noites de setembro e outubro/2015.</i>	131
4.81	<i>Curva de fase para (86666) 2000 FL10 retirada de Warner (2016a).</i>	132
4.82	<i>Curvas de luz de (152679) 1998 KU2 de junho e julho/2015.</i>	133
4.83	<i>Curvas de luz de (152679) 1998 KU2 de setembro/2015.</i>	134
4.84	<i>Curva de fase para (152679) 1998 KU2 utilizando observações de setembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	134
4.85	<i>Curva de fase para (152679) 1998 KU2 retirada de Clark (2016).</i>	135
4.86	<i>Curva de fase para (152679) 1998 KU2 retirada de Warner (2016b).</i>	135
4.87	<i>Curvas de luz para (154807) 2004 PP97.</i>	136
4.88	<i>Curva de fase para (154807) 2004 PP97 retirada de Warner (2016a).</i>	137
4.89	<i>Curva de luz de (189008) 1996 FR3 de uma noite de abril/2015.</i>	137
4.90	<i>Curva de fase para (189008) 1996 FR3 utilizando a observação de abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	138
4.91	<i>Curva de fase para (189008) 1996 FR3 retirada de Warner (2015).</i>	139
4.92	<i>Curva de luz de (235756) 2004 VC.</i>	139
4.93	<i>Curva de fase para (235756) 2004 VC utilizando a observação de abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	140
4.94	<i>Curva de fase para (235756) 2004 VC retirada de Warner (2015).</i>	141
4.95	<i>Curva de luz para (436724) 2006 CX.</i>	141
4.96	<i>Curva de luz de (436724) 2002 VY94.</i>	142
4.97	<i>Curva de luz de 2012 TM139.</i>	143
4.98	<i>Curva de fase para 2012 TM139 retirada de Warner (2016a) representando o primeiro ajuste.</i>	144
4.99	<i>Gráfico da frequência de rotação × diâmetro (rotation frequency × diameter). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação (ou "spin barrier"). O NEA (436724) 2011 UW158 está mostrado como um grande ponto preto, onde a linha vermelha que o corta é a faixa (ou barra de erro) de diâmetro correspondente ao objeto.</i>	150

Lista de Tabelas

1.1	<i>Resumo das definições dos subgrupos dos NEA.</i>	6
3.1	<i>Características da óptica do telescópio.</i>	35
3.2	<i>Características da cúpula.</i>	39
3.3	<i>Amostra de objetos observados.</i>	44
3.4	<i>Efemérides dos asteroides nas noites de observação.</i>	48
4.1	<i>Resumo dos resultados obtidos, seguindo a ordem de sua análise no texto.</i>	146

Capítulo 1

Introdução e Motivação

1.1 Asteroides próximos da Terra - NEA

Os asteroides em órbita próxima da Terra conhecidos como NEA, do inglês *Near Earth Asteroid*, são definidos como objetos cuja órbita tem periélio menor ou igual a 1,3 UA, ou um afélio maior ou igual a 0,983 UA. Esses limites implicam que os objetos, em geral asteroides e cometas dormentes ou inativos, cruzam ou se aproximam bastante da órbita da Terra. O primeiro NEA a ser descoberto foi o asteroide 433 Eros. Este objeto foi descoberto em 13 de agosto de 1898 pelo astrônomo alemão Gustav Witt em Berlin e, independentemente, por Auguste Charlois em Nice, França. Desde então, a quantidade de objetos conhecidos desta população tem crescido constantemente.

Dentro do Sistema Solar os NEA compõem uma população extremamente importante tanto do ponto de vista científico como social e, portanto, é uma das populações mais interessantes de ser estudada por diversas razões. Em primeiro lugar, assim como os demais pequenos corpos do Sistema Solar, os NEA guardam vestígios sobre os estágios iniciais da formação do Sistema Solar. Em particular, a cronologia dos diversos eventos ocorridos é estudada em grande detalhe nos meteoritos que provêm diretamente da população dos NEA. Vale salientar que alguns meteoritos são tão antigos quanto o Sistema Solar e podem trazer informações até mesmo sobre a nebulosa que deu origem a todos os seus componentes.

Outro aspecto interessante é que, diferentemente dos mais abundantes asteroides do Cinturão Principal ou MBA (do inglês, *Main Belt Asteroid*), que orbitam o Sol em um vasto cinturão entre Marte e Júpiter, os NEA são uma população de objetos transientes. Estudos dinâmicos indicam que a expectativa de vida de um objeto na região dos NEA é da ordem de alguns milhões de anos (Bottke

et al., 2002; Morbidelli et al., 2002). Isto implica que não podem ter permanecido em suas localizações atuais desde o início do Sistema Solar e, mais importante ainda, que a população deve estar sempre sendo renovada com objetos entrando e outros sendo ejetados da região. Segundo alguns autores (Bottke et al., 2002; Morbidelli et al., 2002), a principal fonte de origem dos NEA é a região do Cinturão Principal de asteroides através principalmente de ressonâncias com Júpiter. Essas ressonâncias podem transportar asteroides do Cinturão Principal para a região dos NEA, via encontros próximos com Marte, numa escala de tempo de 10^5 anos. Além das colisões e das interações dinâmicas, o efeito Yarkovsky desempenha o papel relevante em mover pequenos asteroides (menores do que dezenas de quilômetros). Foi verificado computacionalmente que o efeito provoca uma migração lenta no semieixo maior dos MBA, alguns dos quais são, por conseguinte, capturados em ressonâncias e transportados para a região dos NEA (Bottke et al., 2002; Morbidelli and Vokrouhlický, 2003). Asteroides que cruzam a órbita de Marte podem permanecer nesta região por cerca de dezenas de milhões de anos antes das suas órbitas serem perturbadas por interações gravitacionais e, conseqüentemente, se tornem cruzadores da órbita da Terra (Michel et al., 2000a). Dessa forma, estudos das propriedades físicas dos NEA e sua comparação com as diversas populações do Cinturão Principal de asteroides podem fornecer informações relevantes sobre a origem e os mecanismos de transporte dos NEA (Binzel et al., 2015).

Um terceiro aspecto é de que por se aproximarem da Terra, podem ser estudados com telescópios menores além do fato de ser possível observar objetos bem menores do que no Cinturão Principal (Lupishko and Di Martino, 1998; Binzel et al., 2002). Neste sentido, o estudo desta população nos permite obter informações sobre as propriedades físicas dos menores corpos do Sistema Solar.

Por fim, a importância de pesquisar os NEA é o risco de que esta população representa para a Terra devido à possibilidade de colisão com a mesma (Morrison et al., 2002). Atualmente acredita-se que todas as maiores extinções em massa ocorridas ao longo da história da Terra tenham tido como causa a colisão de um NEA de tamanho da ordem de quilômetros. Isso acredita-se que tenha ocorrido na península de Yucatán (México) formando a cratera de Chicxulub à qual é atribuída a extinção dos dinossauros a cerca de 65 milhões de anos atrás. A possibilidade de uma colisão de um NEA com o nosso planeta dá ao estudo uma dimensão social importante.

Os NEA são convencionalmente divididos em 4 subgrupos de acordo com suas características orbitais a , q , Q (semieixo maior, distância ao periélio, distância ao afélio) e são chamados de Amor, Apollo, Aten e Atiras (Shoemaker et al., 1979;

Michel et al., 2000b). Os asteroides do subgrupo Amor são definidos como corpos que tem órbitas com distâncias ao periélio maior do que a distância ao afélio da Terra, isto é, que satisfazem as seguintes relações:

$$a \geq 1 \text{ UA e } 1,017 < q \leq 1,3 \text{ UA.}$$

Asteroides do subgrupo Apollo são definidos de acordo com as seguintes condições:

$$a \geq 1 \text{ UA e } q \leq 1,017 \text{ UA,}$$

onde 1,017 é a distância ao afélio (Q) da Terra, portanto, eles se sobrepõem a órbita da Terra quando próximos de seus periélios.

Os asteroides Atens também possuem órbitas que cruzam a da Terra, com semi-eixo maior e distância ao afélio satisfazendo as seguintes relações:

$$a < 1 \text{ UA e } Q > 0,983 \text{ UA.}$$

Por fim, os integrantes do subgrupo Atira têm órbitas estritamente dentro da órbita da Terra: a distância ao afélio de um asteroide Atira (Q) é menor do que a distância ao periélio da Terra (0,983 UA). Isto implica que o semi-eixo maior do asteroide é também menor do que 0,983 AU. A relação que define este subgrupo é a seguinte:

$$a < 1 \text{ UA e } Q < 0,983 \text{ UA.}$$

O subgrupo Atira foi definido após a descoberta do asteroide 1998 DK36 (Tholen and Whiteley, 1998) cuja órbita se encontra totalmente dentro da órbita da Terra, levando a formulação deste novo subgrupo, inicialmente denominado de Apohele por seus descobridores. Estudos baseados em integrações numéricas mostraram que deveria existir uma população de asteroides com a órbita interna à da Terra, denominados objetos internos à Terra (ou IEO, do inglês Inner Earth Objects) (Michel et al., 2000b). Outros, seguindo a prática geral para definir uma nova classe com o nome do primeiro membro reconhecido, resolveram nomear de Atira a nova classe, em razão da descoberta do asteroide (163693) Atira, o qual foi o primeiro NEA confirmado em ter sua órbita completamente interior à da Terra.

Segundo as definições acima, os objetos dos subgrupos Aten e Apollo cruzam a órbita da Terra e os Atiras e Amor apenas se aproximam desta. Vale ressaltar, entretanto, que variações orbitais devidas às perturbações planetárias podem levar um objeto a mudar de um grupo para outro em intervalos de tempo de centenas de anos

ou em até milhões de anos (Milani et al., 1989; Michel et al., 2000a). Desta forma, Atiras e Amors não cruzam a órbita da Terra e, portanto, não oferecem ameaças de impacto imediato, mas suas órbitas podem ser perturbadas pelos encontros próximos com Mercúrio, Vênus (no caso dos Atiras) e Marte (no caso dos Amors) e se tornarem cruzadores da órbita da Terra no futuro. A maioria dos NEA conhecidos, cerca de 90%, são Apollo e Amor, enquanto os restantes, são basicamente Aten. Os Atiras, por ter uma órbita interior à Terra, são muito difíceis de serem observados e até o momento conhece-se apenas da ordem de 10 objetos desta classe. Na Figura 1.1 estão indicadas as órbitas características dos diferentes subgrupos dos NEA.

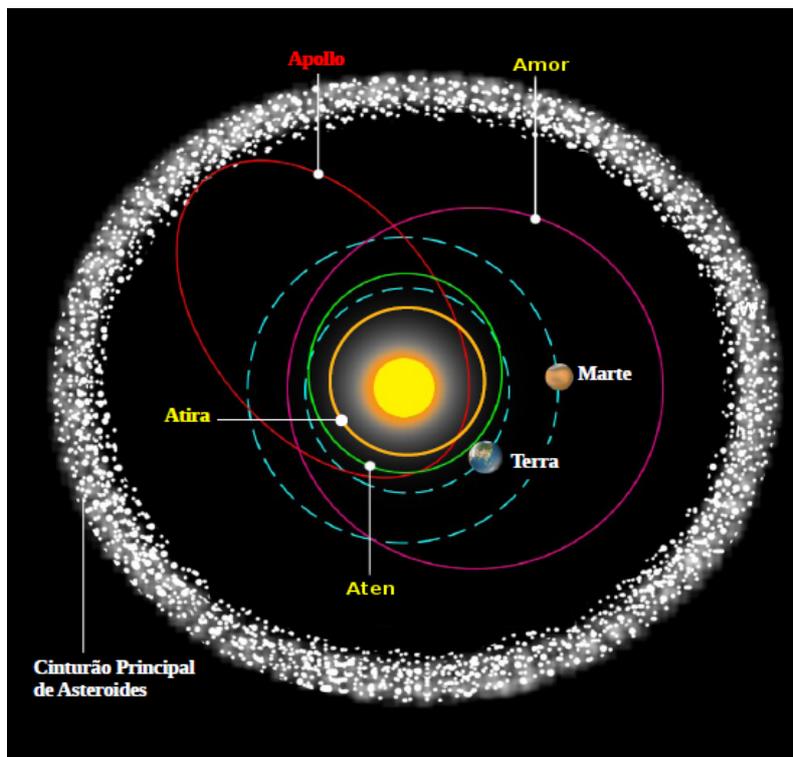


Figura 1.1: Ilustração esquemática das órbitas características dos diferentes subgrupos de NEA.

Segundo o *Minor Planet Center* (MPC) da União Astronômica internacional (IAU, do inglês *International Astronomical Union*), em 05 de julho de 2016 conhecíamos 14484 objetos classificados como NEA (16 Atiras, 1064 Atens, 7860 Apollos e 5544 Amors), sendo que 7191 destes tem magnitude absoluta (H) menor ou igual que 22, 1117 com $H \leq 18$, 872 com $H \leq 17,75$ e 55 com $H \leq 15,0$. Como a magnitude absoluta de um asteroide é função direta de seu tamanho e do albedo, estima-se que um asteroide com $H = 22$ tenha aproximadamente 200 metros de tamanho enquanto um com $H = 15$ tenha da ordem de 5 km de diâmetro, isto considerando um albedo médio de 0,14.

Dentre os asteroides que fazem parte da população de NEA, temos também os que são classificados como asteroides potencialmente perigosos, ou PHA, do inglês *Potentially Hazardous Asteroids*. Estes asteroides são atualmente definidos com base em parâmetros que medem o potencial de ameaça do asteroide ao ter um encontro próximo com a Terra. Especificamente, todos os asteroides que tem um MOID (do inglês *Minimum Orbit Intersection Distance*) menor ou igual a 0,05 UA e um tamanho superior ou igual a 150 metros são considerados PHAs. O MOID é, por definição, a distância mínima entre as órbitas osculadoras de dois objetos, e a distância de 0,05 UA equivale a 20 vezes a distância entre a Terra e a Lua. Na Figura 1.2 estão representadas as órbitas típicas de um NEA e de um PHA. É importante salientar que, se um objeto é classificado como PHA, isto não significa que ele irá colidir com a Terra, mas que são necessárias novas observações para aprimorar sua órbita e prever melhor o seu encontro próximo, assim como avaliar a possível ameaça de impacto com a Terra. Segundo o MPC, em julho de 2016, 1707 PHAs eram conhecidos, dos quais cerca de 90% são NEA dos subgrupos Apollo e Aten.

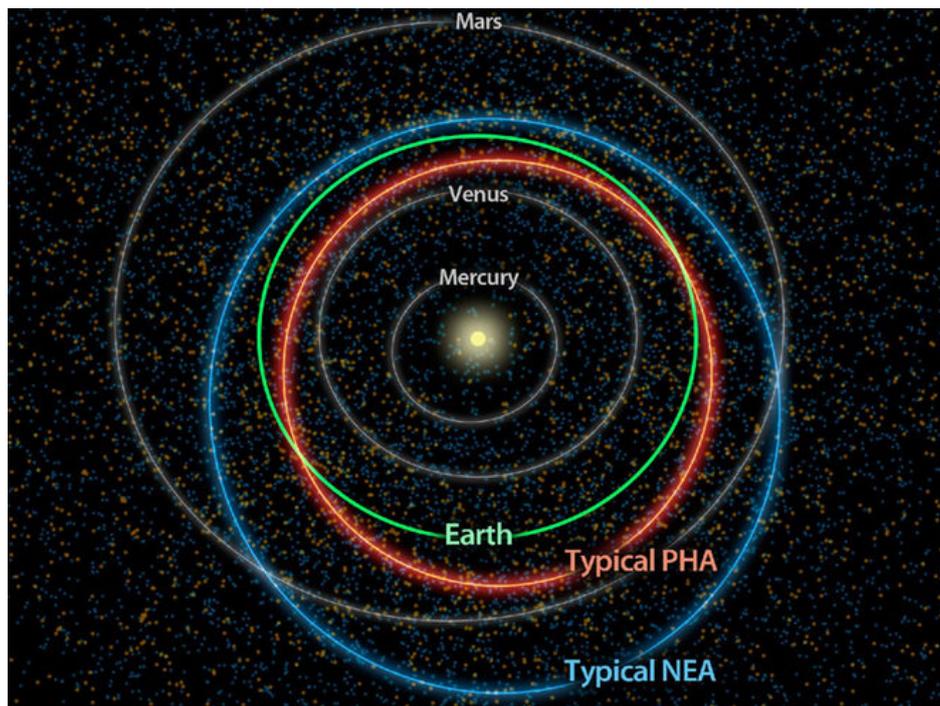


Figura 1.2: Ilustração mostrando a diferença entre a órbita de um asteroide próximo da Terra típico (em azul) e um PHA (em laranja). Os PHAs possuem órbitas mais próximas à da Terra, chegando a aproximadamente 8 milhões de km, e eles são grandes o suficiente para sobreviver à passagem pela atmosfera terrestre e causar danos em escalas regionais ou superior. Figura retirada de <http://www.jpl.nasa.gov/wise/newsfeatures.cfm?release=2012-138>.

Na tabela 1.1, é apresentado um resumo da descrição e definição dos subgrupos dos NEA abordados acima.

Tabela 1.1: *Resumo das definições dos subgrupos dos NEA.*

Subgrupo	Descrição	Definição
Aten	NEA cruzadores da órbita da Terra com semieixo maior menor do que o da Terra (classificado depois da descoberta do asteroide 2062 Aten).	$a < 1 \text{ UA}$ e $Q > 0,983 \text{ UA}$.
Apollo	NEA cruzadores da órbita da Terra com semieixo maior maior do que o da Terra (classificado depois da descoberta do asteroide 1862 Apollo).	$a > 1 \text{ UA}$ e $q \leq 1,017 \text{ UA}$.
Amor	NEA que possuem órbitas exteriores à da Terra, e em alguns casos cruzam a órbita de Marte (classificado após a descoberta do asteroide 1221 Amor).	$a > 1 \text{ UA}$ e $1,017 < q \leq 1,3 \text{ UA}$.
Atira	NEA cujas órbitas são interiores à da Terra (classificado após a descoberta do asteroide 163693 Atira).	$a < 1 \text{ UA}$ e $Q < 0,983 \text{ UA}$.
PHA	NEA potencialmente perigosos cuja distância mínima de intersecção da órbita (MOID) da Terra é de 0,05 UA e com diâmetros maiores do que 150 metros.	$\text{MOID} \leq 0,05 \text{ UA}$ e $D \geq 150 \text{ m}$.

A Figura 1.3 apresenta um panorama atual do Sistema Solar interior com todos os pequenos corpos conhecidos nesta região até o momento (julho de 2016). No gráfico, as órbitas dos planetas são dadas em azul e a localização da Terra e de Júpiter é indicada por grandes círculos com uma cruz no meio. Os círculos verdes, vermelhos e azuis representam asteroides, numerados e não numerados, do Cinturão Principal, com periélio menor do que 1,3 UA (NEA), e Troianos, respectivamente. Os quadrados azuis cheios representam cometas periódicos numerados enquanto os demais cometas são indicados por quadrados vazios. Os símbolos cheios representam objetos observados em mais de uma oposição enquanto os vazios aqueles observados durante uma única oposição.

A população dos NEA está sendo cada vez mais estudada, além do crescente número de curvas de luz e de dados fotométricos, as observações radar de NEA cresceram bastante na última década. As imagens obtidas por radar tem permitido tanto o aprimoramento das órbitas como a caracterização física dos objetos do Cinturão Principal e dos NEA. As observações de radar de NEA tem revelado

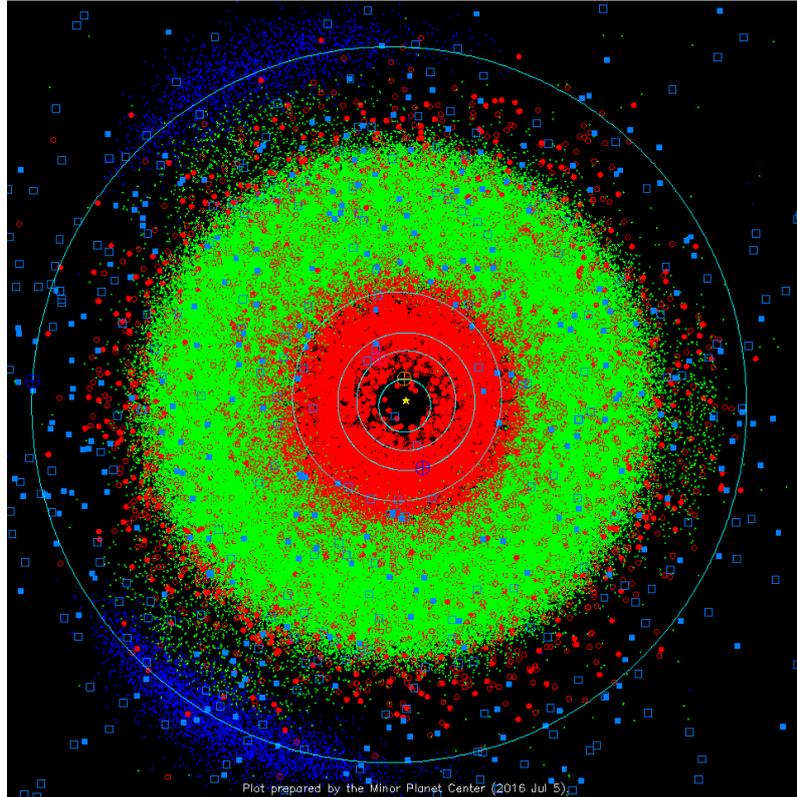


Figura 1.3: No gráfico é dada a localização dos planetas interiores do Sistema Solar, de Mercúrio até Júpiter, e os pequenos corpos desta região, no dia 5 de julho de 2016. Os NEA estão representados em vermelho. Gráfico retirado de <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot.html>.

sistemas múltiplos (por exemplo, asteroides binários ou triplos), formas irregulares, objetos metálicos e objetos com saliências equatoriais, sendo que estas estruturas sugerem que o objeto seja possivelmente um corpo reacumulado (em inglês, *rubble-pile*) (Benner et al., 2015). Graças à técnica de radar, o número de NEA binários cresceu em cerca quatro vezes na última década (Margot et al., 2015). As detecções de sistemas múltiplos são feitas por meio de análise de curvas de luz fotométricas assim como pelas imagens obtidas pelos radiotelescópios. Quanto a formação destes sistemas, segundo Margot et al. (2015), a evidência observacional atual confirma que asteroides binários pequenos (≤ 20 km) se formam por fissão de rotação e que a dinâmica pós fissão é responsável pela formação de sistemas triplos e de pares, enquanto os binários grandes com satélites pequenos são provavelmente criados durante grandes colisões. Além disso, NEA que sofrem encontros próximos com a Terra podem ter suas formas alongadas, e efeitos de maré podem desempenhar um papel importante na formação de binários (Binzel et al., 2002).

Outro aspecto interessante dentro deste contexto é que algumas missões espaciais para estudo de NEA foram lançadas nos últimos anos, assim como outras

estão sendo planejadas em todas as principais agências espaciais. Recentemente, uma missão tripulada para um NEA foi anunciada como objetivo futuro da NASA (Abell et al., 2015). As diversas agências espaciais tem estado envolvidas no estudo de NEA adequados para uma ampla variedade de missões, incluindo tanto missões robóticas como humanas. Neste sentido, a população de NEA que podem ser acessíveis para missões tripuladas é definida pelo *Near-Earth Object Human Space Flight Accessible Targets Study* (NHATS). NHATS é um sistema automático, desenvolvido pela NASA, para identificar NEA potencialmente acessíveis para futuras missões tripuladas. Os dados do NHATS são disponibilizados no site <http://neo.jpl.nasa.gov/nhats>. Porém, os esforços para encontrar e selecionar alvos adequados são severamente prejudicados pela falta de conhecimento das propriedades físicas de NEA que sejam acessíveis do ponto de vista de localização. Em particular a grande maioria dos NEA não tem albedo conhecido (Mueller et al., 2011). Atualmente o interesse científico recai sobre objetos de baixo albedo, ou seja, asteroides considerados mais primitivos. Isto porque acredita-se que a maioria dos asteroides primitivos contém um registro da composição original da nebulosa solar da qual se formaram os planetas.

Duas missões de retorno de amostras - Hayabusa-2 e OSIRIS-REx (do inglês, *Origins Spectral Interpretation Resource Identification and Security-Regolith Explorer*) - irão visitar seus respectivos alvos quase ao mesmo tempo. A missão Hayabusa-2 da JAXA (agência espacial japonesa) foi lançada com sucesso em dezembro de 2014, e chegará ao NEA primitivo do tipo C (162173) 1999 JU3 em 2018. A sonda da Hayabusa-2 orbitará o objeto por aproximadamente um ano antes de retornar à Terra em 2020, com amostras. Por outro lado, a missão OSIRIS-REx da NASA será lançada em setembro de 2016 devendo chegar ao asteroide primitivo do tipo B (101955) Bennu, em 2018. A sonda da OSIRIS-REx também irá orbitar o NEA por quase um ano antes de coletar amostras e retornar à Terra em 2023. Estas duas missões permitirão grandes avanços em nossa compreensão dos asteroides primitivos e dos meteoritos condritos carbonáceos, assim como verificar a composição e propriedades físicas de dois diferentes asteroides tidos como primitivos e sua origem parental (Abell et al., 2015; Michel et al., 2015).

Por todas estas questões, fica evidente que o estudo das propriedades físicas dos asteroides próximos da Terra é bastante relevante, tanto para responder questões sobre a formação dos sistemas planetários como para compreender melhor sobre os mecanismos de transporte. Além disso, a boa caracterização física destes corpos nos permite fazer comparações com os objetos do Cinturão Principal, que podem nos revelar informações sobre sua formação e evolução. Este problema

se torna fundamental quando se trata de objetos que podem vir a colidir com a Terra, pois como já se sabe, os asteroides que cruzam a trajetória da Terra representam uma séria ameaça para a humanidade. A explosão de um bólido de cerca de 20 metros sobre a cidade de Chelyabinsk (Rússia) em 13 de fevereiro de 2013 e os acontecimentos de impactos relativamente menores mostraram que tais eventos podem causar sérios danos a civilização. Considerando os objetos conhecidos, no momento a probabilidade de colisão de um objeto grande num futuro próximo é muito baixa. Entretanto, se for descoberto um objeto grande em rota de colisão com a Terra, as consequências para a vida podem ser bastante graves.

1.2 Propriedades rotacionais dos NEA

Um dos parâmetros observáveis fundamentais dos asteroides é o seu período de rotação. A rotação verificada nos asteroides pode ser entendida tanto pelos processos de formação como por sua evolução colisional posterior. O primeiro a observar que, de fato, os asteroides possuem rotação foi von Oppolzer (1901), o qual observou que o brilho de 433 Eros variava com o tempo. Estas variações foram interpretadas por von Oppolzer como resultado de um corpo irregular girando em torno do seu eixo principal de inércia.

As taxas de rotação e as formas dos NEA surgem por uma variedade de fatores. NEA derivados do Cinturão Principal de asteroides (MBA) são possivelmente segunda ou terceira geração de fragmentos de colisão de corpos parentais maiores (Davis et al., 2002). Asteroides na faixa de algumas dezenas de quilômetros, ou menores, não são grandes o suficiente para que a auto-gravidade os proteja de uma colisão catastrófica durante a idade do Sistema Solar (Binzel et al., 2002). Assim, os tamanhos, as formas, a rotação, e as propriedades internas e superficiais destes asteroides são o resultado da evolução colisional e dinâmica que tem moldado eles desde a sua formação (Binzel et al., 2002; Michel et al., 2015).

O conhecimento das características físicas dos asteroides, como as propriedades rotacionais, a forma, o tamanho, a massa, entre outras, é de fundamental importância para a compreensão da história e do estado atual da população destes objetos. Além disso, melhores estimativas destes parâmetros permitem melhorar a determinação de outras características, por exemplo, a determinação da forma pode permitir uma melhor estimativa do tamanho, a qual permite uma melhor estimativa do albedo, resultando em uma melhor determinação da composição superficial. Em alguns casos onde é possível determinar a massa, seja pela presença de um satélite

ou de efeitos gravitacionais sobre uma sonda espacial, pode ser calculado o volume e, por meio deste, a densidade, sendo que esta última proporciona informação sobre a estrutura interna do objeto.

Em particular, as propriedades rotacionais e a forma de um corpo podem fornecer indícios importantes sobre sua formação e evolução. Tendo uma estimativa da forma é possível inferir se o corpo poderia ser o resultado da acreção de pequenos planetesimais, ou da fragmentação de um corpo maior ou, ainda, da reacumulação gravitacional após uma quebra catastrófica formando um objeto reacumulado ("*rubble-pile*", em inglês). Por outro lado, o período de rotação e a direção do eixo de rotação de um corpo fornecem informações sobre sua evolução. Uma rotação muito lenta pode indicar uma intensa evolução colisional enquanto uma extremamente rápida um corpo monolítico. Direções de polo preferenciais, ou ausência de, podem indicar a presença de efeitos seculares dissipativos ou a falta de eficiência destes.

A fotometria de disco não resolvido tem sido a maior fonte de informação sobre as propriedades físicas da maioria dos corpos menores do Sistema Solar, principalmente os períodos de rotação e, mais recentemente, as direções do eixo de rotação e modelos de forma. As primeiras determinações de período foram feitas através de inspeção visual de certos traços das curvas de luz (Schober and Dvorak, 1975; Schober, 1975), sendo que posteriormente o uso de ajustes de séries temporais aos dados melhorou consideravelmente essa determinação (Deeming, 1975; Ferraz-Mello, 1981; Harris and Young, 1983). Atualmente a análise por ajuste de séries de Fourier é a técnica mais usada (Harris and Young, 1983).

Diversos estudos estatísticos sobre a distribuição dos períodos de rotação de asteroides tem sido desenvolvidos ao longo dos anos. Em uma revisão do assunto, Binzel et al. (1989) analisaram uma amostra de 375 períodos de rotação de asteroides do Cinturão principal e determinaram uma correlação entre os tamanhos dos objetos e suas taxas de rotação, sendo que os objetos com diâmetros (D) estimado na faixa de $125 < D < 200$ km e $D \geq 200$ km são bem representados por uma distribuição Maxwelliana. Isso indicando que as taxas de rotação poderiam ser resultantes de uma evolução colisional. Entretanto, aqueles com $D \leq 125$ km mostravam um excesso de rotadores lentos sendo sua distribuição possivelmente influenciada por diversos processos, obtendo um bom ajuste com uma combinação de duas maxwellianas. Os asteroides com $D \leq 50$ km mostram um excesso de objetos lentos e suas distribuições não maxwellianas sugerem que suas taxas de rotação sejam mais fortemente influenciadas por outros processos. Esses autores

também analisaram o período de rotação de 28 NEA (tamanho médio de 3km) e compararam com uma amostra de objetos MBA com $D < 15$ km (tamanho médio de 8 km), encontrando que as duas amostras são dispersas e indicando que as distribuições não são significativamente diferentes entre si, como havia sido relatado também em Binzel (1984). As amostras não se ajustam a uma simples Maxwelliana devido ao excesso de rotadores lentos, sugerindo a existência de duas populações de asteroides: os rotadores lentos e os rotadores rápidos (Binzel, 1984; Binzel et al., 1989). Estes trabalhos também constataram que a amplitude das curvas de luz dos NEA é superior àquela dos MBA.

Mais recentemente, Pravec et al. (2002) analisaram uma amostra com 984 asteroides, confirmando os resultados anteriores. Os asteroides com tamanho $D \geq 30 - 50$ km são bem representados por uma distribuição maxwelliana (Harris and Burns, 1979; Fulchignoni et al., 1995; Donnison and Wiper, 1999; Pravec and Harris, 2000) sugerindo que estes objetos são primordiais ou remanescentes destes, com período rotacional de cerca de 8,6 horas. Pravec et al. (2002), também determinaram que os asteroides com $0,15 \text{ km} \leq D \leq 10 \text{ km}$ apresentam um excesso de rotadores rápidos e lentos, enquanto os com diâmetro entre 10 e 40 km uma mistura de período. Trabalhos como os de Fulchignoni et al. (1995) e Donnison and Wiper (1999) ajustaram a distribuição de frequências de asteroides com $D \leq 50$ km por uma combinação linear de três funções maxwellianas, indicando a presença de três sub-populações, enquanto Donnison (2003) ajustou a população de diâmetro inferior a 40 km com uma mistura de quatro maxwellianas. Vale ressaltar que no trabalho de Fulchignoni et al. (1995) se tomou o cuidado de selecionarem-se apenas períodos de rotação bem determinados, eliminando do estudo aqueles períodos que poderiam estar completamente errados. Neste trabalho, novamente foi encontrado uma média de 8,6 horas para o período de uma das populações existentes entre os objetos com $D \leq 50$ km, sendo esta pertencente à população de asteroides primordiais, e que estão presentes em todas as faixas de diâmetro. Por outro lado, as outras sub-populações são consideradas como sendo resultado da evolução colisional.

Tendo em vista que os NEA são semelhantes em rotação e forma com seus homólogos do Cinturão principal de tamanho similar, Binzel et al. (2002) utilizaram curvas de luz para obter informações sobre a rotação e forma aproximada de NEA e de MBA para realizar uma comparação entre as duas populações. Vale ressaltar que a amplitude da curva de luz de um asteroide é indicativa da sua forma. Este estudo, com uma amostra de cerca de 100 objetos de cada população, permitiu comparar o período de rotação e a forma aproximada de MBA e NEA com diâmetros estimados menores que 12 km. A partir desta análise, foi possível

verificar que as características de rotação e a forma dos NEA são similares as dos MBA com diâmetros similares. A forma aproximada dos asteroides foi avaliada pela média das amplitudes das curvas de luz dos objetos utilizados.

Dentre os NEA foram detectados rotadores extremamente rápidos, com período de rotação da ordem de minutos, os quais são, muito provavelmente, fragmentos monolíticos de corpos maiores (Pravec and Harris, 2000; Pravec et al., 2002, 2000a). As estatísticas atuais de taxas de rotação de asteroides \times tamanho sugerem que o intervalo onde corpos monolíticos começam a dominar entre os asteroides é inferior a um diâmetro de cerca de 200 m, correspondente a $H \approx 22$, como sugerido por Pravec and Harris (2000). Estudos recentes também indicam a presença de muitos sistemas binários entre os NEA, sendo que o primário possui uma rotação muito rápida em razão do processo de formação do segundo corpo (Pravec et al., 2000b, 2002, 2006).

Para a determinação da direção do eixo de rotação e modelos de forma foram utilizados inicialmente os métodos da amplitude-magnitude e da época (Zappala, 1981; Zappalà et al., 1983; Zappala and Knezevic, 1984; Lambert, 1985; Magnusson, 1986; Surdej et al., 1986; Drummond et al., 1988; Taylor et al., 1988; Barucci et al., 1989). Uma descrição detalhada destes métodos pode ser encontrada no trabalho de Silva (2015). Atualmente a técnica de inversão de curva de luz (Kaasalainen and Torppa, 2001; Kaasalainen et al., 2001) é a que fornece a melhor determinação destes parâmetros. Esse método será descrito brevemente no Capítulo 2.

A distribuição da direção do eixo de rotação de asteroides foi inicialmente analisada por Magnusson (1986). Nesse trabalho utilizou-se direções de rotação de 20 objetos, determinadas a partir de métodos como da época, amplitude-magnitude e ocultação, resultando numa distribuição bimodal, com uma ligeira maioria de rotadores prógrados. As mesmas conclusões foram obtidas posteriormente por Drummond et al. (1988) e Magnusson (1990) utilizando amostras um pouco maiores, com cerca de 30 asteroides. Mais recentemente, essas conclusões foram também confirmadas por Pravec et al. (2002) utilizando uma amostra bem maior. Nesse trabalho, entre os 86 asteroides da amostra, 48 apresentam rotação prógrada e os 36 restantes retrógrada. Em todos esses estudos está mencionado o problema da falta de objetos com latitude eclíptica da direção do eixo de rotação entre -8° e 8° , tendo sido encontrados apenas três por Pravec et al. (2002). Este problema pode ser devido a uma tendência observacional, onde um asteroide com uma direção de rotação com baixa latitude eclíptica pode ser observado principalmente no polo, resultando em uma amplitude baixa e precisando assim de mais observações para

determinar a direção. Também, de modo geral, as suposições da forma que os métodos utilizam na determinação da direção pode ser uma causa.

Em estudo mais recente, Hanuš et al. (2011) analisaram a distribuição da direção do eixo de rotação de 206 MBA (obtidos com inversão de curva de luz) e também encontraram uma carência de asteroides com direção próxima ao plano eclíptico, além de que a fração de rotadores prógrados continua sendo um pouco maior com respeito a diferentes faixas de tamanhos dos asteroides. A partir desta análise, os autores constataram que os objetos com diâmetro superior a 60 km apresentam uma distribuição uniforme para latitudes menores do que 11 graus enquanto os objetos com diâmetro menor que 30 km apresentam uma falta de objetos com direção próxima do plano eclíptico. Além disso, os objetos com diâmetro intermediário entre 30 e 60 km apresentam uma distribuição com objetos ocupando as latitudes mais altas e mais baixas. Tais conclusões podem ser visualizadas na Figura 1.4, onde é mostrada a variação da latitude com o diâmetro. A partir destes resultados Hanuš et al. (2011) levantam a hipótese de que a ausência de asteroides com latitudes eclípticas próximas ao plano eclíptico no caso dos objetos com diâmetro menor do que 30 km seria devido ao efeito YORP¹ já que este é mais eficiente em corpos menores.

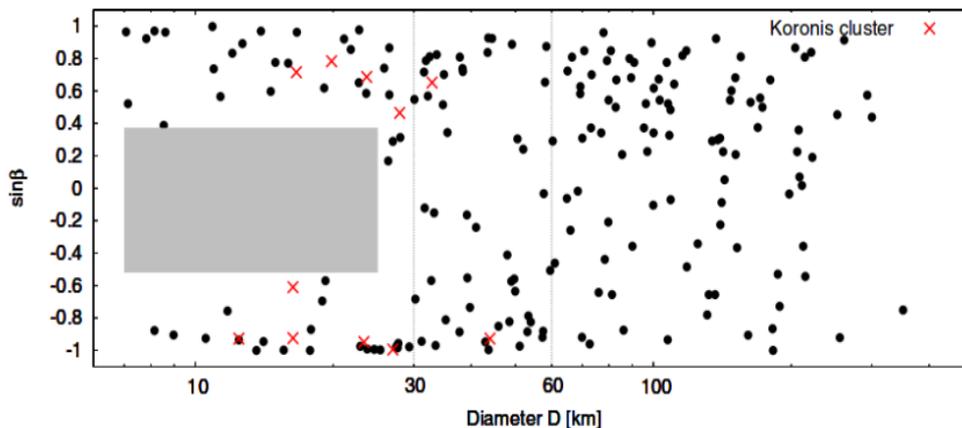


Figura 1.4: Dependência da latitude eclíptica (β) da direção do eixo de rotação com o diâmetro. Gráfico retirado de Hanuš et al. (2011).

Por fim, no trabalho de Silva (2015), que utilizou direções de eixo de rotação de 21 NEA, foi identificada novamente a tendência de falta de objetos com direção do polo próxima do plano eclíptico tal como nos MBA, e também, que a longitude eclíptica parece estar distribuída de maneira uniforme. Este resultado pode ser

¹Efeito Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack é um torque causado pela força de repulsão da emissão térmica anisotrópica. Este efeito pode causar mudanças no estado de rotação de asteroides.

visto na Figura 1.5, onde é possível notar a falta de objetos com latitude eclíptica entre -15° e 15° . Outra característica apresentada por Silva (2015) é de que a quantidade de rotadores retrógrados é maior daquela de rotadores prógrados, diferentemente dos trabalhos anteriores, tais como, Hanuš et al. (2011). Contudo, antes de investigar quais processos físicos/dinâmicos podem levar a esta distribuição é importante aumentar a amostra garantindo uma estatística mais representativa e sem viés observacional.

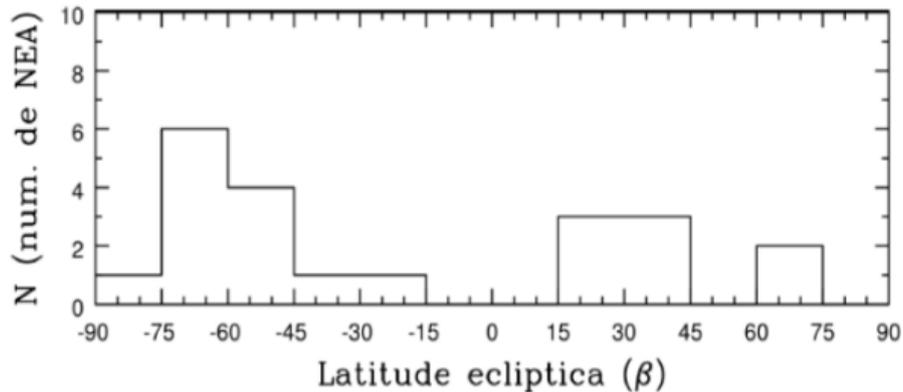


Figura 1.5: *Distribuição da latitude eclíptica da direção do eixo de rotação de NEA. Gráfico retirado de Silva (2015).*

No Brasil, este tipo de pesquisa vem sendo desenvolvida pelo grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional, como os trabalhos de determinação de período de rotação de pequenos asteroides do Cinturão Principal (Angeli et al., 2001; Almeida, 2002; Almeida et al., 2004), e mais recentemente, com a determinação das propriedades rotacionais e modelos de forma de NEA (Lazzaro et al., 2015; Silva et al., 2016) e também para asteroides do Cinturão Principal (Silva and Lazzaro, 2015), sendo estes últimos trabalhos os primeiros a implementar o método de inversão de curvas de luz às observações realizadas no Brasil.

1.3 IMPACTON

O projeto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON) iniciou formalmente em 2005 tendo como objetivo instalar e operar um telescópio robótico dedicado ao seguimento e caracterização física de NEA. A proposta do projeto IMPACTON foi formulada não só com o objetivo de ampliar e consolidar os estudos sobre o tema, mas também, de modo pioneiro, montar toda uma infraestrutura física dedicada à observação remota de pequenos corpos no Sistema Solar (Lazzaro, 2010). Esta infraestrutura incluiu escolha de sítio, construção de obras civis, instalação de equipamentos, disposição de facilidades de energia e transmissão de dados e implantação do sistema de operação remota.

O projeto IMPACTON foi instalado no município de Itacuruba (PE) no que passou a ser denominado de Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). O telescópio, com espelho principal de 1,0 metro de diâmetro, está equipado com uma câmera CCD e um conjunto de filtros de banda larga. Apesar do projeto ter iniciado formalmente em 2005, quando foram aprovados todos os recursos para a compra do telescópio e construção da infraestrutura física, a primeira luz do telescópio ocorreu apenas em março de 2011, e o início efetivo dos projetos científicos em 2012 (Lazzaro et al., 2012). Em fevereiro de 2013, o OASI recebeu do *Minor Planet Center* da União Astronômica Internacional o código Y28, Nova Itacuruba (De Pra et al., 2013). Desde janeiro de 2014 as observações passaram a ser feitas remotamente da sala de operações remotas da Coordenação de Astronomia e Astrofísica do Observatório Nacional (COAA). O OASI e seus equipamentos serão detalhados na Seção 3.1.

Dentro dos objetivos do projeto IMPACTON, o presente trabalho apresenta a determinação das propriedades rotacionais, isto é, período e direção do eixo de rotação, e modelo de forma para um número significativo de NEA. Vale ressaltar que o principal problema em relação a esta população é o pequeno conhecimento que se tem tanto do seu tamanho quanto de suas propriedades físicas, por exemplo, apenas cerca de 7% dos 14500 NEA conhecidos tem seus períodos de rotação determinados e menos de 1% tem direção do eixo de rotação. Neste sentido, por meio do projeto IMPACTON esta população vem sendo estudada de forma sistemática visando determinar suas propriedades rotacionais as quais podem impor vínculos importantes sobre sua evolução colisional. Além disso, o estudo desta população nos permite obter informações sobre os menores corpos do Sistema Solar sem a necessidade do uso de grandes telescópios, e se torna fundamen-

tal, pois se trata de objetos que podem vir a colidir com a Terra em algum momento.

Para o andamento deste trabalho seguimos alguns passos que cabem aqui serem mencionados. Inicialmente, no segundo semestre de 2014 acompanhei as observações do Dr. Sergio Silva, que me mostrou todo o procedimento de observação remota, desde a conexão ao computador do OASI até a aquisição das imagens de calibração e de ciência. Em seguida foram estudadas as técnicas de redução dos dados e, posteriormente, os métodos de análise de série de Fourier para a determinação do período de rotação, e o método de inversão de curvas de luz para a determinação da direção do eixo de rotação e modelo de forma de um asteroide. Por fim, no período de 2015 a 2016, concomitantemente às observações, foram sendo determinadas as propriedades rotacionais e os modelos de forma aqui apresentados.

O estudo das propriedades físicas de pequenos corpos se torna mais interessante pela possibilidade de realizar estudos estatísticos sobre grande número de objetos. Para isto é necessário aumentar o tamanho da amostra de NEA para os quais temos informações sobre suas propriedades rotacionais. Foi com este intuito que resolvemos contribuir neste estudo com a determinação de períodos de rotação, direção do eixo de rotação e modelo de forma de NEA. Os dados obtidos para a realização deste trabalho foram todos adquiridos no OASI, com observações no período de janeiro de 2015 a maio de 2016. Dessa forma, destacamos que o volume e qualidade de dados obtidos, que serão descritos na Seção 4, é uma demonstração do potencial do projeto, visto que não seria possível um volume tão expressivo de dados em um tempo relativamente curto se não tivéssemos um telescópio dedicado ao tipo de ciência que nos propomos a fazer.

No que segue, no capítulo 2 são descritas as técnicas e métodos de análise de curvas de luz utilizados para determinar as propriedades rotacionais e a forma de um asteroide. No capítulo 3 descreveremos como se deram as observações, a seleção dos alvos e o processamento dos dados. Os resultados e discussões das nossas missões observacionais são apresentados no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 são discutidas as conclusões e perspectivas para nosso trabalho.

Capítulo 2

Metodologia

Os métodos e técnicas utilizadas neste trabalho objetivaram a determinação de algumas propriedades rotacionais e a forma de objetos da população de asteroides próximos da Terra (NEA). As propriedades rotacionais, isto é, o período de rotação e a direção do eixo de rotação, assim como a forma de um objeto, são obtidas por meio da análise de curvas de luz fotométricas.

No que segue, vamos inicialmente introduzir alguns conceitos e problemas básicos relacionados à geometria de observação, e em seguida, iremos discutir como se dá a determinação do período rotacional através da análise de série de Fourier, e a direção do eixo de rotação e modelo de forma de um asteroide por meio do método da inversão de curva de luz. Por fim, na última seção deste capítulo faremos uma revisão sobre a técnica da fotometria diferencial, a partir da qual derivamos as magnitudes relativas utilizadas para a construção das curvas de luz apresentadas neste trabalho.

2.1 A curva de luz e a geometria de observação

Chama-se curva de luz de um objeto a variação de sua luminosidade ao longo de um intervalo de tempo. As propriedades rotacionais dos asteroides são obtidas da análise de suas curvas de luz, lembrando que os asteroides não têm luz própria, mas refletem a luz do Sol. Esta variação pode ser separada em três componentes: (1), aquela devida às variações da orientação espacial do asteroide; (2), aquela devida à forma do objeto e que provoca uma variação periódica da área da superfície visível; e (3), aquela devida às variações de albedo médio. Quando conseguimos separar estas três componentes na curva de luz de um asteroide temos então a direção de seu eixo de rotação, seu período e sua forma.

Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo de configuração do sistema Terra-Asteroide-Sol propício para observação do asteroide. A figura mostra dois ângulos importantes do problema: o de aspecto (θ), entre o eixo principal de rotação do asteroide e a linha de visada de um observado na Terra, e o de fase (α), que é o ângulo Terra-Asteroide-Sol.

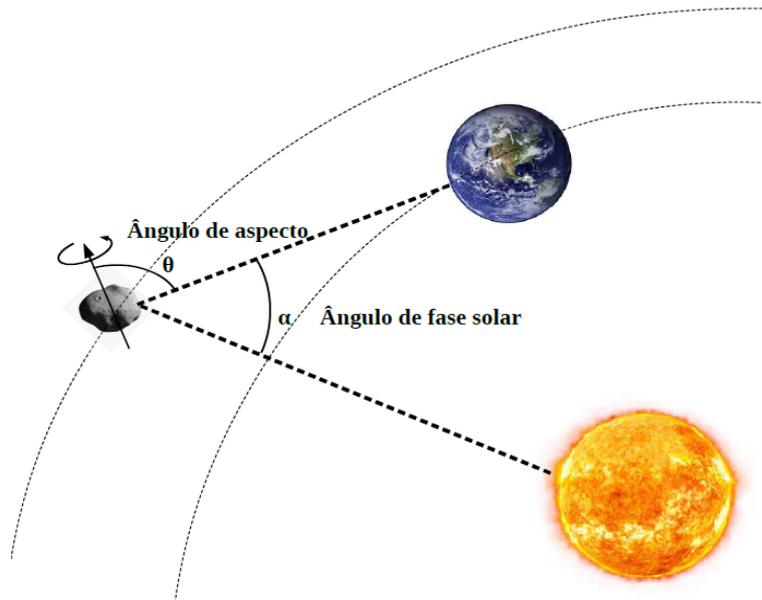


Figura 2.1: Geometria de observação Sol-Asteroide-observador onde são indicados os ângulos de aspecto, θ , e de fase solar, α . Figura retirada de Silva (2015).

Para que as variações de brilho, necessárias para a determinação do período rotacional, sejam verificadas da Terra é fundamental que o movimento de rotação do asteroide se dê em torno de um eixo que não seja coincidente com a linha de visada do observador. Ou seja, é importante que o ângulo de aspecto não seja igual a zero, pois neste caso o asteroide nos mostrará sempre a mesma face. Outra particularidade que não nos permitirá observar variação de brilho da curva de luz é se o objeto tiver uma forma esférica e um albedo constante. Na Figura 2.2 pode-se observar as diferenças no brilho em função de diferentes ângulos de aspecto (θ). Como podemos perceber, a variação do brilho é nulo quando o ângulo de aspecto é zero e aumenta à medida que θ ascende, atingindo seu máximo quando $\theta = 90^\circ$. Com isso, percebemos também que o ângulo de aspecto (θ) tem influência direta sobre as amplitudes das curvas de luz dos asteroides.

Normalmente, durante uma noite de observação, ou algumas noites sucessivas, o ângulo de fase e de aspecto podem ser considerados constantes, não provocando qualquer mudança na forma da curva de luz. Entretanto, ao longo de meses conse-

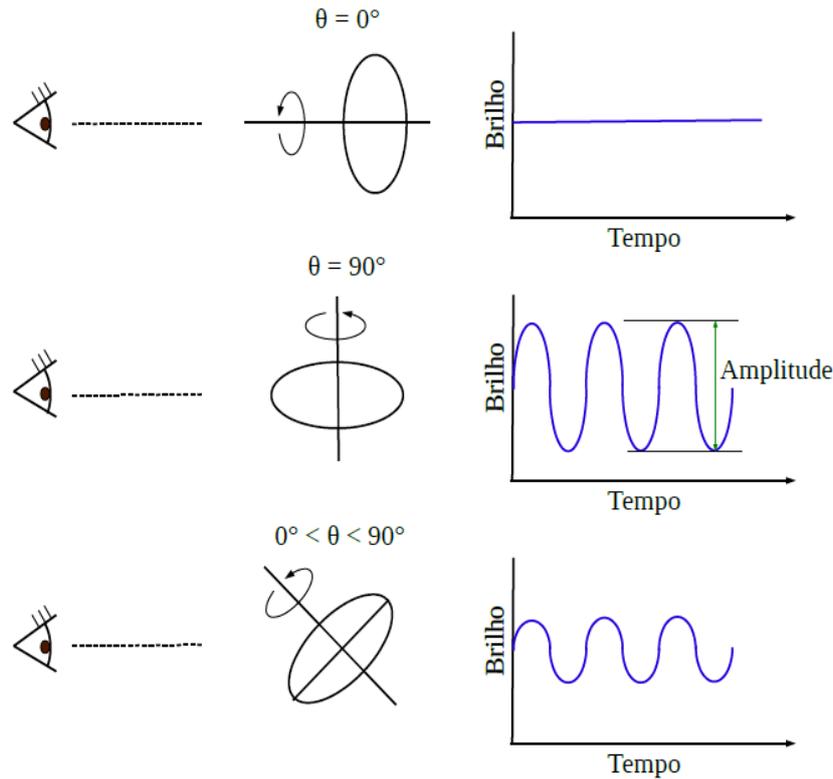


Figura 2.2: *Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos de aspecto.*

cutivos estes ângulos mudam, ocasionando variações significativas na luminosidade. Além disso, existem casos especiais, tais como o de um asteroide passando próximo da Terra, em que sua configuração espacial varia em poucos dias. São as variações das curvas de luz observadas em diferentes geometrias que nos permitem determinar a direção do eixo de rotação e a forma do objeto. O esquema apresentado na Figura 2.3 enfatiza a variação do ângulo de fase (α) e exemplifica o que ocorre com a geometria de observação com o passar do tempo (semanas ou meses) dependendo da órbita do asteroide.

A forma da curva de luz não é afetada apenas pela configuração geométrica do sistema Terra-asteroide-Sol, como abordado acima, mas também por certas características da superfície do corpo. Algumas destas características são mostradas na Figura 2.4. No caso do asteroide não ter composição uniforme, ou apresentar variações de albedo, então os diferentes materiais irão refletir a luz do Sol de forma diferente ocasionando variações em sua curva de luz. Estas variações são geralmente muito pequenas e, portanto, desprezíveis em curvas de luz regulares e de grandes amplitudes. Contudo, estas variações podem se tornar importantes no caso de curvas irregulares e com pequena amplitude. Para estas, as mudanças no brilho devidas

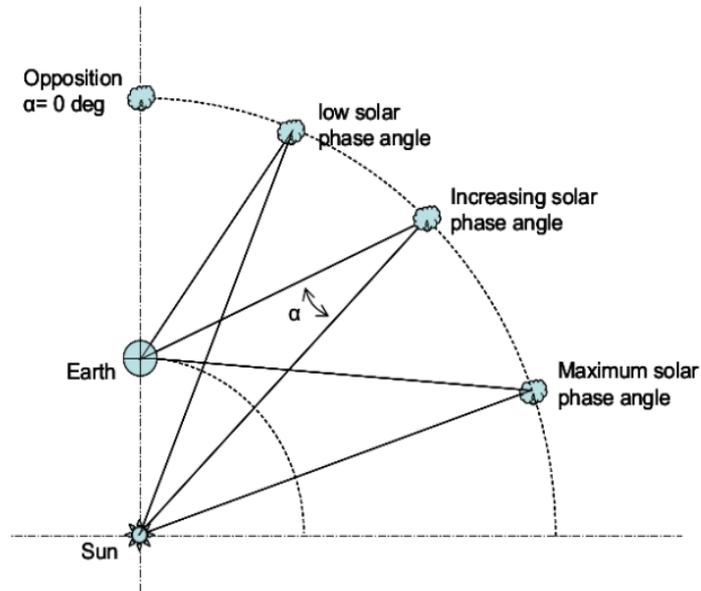


Figura 2.3: Variação do ângulo de fase observado em diferentes geometrias orbitais. Figura retirada de Buchheim (2010).

à variação de albedo (ou composição) podem se confundir com as variações devidas à forma, à configuração espacial e ao espalhamento. O mesmo pode ser dito sobre a presença de crateras e montanhas. Por tudo isso, ressaltamos a importância da realização de uma análise das aparências de todas as curvas de luz disponíveis, pois através desta podemos obter indícios importantes sobre a forma do objeto estudado.

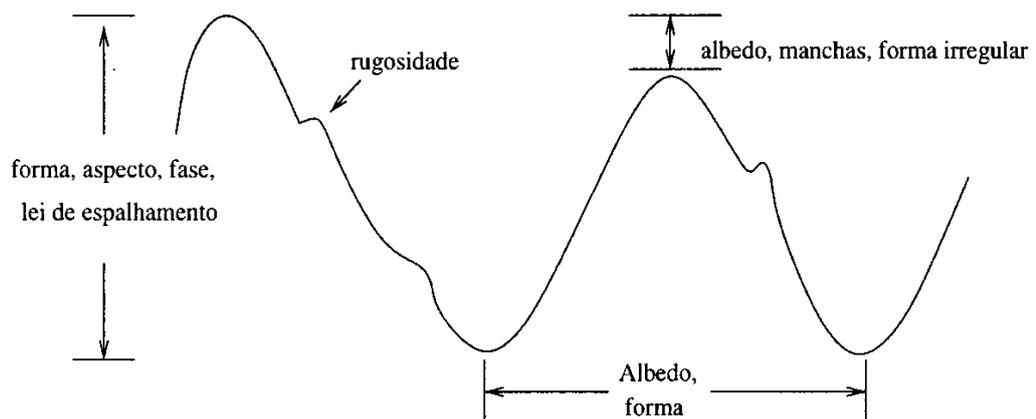


Figura 2.4: Forma da curva de luz conforme sua dependência com a forma do asteroide, a geometria da observação, o espalhamento da luz pela superfície e irregularidades, e as variações de albedo do asteroide.

2.2 Determinação do Período de Rotação

O período de rotação de um asteroide consiste no intervalo de tempo que este leva para completar uma revolução completa em torno do seu eixo de rotação. Uma forma de se medir esse intervalo é a observação da variação das diversas faces do asteroide em razão de apresentarem, em sua maioria, uma forma irregular. Isto porque as faces de um objeto irregular são diferentes entre si e, portanto, cada face refletirá a luz de uma forma distinta. De forma geral duas suposições são feitas quando se procura o período de rotação: 1) que a porcentagem da luz refletida é a mesma em toda a superfície do corpo, ou seja, que o objeto tem um albedo constante, e 2) que tem uma rotação pura, ou seja, o corpo gira em torno do eixo principal de inércia.

A ilustração apresentada na Figura 2.5 mostra o que acontece quando um corpo irregular gira em torno do seu eixo. Suponha que estamos observando um asteroide com a forma de um corpo irregular e alongado. No desenho da extrema esquerda estamos observando o asteroide de perfil, vendo a sua área menor. Nesse caso a quantidade de luz refletida por ele atinge o valor mínimo. À medida que ele gira, a superfície refletora vai aumentando de tamanho. Consequentemente o brilho aumenta gradualmente de valor até atingir o seu máximo quando o asteroide está de frente para nós. Como ele continua a girar, logo começa a mostrar de novo uma área superficial menor e, consequentemente, o brilho começa a diminuir até atingir novamente o seu valor mínimo. Assim, a curva de luz de uma rotação completa, terá 2 máximos e 2 mínimos notoriamente visíveis para o caso de um objeto alongado.

As primeiras determinações do valor do período de rotação foram baseadas no cálculo do tempo transcorrido entre algumas características das curvas de luz, principalmente os máximos e/ou mínimos. Este método foi utilizado, por exemplo, na primeira determinação do período rotacional de um asteroide, feita por Bailey and Pickering (1913) do NEA (433) Eros, e depois em trabalhos como o de Schober and Dvorak (1975) aplicado à outro asteroide. Após o aumento do número de curvas de luz e de observações de asteroides, o problema de identificação do período passou a ser tratado como um problema de série temporal, sendo este um problema matemático o qual pode ser resolvido utilizando diversas técnicas. No caso de asteroides o método mais utilizado atualmente é um ajuste por série de Fourier, como proposto por Harris and Young (1983).

O período de rotação de um asteroide é obtido pelo ajuste de uma série de Fourier à curva de luz observada. No caso de não ser possível cobrir um período

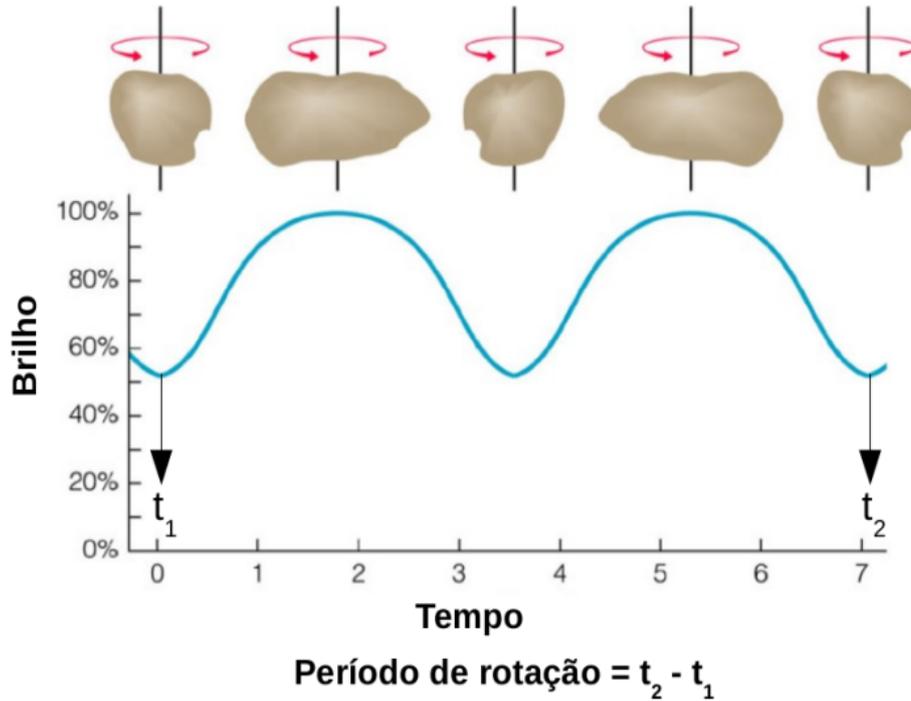


Figura 2.5: Ilustração da curva de luz gerada em função do tempo da rotação de um objeto oblato irregular.

completo em uma só noite de observação, é necessário executar um ajuste sobre uma composição de curvas de luz obtidas em noites subsequentes. É importante salientar que apenas devem ser utilizadas curvas de luz de noites próximas a fim de mantermos constantes os ângulos de fase e de aspecto.

A curva de luz composta pode ser representada pela seguinte série de Fourier (Harris et al., 1989):

$$V(\alpha, t) = V(\alpha) + \sum_{l=1}^n \left[A_l \sin \frac{2\pi l}{P} (t - t_0) + B_l \cos \frac{2\pi l}{P} (t - t_0) \right] \quad (2.1)$$

Onde:

- $V(\alpha, t)$ é a magnitude reduzida em um ângulo de fase α num instante t ;
- $V(\alpha)$ é a magnitude absoluta em um ângulo de fase α ;
- A_l e B_l são os coeficientes de Fourier;
- P é o período de rotação;
- t_0 é o instante no meio do intervalo de observação;
- n é o grau do polinômio.

Esta função pode ser ajustada pelo método dos mínimos quadrados, fixando-se um valor para o período P e o grau n . O que se realiza na prática, é procurar o período e o grau que nos fornecem o melhor ajuste aos dados. No caso de termos um conjunto de dados muito limitado podemos encontrar mais de um valor aceitável para o período, mas no caso ideal, apenas um período ajusta a curva de luz composta. Se tivermos uma curva de luz bem representada, ou seja, com muito pontos observados e baixa dispersão, aumentando o grau do polinômio chegaremos cada vez mais perto de uma representação detalhada das características físicas e propriedades rotacionais do asteroide.

Existem também aqueles asteroides que apresentam curvas mais complexas, em razão ou de serem compostos por sistemas múltiplos ou estarem num estado de rotação excitado. Para alguns casos, deve-se aplicar métodos mais específicos como o descrito em Pravec et al. (2000b, 2006) para resolver o problema do período de asteroides binários. Por este método ajusta-se dois períodos rotacionais, sendo um para o corpo primário (mais rápido) e outro para o corpo secundário (mais lento). No caso de asteroides com direção do eixo de rotação precessante (*tumbling*) são usados métodos como os descritos em Pravec et al. (2005). No presente trabalho assume-se uma rotação pura em torno do eixo principal de inércia.

2.3 Determinação da direção de polo e da forma

A determinação da direção do eixo de rotação e da forma do objeto podem ser obtidas a partir de curvas de luz observadas ao longo de diversos meses ou anos. Isto se deve ao fato de que a área superficial iluminada é função da configuração Sol-Terra-objeto, como mostrado na Figura 2.1. Por este motivo, a direção do eixo de rotação e a forma provável de um pequeno corpo do Sistema Solar somente podem ser determinadas conhecendo-se a amplitude da curva de luz ao longo de várias aparições (Durech et al., 2010; Silva, 2015).

Para a determinação da direção do eixo de rotação e modelo de forma convexa, utilizamos o método da inversão de curva de luz (ICL) desenvolvido por Kaasalainen e colaboradores (Kaasalainen and Torppa, 2001; Kaasalainen et al., 2001). O método utiliza os dados das curva de luz e das respectivas geometrias de observação para determinar as propriedades rotacionais. Entretanto, é importante salientar que para se obter estas informações são necessárias observações ao longo de vários meses, para termos um conjunto de curvas de luz em diferentes configurações de observação, visando cobrir uma ampla variedade de ângulos de fase e aspecto. Isto implica que para alguns objetos é necessário esperar muito tempo antes de se ter dados suficientes para uma boa estimativa do modelo de forma.

Os códigos e manuais utilizados para desenvolver a análise se encontram disponíveis gratuitamente no *site* da base de dados de modelos calculados através de técnicas de inversão ou DAMIT¹ (do inglês, *Database of Asteroids Models by Inversion Theorems*), descrito em Durech et al. (2010). O programa de inversão foi desenvolvido por Mikko Kaasalainen em Fortran e convertido para C por Josef Durech. Este programa calcula o período rotacional, a direção do eixo de rotação e um modelo de forma do casco convexo (e não convexo) que corresponde ao melhor ajuste para as curvas de luz utilizadas.

O programa é composto por uma sequência de módulos que requerem arquivos de entrada com uma formatação muito específica. Por isso, foram utilizados vários códigos para ajustar os dados das curvas de luz e deixá-los no formato apropriado. O arquivo de entrada deve conter os dados das curvas de luz e a geometria correspondente, o qual será lido a partir da entrada padrão. O brilho deve estar em unidades de intensidade e as coordenadas eclípticas astrocêntricas cartesianas x , y e z , do Sol e da Terra em UA. Os vetores posição dos objetos, necessários para determinar as condições de iluminação, são obtidos do sistema

¹http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/web.php?page=project_main_page

Horizon do JPL/NASA para uma dada época. Por fim com o programa OrbitEarth.f (fornecido por M. Kaasalainen à equipe do IMPACTON) calcula-se as distâncias do Sol e da Terra em relação ao asteroide para as datas das observações.

Além das curvas de luz na formatação específica, o método necessita de outras informações como uma estimativa inicial para a longitude e latitude eclíptica (λ e β) e o período de rotação. O modelo de inversão é derivado a partir da suposição de que o comportamento do espalhamento da luz dos asteroides pode ser descrito como uma combinação dos modelos de Lambert e Lommel-Seeliger. Desta forma, o modelo de espalhamento completo é dado por:

$$S(\mu, \mu_0, \alpha) = f(\alpha)[S_{LS}(\mu, \mu_0) + cS_L(\mu, \mu_0)], \quad (2.2)$$

onde α é o ângulo de fase solar, μ e μ_0 são os cossenos dos ângulos de incidência e de reflexão respectivamente, S_L é a lei de Lambert, como

$$S_L = \mu\mu_0, \quad (2.3)$$

e S_{LS} é a lei de Lommel-Seeliger,

$$S_{LS} = \frac{S_L}{\mu + \mu_0}, \quad (2.4)$$

por fim, c é o fator de peso de Lambert (sendo usado normalmente $c = 0,1$). Nenhuma função de fase $f(\alpha)$ é usada no caso em que se utiliza apenas curvas de luz relativas. O modelo é obtido a partir do melhor ajuste entre as curvas de luz observadas e as modeladas por meio de um processo iterativo. A equação que define o ajuste é dada por

$$\chi_{rel}^2 = \sum_i \left\| \frac{L_{obs}^{(i)}}{\bar{L}_{obs}^{(i)}} - \frac{L^i}{\bar{L}^{(i)}} \right\|, \quad (2.5)$$

onde $L_{obs}^{(i)}$ e $L^{(i)}$ são as curvas de luz observada e modelada, as quais são normalizadas através do brilho médio $\bar{L}_{obs}^{(i)}$ e $\bar{L}^{(i)}$.

A representação da forma obtida por este procedimento é dada por um poliedro convexo com facetas triangulares (com normais exteriores fixos). Se a superfície é dada como uma função contínua, então pode ser triangulada com um método de discretização, como por exemplo, a triangulação octante. Uma vez que as áreas das facetas são determinadas, os vértices das facetas são diretamente resolvidos pelo procedimento de minimização Minkowski.

O método de inversão de curva de luz fornece uma melhor estimativa das propriedades rotacionais em comparação com outros métodos que fazem uso de dados fotométricos, além do fato de que a determinação da forma é muito mais precisa e mais parecida com a forma real dos asteroides, visto que realiza a determinação de um modelo sem uma forma predefinida. Além disso, este método tem a grande vantagem de poder ser aplicado a uma maior quantidade de objetos em comparação com outros métodos com outras técnicas observacionais. O método de inversão tornou-se uma ferramenta padrão para revelar a natureza dos asteroides a partir da fotometria. Uma outra vantagem importante do método é de que pode ser combinado com dados de outras técnicas observacionais para obter um modelo mais refinado. Entre os dados que podem ser combinados com fotometria estão: cordas, imagens de radar, ótica adaptativa, interferometria speckle e imagem direta (Durech et al., 2015).

Ressaltamos o fato de que esta abordagem é completamente autônoma e independente de outros métodos. No entanto, resultados anteriores (caso existam) são muito úteis como estimativas iniciais. O processo é relativamente simples e automático, uma vez que é geral e não com base nas modificações de alguns tipos de modelo. Mesmo curvas de luz muito complexas podem ser modeladas sem muitas complicações e consistentemente usando a inversão convexa. Se o conjunto de dados abrange um número suficiente de geometrias, a direção do eixo de rotação, período e soluções de forma resultantes são estáveis, independentemente do ruído ou da lei de espalhamento utilizada. É importante salientar que grandes conjuntos de dados podem não ser tão informativos quanto os menores porém em variadas configurações. Muitas vezes, a direção de rotação e o período ainda podem ser determinados com precisão, mesmo que nenhum detalhe possa ser obtido da forma.

A descrição matemática do método de inversão de curvas de luz pode ser vista em Kaasalainen and Torppa (2001), Kaasalainen et al. (2001) e, particularmente, em português na tese de doutorado de J. S. Silva (2015). Por fim, salientamos que para a realização do presente trabalho nos atemos apenas às questões para a aplicação prática do método, buscando entender o formato e os parâmetros de entrada assim como a utilização dos programas, e sem entrar nos detalhes da formulação matemática do método.

2.4 Fotometria relativa ou diferencial

A técnica de medição do fluxo (ou magnitude aparente) de uma fonte astronômica é chamada de fotometria. A fotometria de uma ou mais fontes geralmente é feita sobre uma imagem obtida em condições de observação estáveis. A estabilidade da atmosfera, no caso de observações baseadas em solo, é importante porque o sinal obtido por um sistema telescópio+detector vai depender da transparência da atmosfera e do tamanho da coluna de ar atravessada pela luz da fonte. Se a transparência varia de um instante para outro, como no caso de passagem de nuvens durante uma observação ótica, por exemplo, o sinal também irá variar.

Existe dois tipos de técnicas de fotometria que se utiliza normalmente em astronomia:

- Fotometria relativa ou diferencial - permite determinar a magnitude de um objeto sem o conhecimento prévio da constante instrumental e do coeficiente de extinção da noite de observação. Esta técnica também permite trabalhar em condições não tão favoráveis como as necessárias em fotometria absoluta (noites fotométricas).
- Fotometria absoluta - permite determinar a magnitude calibrada dos objetos observados. Para tanto, as observações devem ser feitas apenas em noites fotométricas (com pequena extinção e condições atmosféricas estáveis). Também é necessário a observação de estrelas padrão em diferentes altitudes, para determinar o coeficiente de extinção e a constante instrumental.

Neste trabalho, utilizamos a fotometria diferencial porque estamos interessados apenas em variações de brilho. Além disso, esta técnica é muito mais tolerante quando as condições de observação não são ideais. Por exemplo, se uma nuvem fina atravessa nossa área de visualização enquanto estamos obtendo imagens, o mais provável é que afete a magnitude das estrelas de comparação, tanto quanto a do asteroide. Como as estrelas de comparação estão situadas no mesmo campo do asteroide, estão sujeitas às mesmas condições atmosféricas. A diferença de magnitude entre elas será, por conseguinte, praticamente a mesma e os resultados não serão afetados.

A fotometria diferencial é uma técnica que permite determinar a diferença entre a magnitude instrumental de um alvo (asteroide) e de uma estrela de comparação (ou a média de várias estrelas de comparação). A fotometria diferencial é a mais simples das técnicas e a mais útil para longos intervalos de observação. Além disso, fornece uma melhor precisão ao medir pequenas variações (Warner, 2006). Isso é

particularmente importante já que a amplitude da curva de luz de alguns asteroides é da ordem de 0,1 magnitudes.

A metodologia adotada para a elaboração de uma curva de luz de um asteroide, mediante o método da fotometria diferencial, está descrito nos passos mostrados a seguir:

1. Obter uma sequência de imagens com o asteroide e as estrelas de comparação.
2. Identificar o asteroide e as estrelas de comparação.
3. Ajustar a abertura para medição das magnitudes instrumentais.
4. Medir as magnitudes e calcular a magnitude relativa.

A partir da sequência de imagens deve-se selecionar pelo menos duas estrelas de comparação no mesmo campo do asteroide. As estrelas escolhidas devem ter brilho similar àquele do asteroide. A estrela de comparação de magnitude mais próxima à do asteroide será chamada de estrela de referência, e a outra de estrela de verificação. Esta segunda é importante porque é usada para determinar se a estrela de referência é variável. Para se obter uma melhor precisão das medidas, pode-se utilizar várias estrelas de comparação, usando o valor médio da soma das magnitudes individuais como o valor de comparação única. Isso ajuda a suavizar pequenos erros na medição de cada estrela.

A técnica de se somar a contribuição de diferentes pixels em torno de uma fonte é denominada de fotometria de abertura, pois indica que uma abertura específica é usada para medir o fluxo dentro dela. A fotometria por abertura pode ser usada com segurança desde que seja possível definir uma abertura que satisfaça os seguintes critérios: primeiro, a abertura precisa conter toda a luz emitida ou refletida pela fonte, e segundo, não pode conter luz proveniente de outras fontes.

Os critérios são relativamente óbvios, posto que uma abertura muito pequena vai deixar luz da fonte do lado de fora, subestimando o sinal e, por conseguinte, o fluxo da fonte. Já uma abertura muito grande poderá resultar em estimativas do sinal contaminadas por outras fontes. Há vezes em que é impossível compatibilizar as duas exigências definidas acima. Em campos estelares muito densos, por exemplo, o espaçamento entre as estrelas na imagem pode ser menor do que o raio que contenha toda a luz de uma fonte individual. Em casos como este, o mais adequado é não utilizar as imagens em que o alvo está sendo contaminado por outra fonte.

A abertura está formada por três partes, como se pode observar no diagrama da Figura 2.6. A abertura de raio a é o círculo mais interno, onde caberá o objeto (asteroide, estrelas de comparação) que será medido. O anel do meio é simplesmente um espaço entre o círculo de sinal e o anel do céu. E por fim, o anel mais externo é o que se utiliza para obter informação sobre o sinal do fundo do céu. Assim, a magnitude instrumental do objeto é calculada pela diferença entre o total de contagens dentro da abertura do objeto e o valor do fundo do céu.

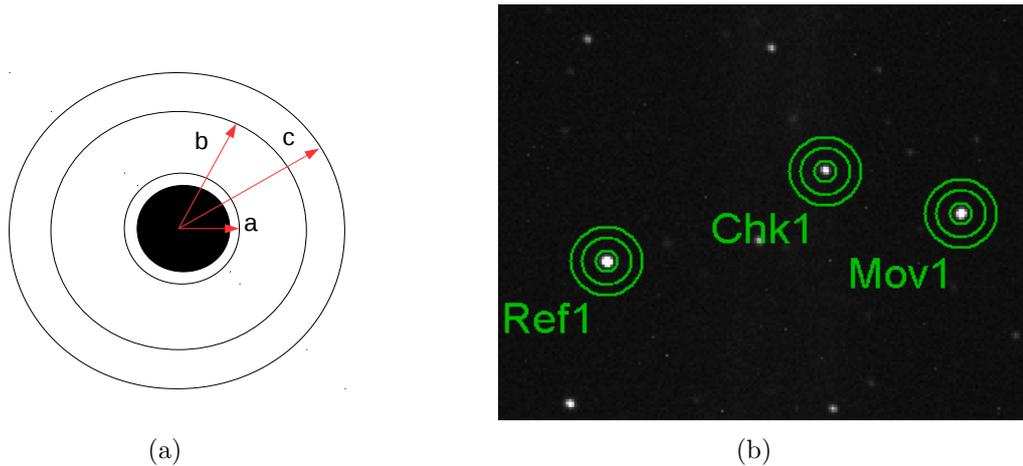


Figura 2.6: *Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, as estrelas do campo e ao céu. (a) Esquema da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide (círculo de raio a) e ao céu (anel $b - c$). (b) Representação real da abertura na qual é medida a magnitude instrumental do asteroide 2002AJ29, das estrelas de referência (Ref1) e de verificação (Chk1) a partir do software MaxIm DL. A partir do número de contagens dentro da abertura do objeto subtraído do valor do fundo do céu deriva-se a magnitude instrumental do objeto.*

Normalmente o programa utilizado para a realização da fotometria cria automaticamente estes círculos no momento que escolhemos os objetos a serem medidos nas imagens. Porém, devemos ter o controle sobre o tamanho de cada um dos anéis em caso de necessitarmos realizar pequenos ajustes para adaptá-los às nossas imagens. Uma regra importante é que devemos usar os mesmos tamanhos de anéis para cada um dos objetos selecionados na mesma imagem.

A partir do número de contagens dentro da abertura do objeto (asteroide e estrelas de comparação), subtraído do sinal do fundo do céu, se obtém o fluxo de intensidade do objeto. Dessa forma, o cálculo das magnitudes instrumentais é realizado utilizando as seguintes relações:

$$m_{ast}(t) = A - 2,5 \log(F_{ast}(t)) \quad (2.6)$$

$$m_{ref}(t) = A - 2,5 \log(F_{ref}(t)) \quad (2.7)$$

$$m_{veri}(t) = A - 2,5 \log(F_{veri}(t)), \quad (2.8)$$

onde $F_{ast}(t)$, $F_{ref}(t)$ e $F_{veri}(t)$ são os fluxos do asteroide e das estrelas de comparação, estas últimas são chamadas de estrela de referência e de verificação, respectivamente, e $m_{ast}(t)$, $m_{ref}(t)$ e $m_{veri}(t)$ suas magnitudes instrumentais para uma imagem obtida em um instante t . A é um parâmetro que depende do sistema céu+telescópio+detector, ou seja, $A = K_\lambda X + C$, onde K_λ é o coeficiente de extinção em um determinado comprimento de onda, X é a massa de ar e C é a constante instrumental do detector.

Como os objetos (asteroide e estrelas) se encontram na mesma imagem, o coeficiente de extinção atmosférica (K_λ), a massa de ar (X), e a constante instrumental (C), são iguais para todas as magnitudes instrumentais (isto se as cores das estrelas são similares as do objeto). Finalmente, se calculamos a diferença entre as magnitudes obteremos as magnitudes relativas, como mostrado a seguir:

$$\Delta m_{ast} = m_{ast}(t) - m_{ref}(t) = 2,5 \log \frac{F_{ref}(t)}{F_{ast}(t)} \quad (2.9)$$

e, analogamente

$$\Delta m_{veri} = m_{veri}(t) - m_{ref}(t) = 2,5 \log \frac{F_{ref}(t)}{F_{veri}(t)} \quad (2.10)$$

A partir das equações acima, podemos obter a curva de luz do asteroide e também da estrela de verificação. Representando os valores da equação 2.9 para os distintos tempos obtemos a curva de luz do asteroide no intervalo de tempo observado. E se representamos a equação 2.10, temos a curva de luz da estrela de verificação. Com isso podemos verificar a variação de brilho do asteroide e o brilho praticamente constante da estrela de verificação. Se a representação do brilho da estrela não for uma reta significa que uma das estrelas é variável, e portanto, não podemos usá-las para o cálculo das magnitudes relativas do asteroide, sendo necessário selecionar outra estrela de comparação.

As magnitudes relativas determinadas no presente trabalho, foram obtidas por meio do programa MaxIm DL² versão 5.07. Estas magnitudes foram utilizadas para construção das curvas de luz que são apresentadas no Capítulo 4. Para exemplificar, na Figura 2.7 mostramos duas curvas de luz, a primeira, do asteroide (436724) 2011 UW158, e a segunda, da estrela de verificação, obtidas a partir de uma noite de observação.

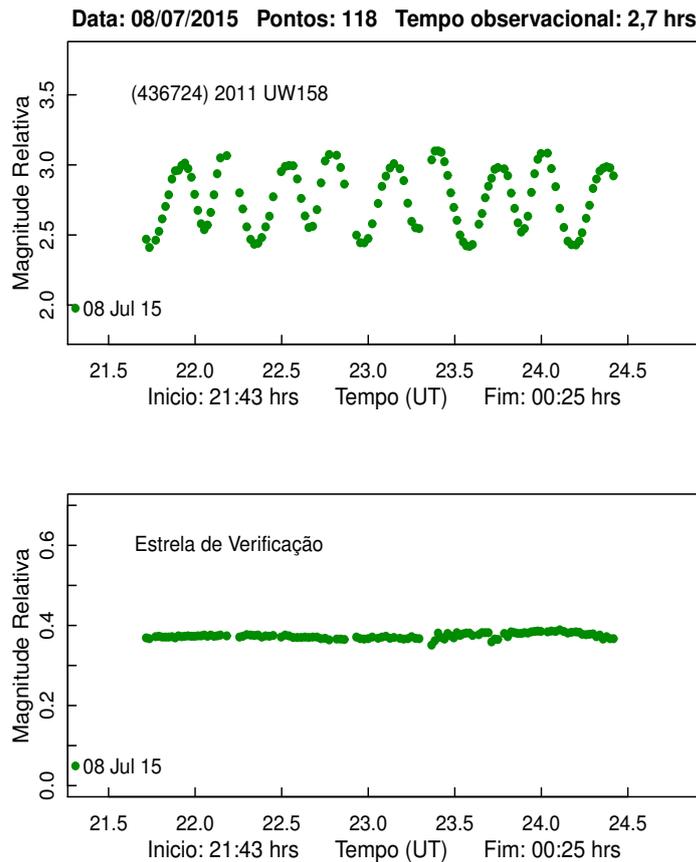


Figura 2.7: *Curvas de luz do asteroide (436724) 2011 UW158 e da estrela de verificação utilizando magnitudes relativas. As magnitudes são obtidas a partir da diferença entre a magnitude instrumental do objeto e da estrela de comparação. O erro médio em cada ponto fotométrico da curva de luz do asteroide é de aproximadamente 0,007 magnitude.*

²http://www.cyanogen.com/maxim_main.php

Capítulo 3

Observações astronômicas e processamento dos dados

Os dados observacionais utilizados no presente trabalho foram obtidos no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), dedicado ao estudo das propriedades físicas dos pequenos corpos do Sistema Solar, em particular os NEA.

Visando a determinação das propriedades rotacionais dos NEA tem sido rotineiramente realizadas observações fotométricas com o telescópio do OASI. Para uma determinação confiável do período de rotação de um asteroide é necessário ter-se uma curva de luz com boa cobertura. Isso se consegue obtendo-se várias imagens seguidas do asteroide. Atualmente o detector mais utilizado na obtenção de dados fotométricos é o CCD (do inglês, *Charge Couple Device*). Trata-se de um detector bastante eficiente, que apresenta uma resposta linear aos fótons que recebe, ou seja, podemos obter um sinal duplicado pelo CCD se também duplicarmos o tempo de exposição de captura da imagem. Esta é uma grande vantagem sobre os detectores anteriores, por exemplo, a placa fotográfica. Outras vantagens do uso do CCD é a obtenção de imagens digitalizadas, em formato FITS (do inglês, *Flexible Image Transport System*), e também de dados simultâneos do asteroide, do céu em sua volta e de estrelas no campo.

A fotometria é, portanto, um técnica observacional que nos permite obter um grande conjunto de informações para um grande número de objetos, sendo a fotometria diferencial (descrita na seção 2.4) utilizada em nosso caso para aferição da variação do brilho do asteroide em relação ao brilho de estrelas do campo. Estas últimas, também chamadas de estrelas de comparação, são usadas para o cálculo da magnitude relativa do asteroide. Como os asteroides próximos da Terra se movimentam muito rápido ao longo do campo durante uma noite de observação e as estrelas de comparação devem estar presentes em todas as imagens, o campo do

CCD deve ser suficientemente grande, por exemplo, com cerca 12 x 12 minutos de arco.

As observações deste trabalho foram realizadas no OASI entre janeiro de 2015 e maio de 2016 ao longo de 13 missões observacionais, sendo que uma ocorreu no próprio sítio e as demais remotamente. A descrição do OASI e dos seus instrumentos estão especificadas na seção 3.1. Os asteroides observados para este trabalho, selecionados de acordo com alguns critérios específicos para otimização dos resultados, são descritos na seção 3.2. Por fim, na seção 3.3 descreveremos como ocorreram as observações e o método utilizado para reduzir as imagens.

3.1 Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI

A instalação do OASI é parte do projeto de Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON), desenvolvido pela Coordenação de Astronomia e Astrofísica (COAA) do ON.

O OASI está localizado no sertão do estado de Pernambuco, no município de Itacuruba, com coordenadas geográficas $\lambda = -08^{\circ}47'32,1''$, $\phi = -38^{\circ}41'18,7''$, a 390 metros de altitude. A escolha do sítio para instalação do observatório foi baseada em critérios técnicos e logísticos, intrinsecamente ligados aos objetivos científicos a serem alcançados. Dos critérios técnicos, listamos: noites abertas e secas, baixa turbulência atmosférica, baixa luminosidade urbana, temperatura noturna não muito elevada, e latitude mais ao Sul possível. Entre os critérios logísticos, destacamos a posse do terreno, a infraestrutura básica pre-existente para instalação e as parcerias institucionais.

O observatório conta com um telescópio de 1,0 metro de diâmetro, equipado com uma câmera CCD e um conjunto de filtros de banda larga. O telescópio, totalmente automatizado, permite que as observações sejam realizadas tanto localmente quanto a partir da sala de operações remotas da COAA do ON, no Rio de Janeiro. A operação do telescópio foi iniciada em março de 2011 e, de forma remota, em janeiro de 2014. Em fevereiro de 2013, o OASI recebeu do *Minor Planet Center* da União Astronômica Internacional o código Y28, Nova Itacuruba (De Pra et al., 2013). A Figura 3.1 mostra o sítio do observatório. Nas subseções a seguir, descreveremos brevemente os instrumentos instalados no OASI através dos quais obtivemos

os dados utilizados neste trabalho (<http://www.on.br/impacton/implantacao.html>).



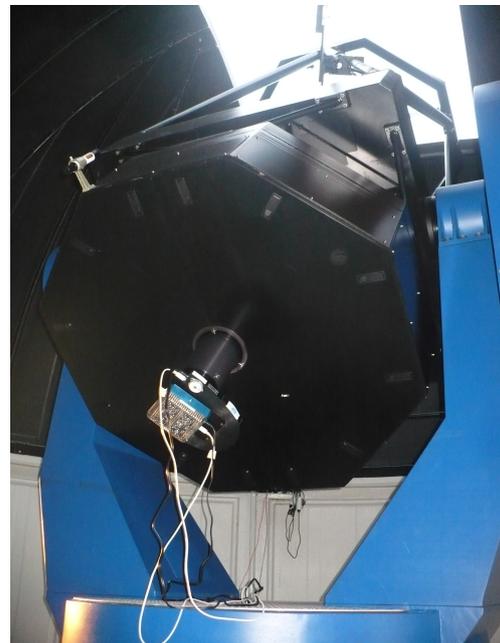
Figura 3.1: *Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI.*

3.1.1 Telescópio

Em função dos objetivos científicos a serem alcançados, foi realizada tomada de preços internacional e o telescópio escolhido foi da empresa Astro Optik Philipp Keller (Alemanha). Esta proposta consistia de uma parte óptica, de origem Russa, de uma parte mecânica e outra de automação, estas últimas construídas na Alemanha. O telescópio é apresentado sob dois aspectos na Figura 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2: *Telescópio de 1,0 metro do projeto IMPACTON. Vista (a) lateral e (b) traseira do telescópio.*

O design óptico foi selecionado de modo a fornecer um desempenho ótimo em um tamanho de campo de $27,5 \text{ mm}^2$. Isto sendo obtido com um Cassegrain clássico

de razão focal primária $f/3$ e uma razão focal do sistema $f/8$. Um redutor/corretor de campo foi utilizado para corrigir aberrações residuais e reduzir o comprimento focal a $f = 7030$ mm, resultando em um campo efetivo de $13,5 \times 13,5$ minutos de arco (Figura 3.3). Vale lembrar que a óptica é o coração do telescópio, onde a necessidade de uma qualidade muito alta, sendo no caso específico de origem Russa. As características principais da óptica são descritas na tabela abaixo.

Tabela 3.1: *Características da óptica do telescópio.*

Tipo de Óptica	Cassegrain
Espelho principal	Diâmetro externo 1030(± 3) mm, diâmetro óptico especificado > 1000 mm, parabólico $c = -1$.
Espelho secundário	Diâmetro externo 364(± 1) mm, diâmetro óptico especificado > 360 mm, hiperbólico $c = -4,84$.
Precisão óptica	L/6 máximo Pico/Vale aberração de frente de onda a 632 nm, L/30 máximo RMS da aberração de frente de onda a 632 nm.
Qualidade superficial	Cerâmica AstroSital de extremamente baixa expansão, Coeficiente de expansão térmica $< 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.
Cobertura	Al + SiO ₂ ambos os espelhos, R $> 90\%$
Comprimento focal do sistema	8000 mm $f/8$ (sem corretor), $f=7030$ com corretor.

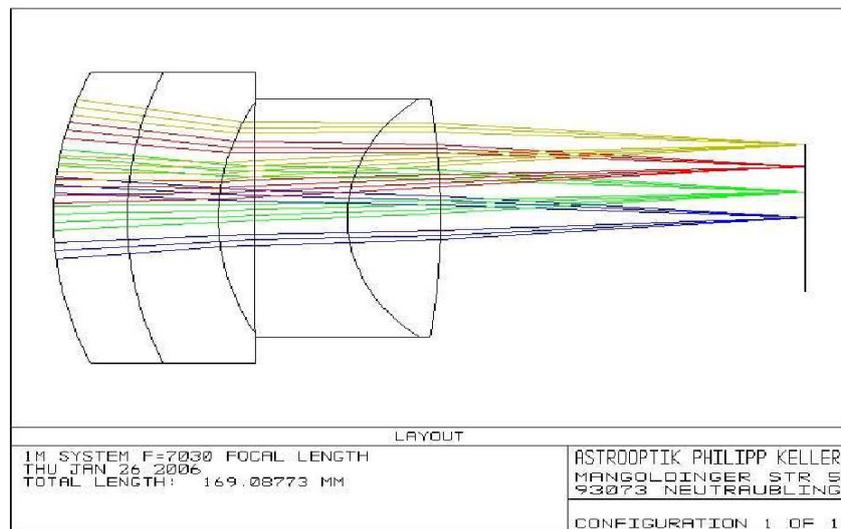


Figura 3.3: *Desenho óptico do redutor/corretor focal.*

O tubo do telescópio é uma clássica estrutura de treliça sendo o foco obtido através de uma focalização do secundário com um servo-motor DC cujo movimento tem precisão de até 0,01 mm. O controle é manual com a maneta ou com o

computador através do software "Autoslew". A pintura dentro do tubo é um preto especial, de muito baixa reflexão com uma refletividade menor do que 2% independente do ângulo de incidência.

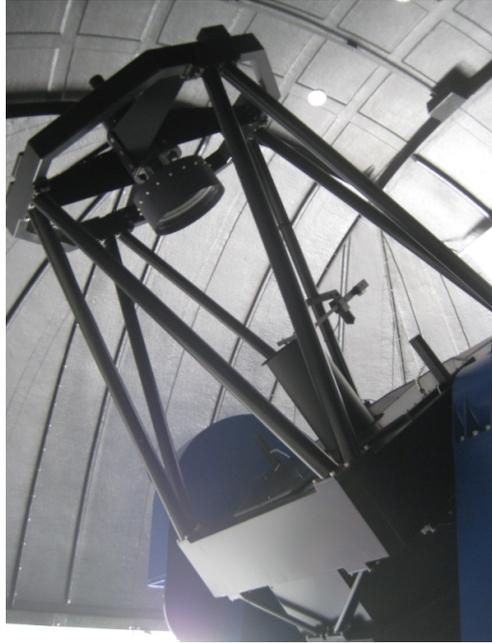


Figura 3.4: *Tubo do telescópio.*

O suporte do espelho (Fig. 3.5) é outro ponto importante de um telescópio. No caso, o suporte foi realizado com um sistema (Lasalle) que utiliza 24 pontos no lado de trás do espelho contendo pequenos contrapesos em suportes cilíndricos. A força de cada ponto é otimizada e o erro residual superficial é menor do que 15 nm.

Na estrutura em "garfo" do telescópio os movimentos são acionados com motores de fricção feitos de aço inoxidável. Embora inicialmente prevista uma montagem equatorial do telescópio esta foi posteriormente modificada para alto-azimutal, em vista do processo de escolha de sitio. Na Figura 3.6 é mostrado os esquemas da montagem instalada no OASI.

Os movimentos do telescópio são feitos utilizando-se servo-motores DC, com 24V/10A de potência máxima. A eletrônica que aciona os servo-motores utiliza um controlador especial para executar acompanhamentos muito suaves. Permutadores estão diretamente conectados à eletrônica, de modo que mesmo uma falha no computador de controle não causa acidentes. Se um torque é excedido (se o telescópio alcança qualquer resistência) existe ainda uma parada de emergência dos servo-motores. São utilizados 2 codificadores por eixo para controlar o telescópio e

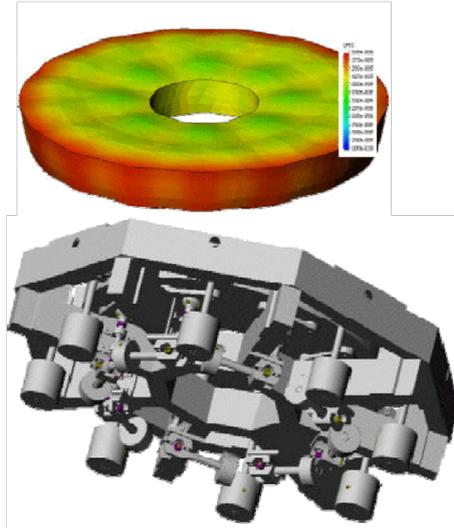


Figura 3.5: *Esquema do suporte do espelho.*

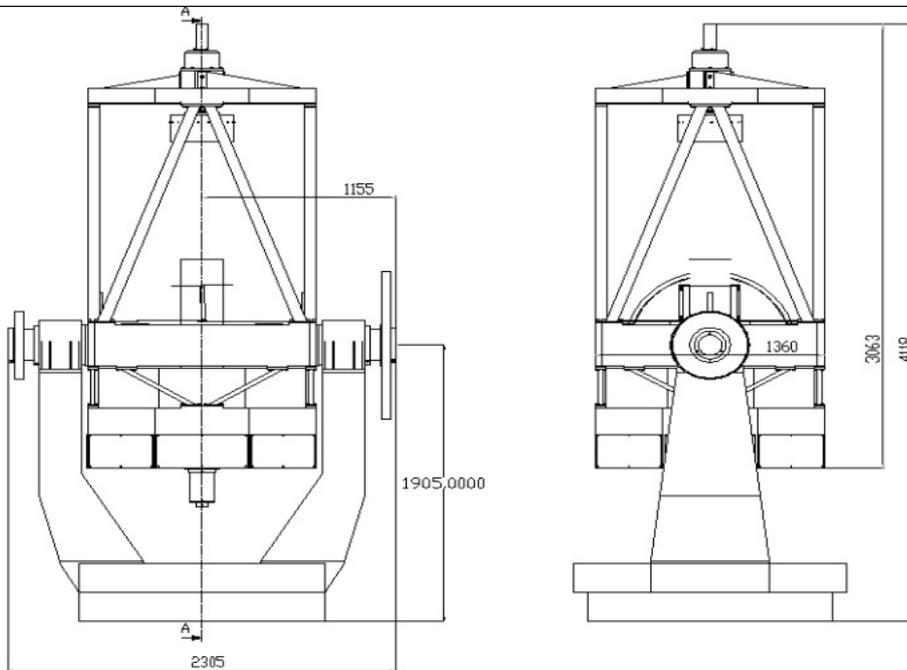


Figura 3.6: *Esquema da montagem alto-azimutal, como a instalada no OASI.*

garantir uma operação segura.

Por fim, o programa de automação do telescópio (*Telescope Control Software*) utilizado é o Autoslew, cujas características principais são:

- Software para Windows 32-bits;
- Completa compatibilidade entre movimento, sincronização e acompanhamento;

- Controle periódico de erros;
- Otimização do movimento por transformada de Fourier (aumenta a precisão de apontamento de um fator de 5);
- Maneta com display LCD, seletor de velocidade e controle de foco;
- Velocidade de movimento de até 4°/segundo;
- Precisão média de apontamento 30 segundos de arco;
- Controle automático da cúpula.

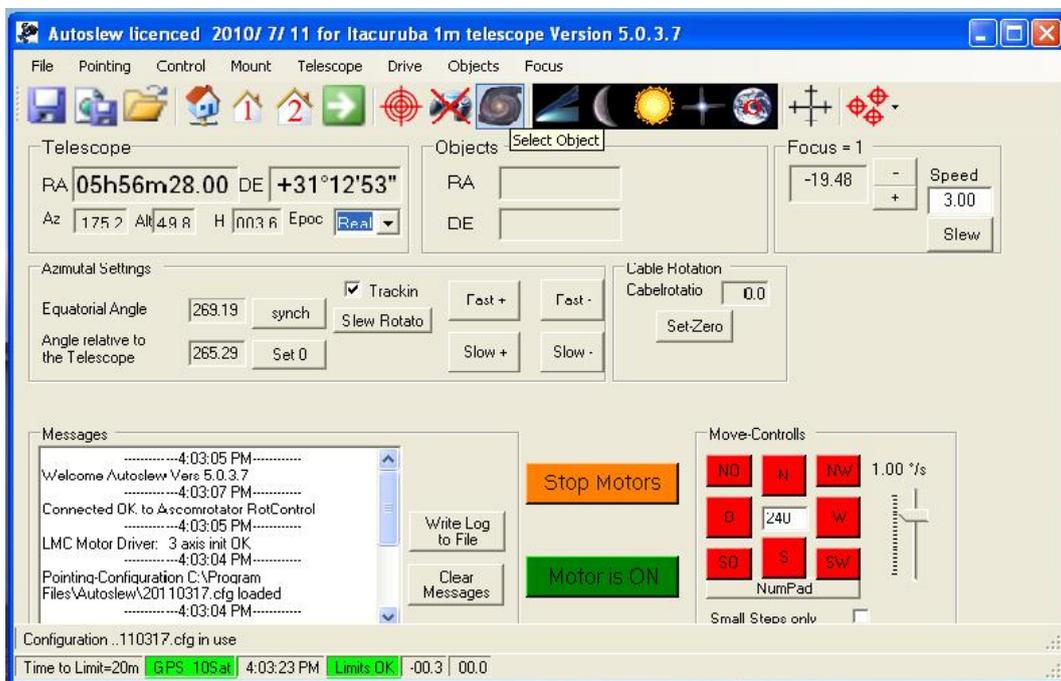


Figura 3.7: Imagem típica da tela Autoslew, software de automação do telescópio.

3.1.2 Cúpula

A cúpula tem 7 metros de diâmetro e 5,5 metros de altura, e foi adquirida segundo os critérios técnicos do projeto IMPACTON, ou seja: material com baixa condutividade térmica, boa resistência às intempéries atmosféricas, excelente impermeabilização e completa automação no apontamento e na abertura. A cúpula pode ser visualizada na Figura 3.8 e os seus detalhes técnicos são dados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: *Características da cúpula.*

Altura total	5,5 metros
Altura parede	2 metros
Diâmetro	6,7 metros
Tamanho da porta	1,580 x 0,980 metros
Largura trapeira	1,8 metros
Abertura após Zenit	0,8 metros
Rotação e abertura	Via computador através do software MaxDome
Baterias de 12V	Carregadas através de painéis solares
Circulação do ar	Via ventiladores solares
Acabamento externo	Fibra de vidro de nível marítimo
Acabamento interno	Aço inoxidável a prova de corrosão



Figura 3.8: *Cúpula do OASI*

3.1.3 Câmera CCD e sistema de filtros

O OASI conta com dois modelos de câmera CCD Apogee, Alta U42 e Alta U47, ambas com resfriamento termoelétrico (sistema Peltier), sensor *back-illuminated* e eficiência quântica mais alta no visível. O primeiro modelo possui dimensões de 2048×2048 pixels (1 pixel = $13,5 \mu\text{m}$), que acoplada ao telescópio fornece um campo de $11,8 \times 11,8$ minutos de arco com uma escala de placa de $0,343''/\text{pixel}$, enquanto o segundo modelo, de 1024×1024 pixels (1 pixel = $13,0 \mu\text{m}$), permite cobrir um campo no céu de $5,9 \times 5,9$ minutos de arco. A câmera utilizada no momento, a Alta U42, tem uma curva de eficiência quântica conforme dado na Figura 3.9.

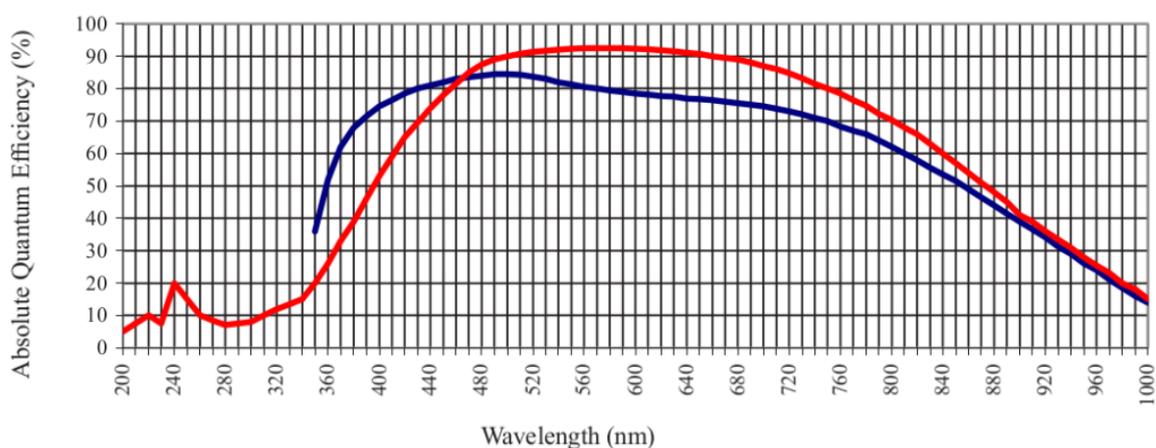


Figura 3.9: Porcentagem de eficiência quântica em função do comprimento de onda para o modelo Apogee Alta U42 (curva vermelha). A curva em azul mostra a eficiência quântica para o CCD modelo U42-UV que tem maior eficiência próximo do ultravioleta e menor na região do visível.

O telescópio tem acoplada uma roda de filtros, disponibilizando o filtro R do sistema de Johnson e os filtros u' , g' , r' , i' , z' do sistema SDSS (do inglês, *Sloan Digital Sky Survey*). A roda de filtros pode ser vista na Figura 3.10 junto com a câmera CCD.

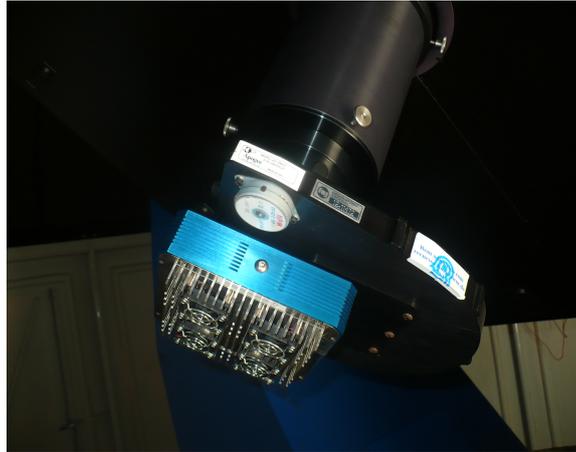


Figura 3.10: Câmera CCD Apogee, modelo Alta U42, acoplada à roda de filtros.

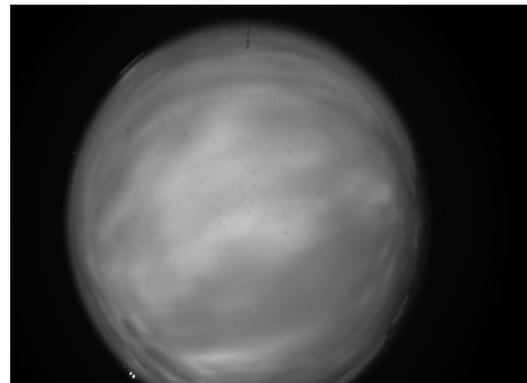
3.1.4 Outros equipamentos

All-Sky

Construída no Observatório Nacional, por Pierre Bourget (ESO) e Roberto Souza (ON), a câmera *All-Sky* instalada no OASI, permite obter imagens de todo o céu utilizando uma lente "olho de peixe" monitorando assim as condições climáticas. Ela é essencial para a realização das observações remotas. A Figura 3.11 mostra imagens do céu do município de Itacuruba em noites de observação.



(a)



(b)

Figura 3.11: Imagens do céu de Itacuruba/PE em noites de observação feitas pela *All-Sky*. (a) Sem nuvens e (b) com nuvens.

Estação meteorológica

A estação meteorológica é equipamento fundamental para a operação remota do telescópio, já que monitora e transmite continuamente as condições meteorológicas

locais. O modelo instalado no OASI é o Vantage Pro2 Plus que permite monitorar a temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, quantidade de chuva, pressão atmosférica e radiação solar e de raios UV.

Receptor do link de internet

Toda operação remota depende do link de internet. No caso do OASI esta conexão é feita por transmissão via rádio da cidade de Itacuruba, a 8 km do sítio do observatório. Este link é garantido pela Secretária de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco. Na Figura 3.12 podem ser vistas a câmera *All-Sky*, a antena receptora do link de internet e a estação meteorológica.



Figura 3.12: Vista da *All-Sky* e da estação meteorológica, além da antena receptora do link de internet.

Computadores

O OASI conta com dois computadores, sendo um deles para controle do telescópio, e outro para o armazenamento provisório de dados que são posteriormente transferidos para o ON via internet ao fim de cada missão observacional. O controle do telescópio é feito por um computador industrial capaz de receber um número maior de placas de expansão, necessárias tanto para o funcionamento do telescópio quanto da cúpula. Por exemplo, estas placas controlam os motores do telescópio, a abertura/fechamento e sincronização da cúpula, a abertura/fechamento e controle de foco do espelho. Ambos os computadores do OASI possuem sistema operacional Windows XP e configurações simples de memória e de armazenamento.

3.2 A amostra

A seleção dos objetos a serem observados levou em consideração as seguintes condições:

1. Não ter período de rotação publicado;
2. Ser observável do OASI por ao menos três meses;
3. Ter magnitude visual (V) menor do que 18,5;
4. Não ter um movimento diferencial muito grande quando da observação;
5. Não está num campo muito repleto de estrelas no momento da observação.

A partir destes critérios foram selecionados 45 NEA. Entretanto, em razão tanto de problemas técnicos como de condições meteorológicas, apenas 35 objetos puderam ser observados. Entre os 35 asteroides próximos da Terra estudados foram 18 do subgrupo Amor, 15 do subgrupo Apollo, e apenas 2 do subgrupo Aten. Dentre os asteroides da nossa amostra, 9 são também classificados como PHA. A maioria dos objetos observados tem diâmetro de até cerca de 1 km, sendo que o maior asteroide da nossa amostra possui um diâmetro estimado em 5,3 km. Alguns objetos possuem órbitas com altas inclinações e excentricidades e alguns atingem distâncias que vão além do cinturão principal de asteroides. É importante também ressaltar que ao longo do desenvolvimento desta dissertação alguns asteroides tiveram período de rotação publicado.

Na Tabela 3.3, para cada um dos objetos observados é dado: a denominação, os parâmetros orbitais (a , e , i , q e Q), a magnitude absoluta (H), o diâmetro (D) e o subgrupo ao qual pertencem. O diâmetro dos objetos listados foram estimados a partir da magnitude absoluta e considerando um albedo de 0,04 e de 0,20, característicos de objetos de tipos taxonômicos C e S, respectivamente (Pravec et al., 2012). Os asteroides com diâmetros calculados a partir de albedo determinado estão listados na tabela com as respectivas referências.

Tabela 3.3: *Amostra de objetos observados.*

Asteroide	a (UA)	e	i (°)	q (UA)	Q (UA)	H	D² (km)	Subgrupo
(9400) 1994 TW1	2,59	0,57	36,01	1,09	4,08	14,8	3,4 ⁵	Amor
(31221) 1998 BP26	1,72	0,25	20,22	1,28	2,16	17,2	1,1 - 2,4	Amor
(52381) 1993 HA ¹	1,27	0,14	7,72	1,09	1,46	20,0	0,337 ⁷	Amor
(68278) 2001 FC7 ¹	1,43	0,11	2,62	1,27	1,60	18,4	0,629 - 1,40	Amor
(86666) 2000 FL10	1,46	0,42	29,01	0,83	2,08	16,9	1,3 - 2,8	Apollo
(88263) 2001 KQ1	2,09	0,43	38,81	1,19	3,0	15,4	5,31 ³	Amor
(138847) 2000 VE62 ¹	1,61	0,28	22,17	1,15	2,08	16,9	0,396 ³	Amor
(141354) 2002 AJ29 ¹	1,98	0,45	10,91	1,09	2,88	17,3	1,0 - 2,3	Amor
(142040) 2002 QE15	1,66	0,34	28,24	1,09	2,24	16,3	1,94 ⁶	Amor
(152679) 1998 KU2	2,25	0,55	4,92	1,00	3,49	16,7	4,692 ³	Apollo
(154807) 2004 PP97	1,48	0,31	15,53	1,01	1,95	18,4	0,601 - 1,344	Apollo
(155110) 2005 TB	1,26	0,34	30,38	0,82	1,70	17,5	0,952 - 2,13	Apollo
(163243) 2002 FB3 ¹	0,76	0,60	20,27	0,30	1,21	16,4	1,62 ³	Aten (PHA)
(189008) 1996 FR3	2,1	0,79	8,1	0,44	3,88	16,3	1,7 - 3,7	Apollo
(194268) 2001 UY4	1,45	0,78	5,43	0,30	2,59	18,2	1,244 ³	Apollo (PHA)
(235756) 2004 VC	1,13	0,25	39,1	0,84	1,42	18,8	1,136 ³	Apollo (PHA)
(250706) 2005 RR6 ¹	2,97	0,69	6,95	0,90	5,04	18,5	0,601 - 1,344	Apollo (PHA)
(315098) 2007 EX ¹	0,87	0,41	18,69	0,50	1,23	16,9	1,3 - 2,8	Aten
(337069) 1998 FX134 ¹	2,25	0,42	5,21	1,29	3,22	18,6	0,574 - 1,283	Amor
(337866) 2001 WL15	1,98	0,47	6,94	1,04	2,93	18,7	0,523 - 1,17	Amor
(348400) 2005 JF21	2,22	0,53	10,8	1,03	3,41	17,3	0,3 ⁸	Amor (PHA)
(413192) 2002 VY94 ¹	3,2	0,65	9,14	1,1	5,37	16,8	3,96 ⁴	Amor
(423747) 2006 CX ¹	1,7	0,29	28,9	1,2	2,22	18,9	0,5 - 1,11	Amor
(425713) 2011 BK24 ¹	1,55	0,22	8,75	1,21	1,90	19,6	0,362 - 0,809	Amor
(430544) 2002 GM2	2,19	0,80	3,35	0,42	3,97	18,6	0,574 - 1,283	Apollo (PHA)
(436724) 2011 UW158	1,61	0,34	4,64	1,01	2,22	19,5	0,33 - 0,738	Apollo (PHA)
(436775) 2012 LC1	2,01	0,76	34,44	0,47	3,54	16,5	1,5 - 3,4	Apollo
(442243) 2011 MD11	2,5	0,49	16,17	1,25	3,74	18,0	0,756 - 1,692	Amor
(450160) 2000 RM12 ¹	2,43	0,66	57,26	0,80	4,05	16,6	1,4 - 3,1	Apollo
(459872) 2014 EK24	1,0	0,072	4,72	0,93	1,07	23,3	0,065 - 0,147	Apollo
1998 GL10 ¹	3,1	0,66	8,68	1,04	5,28	19,0	0,477 - 1,067	Amor
2012 TM139	2,1	0,44	4,49	1,17	3,05	19,7	0,345 - 0,773	Amor
2015 CA1 ¹	2,86	0,61	11,25	1,09	4,63	20,6	0,228 - 0,511	Amor
2015 FS332	1,80	0,47	35,12	0,94	2,66	18,4	0,629 - 1,4	Apollo (PHA)
2016 HL ¹	1,81	0,61	5,15	0,69	2,92	19,9	0,315 - 0,705	Apollo (PHA)

¹Sem período de rotação publicado até maio/2016.²Diâmetros estimados utilizando albedos de 0,04 e 0,20.³Mainzer et al. (2011), ⁴Nugent et al. (2015), ⁵Binzel et al. (2002), ⁶Wolters et al. (2005), ⁷Mueller et al. (2011), ⁸Naidu et al. (2016).

3.3 Observação e processamento dos dados

As observações foram realizadas utilizando a infraestrutura do OASI ao longo de aproximadamente 150 noites, de janeiro de 2015 a maio de 2016, sempre em noites em torno da Lua nova. As observações foram realizadas com a câmera CCD Apogee Alta U42, de 2048×2048 pixels. O filtro utilizado nas observações foi o R do sistema Johnson.

Para uma determinação confiável do período de rotação de um asteroide é necessário ter-se uma curva de luz com boa cobertura. Por isso foram observados ao longo de uma noite cerca de dois ou três objetos. Cada asteroide foi observado durante um intervalo de cerca de 5 horas já que a experiência mostra que é melhor observar poucos asteroides por um longo período. Para alguns dos nossos alvos as observações se estenderam por mais de uma missão, buscando determinar as propriedades rotacionais e também indícios de sistemas binários e de mudanças nos períodos rotacionais conhecidos. O tempo de integração das imagens de ciência foi determinado levando em consideração o brilho e o movimento do alvo durante a noite sendo que em média, tempos entre 20 e 120 segundos foram utilizados. De qualquer forma, as exposições não podem ser muito longas, pois neste caso a imagem resultante do asteroide será muito alongada.

As imagens obtidas pelo CCD estão sujeitas a efeitos do instrumento que devem ser removidos. Para isso obtivemos a cada noite, para a correção das imagens de ciência, imagens de *bias*, *dark* e *flatfield*. Dez imagens de *bias* e de *dark* foram obtidas no início e no fim de cada noite. As imagens de *flat* foram obtidas geralmente no começo da noite, expondo o CCD ao céu logo depois do pôr do sol, com tempos de integração de 0,5, 1 e 2 segundos visando obter um número de fótons entre 30% e 50% do nível de saturação do CCD. Quando não foi possível realizar exposições de *sky flat*, as imagens de *flats* foram adquiridas expondo o CCD a uma tela uniformemente iluminada por uma lâmpada branca dentro da cúpula, utilizando tempos de exposição de 0,3 e/ou 1,3 segundos, para o CCD com *binning* 2×2 e *binning* 1×1 (binagem normal), respectivamente, para as quais sempre foram obtidas 10 imagens. Utilizamos o CCD com *binning* 2×2 quando o alvo apresentava um brilho fraco no momento da observação, visto que com esta binagem conseguimos ter uma relação sinal-ruído melhor. Uma breve descrição sobre as imagens de calibração é apresentada a seguir:

- ★ *Bias* - são imagens que caracterizam os efeitos de corrente de *offset* e de variação na estrutura do ruído. A corrente usada para prender os elétrons no seu poço de potencial gera uma corrente térmica intrínseca no CCD, que é

adicionada ao sinal durante a exposição. Isso é o *offset*. Os *bias* são imagens de calibração tomadas com o obturador (ou *shutter*) fechado e com tempo de exposição igual a zero. Como existe um ruído associado com qualquer leitura do CCD, são tomadas várias imagens de *bias* as quais são combinadas para minimizar os efeitos de ruído, raios cósmicos e rejeitar pixels ruins. O resultado da combinação das várias imagens de *bias* é uma única imagem média, *master bias*, que deve ser subtraído de todas as imagens de ciência e dos *flats*.

★ *Darks* - são imagens de calibração que vão corrigir tanto os efeitos de corrente de *offset* como os de corrente escura. Esta última é um ruído térmico causado por uma carga elétrica adicional gerada devido à interferência térmica, que se acumula nos pixels do CCD durante o tempo de integração. Os CCDs que são resfriados criogenicamente (geralmente a temperatura do nitrogênio líquido, 77 K) não sofrem os ruídos devidos à corrente escura, assim, dados de uma CCD criogenicamente arrefecida apenas precisam ser corrigidos por *bias* (com exceção dos detectores de infravermelho próximo). Porém, um CCD que é arrefecido, mas não a temperaturas criogênicas (tal como o CCD do OASI), precisa ser corrigido para compensar tanto a corrente de *offset* como a corrente de escuro. As imagens de *dark* são tomadas com o obturador fechado, com o mesmo tempo de exposição da imagem que se quer corrigir, e também deve ser obtida com a mesma temperatura de funcionamento do CCD. A fim de minimizar os ruídos, é recomendado obter várias exposições de *darks* e combiná-los em uma única imagem mediana, chamada de *master dark*, para que esta imagem única venha a adicionar apenas uma quantidade pequena de ruído às nossas exposições de ciência. O *master dark* deve ser subtraído de todas as imagens de ciência e dos *flats*. Em nosso caso, utilizamos o *master dark* apenas para subtrair das imagens de ciência e o *master bias* para corrigir as imagens de *flats*.

★ *Flats* - são imagens de calibração que permitem corrigir as diferenças de sensibilidade que existem nas diversas zonas do CCD. Isto ocorre pois ao iluminar o CCD uniformemente, os pixels respondem de forma diferente ao estímulo luminoso. Além disso, as imagens de *flats* permitem anular algumas imperfeições atribuídas ao equipamento utilizado, como as bordas mais escuras nas imagens e os pequenos nódulos negros originados pelas poeiras depositadas nos espelhos, redutor focal, filtros e no próprio CCD. As imagens de *flats* podem ser tomadas com o telescópio apontado para o céu (*sky flat*), logo após o pôr do sol, ou para uma superfície plana iluminada por uma luz difusa uniforme (*dome flat*). O tempo de exposição depende da sensibilidade e a contagem obtida deve ser dentro da região de linearidade do CCD, em geral de 30-50%

do nível de saturação. O número de imagens deve ser suficiente para obtenção de uma boa média. Para corrigir as imagens de ciência, devemos dividi-las por uma imagem da combinação mediana dos *flats* já subtraídos da imagem de *master bias*. A imagem mediana dos *flats*, chamada de *master flat*, deve ser normalizada em 1 para não alterar o valor original das contagens.

Para a realização deste trabalho, o procedimento de calibração padrão foi utilizado corrigindo as imagens de ciência por *bias*, *dark* e *sky flat* ou *dome flat*. Devido a problemas técnicos ou à más condições atmosféricas, em algumas noites não foram adquiridas imagens de *flat* e, para realizar a calibração das imagens de ciência foram utilizadas imagens de noites adjacentes. Este procedimento é aceitável quando se utiliza fotometria relativa, como no nosso caso. Todas as imagens de ciência e de calibração foram corrigidas por meio da tarefa *Calibrate* e a análise fotométrica foi feita com a tarefa *Photometry*, ambas do programa MaxIm DL versão 5.07.

Para a determinação do período de rotação de um asteroide utilizamos a magnitude relativa, ou seja, a diferença entre a magnitude instrumental do asteroide e de uma estrela de comparação, calculadas utilizando a tarefa *Photometry* do programa MaxIm DL. Durante o processo de redução dos dados, medimos o fluxo de duas ou mais estrelas de comparação a fim de eliminar aquelas que são variáveis, sendo utilizada como estrela de referência aquela com magnitude mais próxima à do asteroide. Em seguida, utilizando o método da fotometria diferencial, conforme descrito na seção 2.4, calculamos a diferença entre a magnitude instrumental do asteroide e a da estrela de comparação, o valor resultante sendo conhecido como magnitude relativa.

Na tabela 3.4 são apresentadas as circunstâncias observacionais dos asteroides próximos da Terra analisados neste trabalho. Para cada asteroide é dado: a data da observação, o tempo de observação, a ascensão reta (AR), a declinação (DE), a distância ao Sol (Δ) e a Terra (r), o ângulo de fase (α) e a magnitude visual (V).

Tabela 3.4: *Efemérides dos asteroides nas noites de observação.*

Asteroide	Data	Tempo	AR	DE	Δ	r	α	Mag
		Obs. (h)	(J2000)	(J2000)	(UA)	(UA)	($^{\circ}$)	(V)
(9400) 1994 TW1	06/09/2015	4,7	02 31 45.61	+12 38 12.9	0,523	1,373	37,3	15,6
	07/09/2015	5,6	02 32 27.00	+13 45 40.3	0,513	1,366	37,3	15,5
	08/09/2015	5,4	02 33 07.89	+14 57 50.3	0,501	1,360	37,2	15,5
	09/09/2015	3,7	02 33 49.41	+16 18 16.1	0,490	1,352	37,2	15,4
(31221) 1998 BP26	01/03/2016	2,2	07 01 41,7	+29 46 33	0,453	1,287	41,0	17,6
	02/03/2016	1,0	07 02 38,5	+28 58 22,4	0,456	1,287	41,4	17,7
	02/03/2016	1,0	07 02 42,7	+28 54 17,5	0,456	1,287	41,4	17,7
	04/03/2016	2,3	07 04 42,3	+27 22 02,2	0,463	1,285	42,1	17,7
(52381) 1993 HA	07/12/2015	5,5	05 56 43,5	-30 04 16,4	0,175	1,096	47,2	18,2
	09/12/2015	6,8	05 57 23,6	-30 36 40,2	0,176	1,095	47,4	18,2
(68278) 2001 FC7	10/09/2015	4,7	20 52 24,5	-26 46 46,9	0,324	1,271	30,9	17,9
(86666) 2000 FL10	12/09/2015	3,6	22 20 00,5	+32 09 26	0,322	1,272	29,9	16,2
	13/09/2015	5,6	22 18 17,6	+31 26 22,3	0,313	1,266	29,7	16,1
	16/10/2015	3,0	21 03 11.72	-41 54 20.3	0,179	1,047	69,0	15,7
	17/10/2015	3,0	21 00 24.75	-44 34 08.7	0,182	1,041	71,0	15,8
	18/10/2015	3,3	20 57 32.59	-47 07 33.6	0,186	1,035	72,9	15,8
(88263) 2001 KQ1	06/11/2015	3,2	06 10 41,3	+08 59 36,2	0,486	1,355	34,1	16,1
	06/11/2015	0,5	06 10 47,4	+08 48 51,1	0,485	1,355	34,1	16,1
	07/11/2015	2,0	06 11 33,4	+07 36 07,2	0,479	1,351	34,0	16,0
	08/11/2015	4,0	06 12 25,3	+06 05 26,1	0,472	1,346	34,0	16,0
	10/12/2015	1,3	06 14 26,5	-45 00 29,7	0,471	1,231	48,6	16,2
	10/12/2015	3,4	06 14 23,1	-45 05 27	0,471	1,231	48,6	16,2
	11/12/2015	1,5	06 13 42,8	-46 11 40	0,476	1,228	49,2	16,3
	11/12/2015	0,8	06 13 39	-46 16 25,4	0,476	1,228	49,3	16,3
	11/12/2015	0,8	06 13 37,6	-46 18 18,6	0,477	1,228	49,2	16,3
	11/12/2015	1,3	06 13 31,5	-46 25 46,6	0,477	1,228	49,3	16,3
	12/12/2015	1,5	06 12 52,6	-47 24 41	0,482	1,226	49,8	16,3
	12/12/2015	1,7	06 12 46,4	-47 31 52	0,483	1,226	49,8	16,3
(138847) 2000 VE62	10/03/2016	3,2	16 01 06,6	-37 01 30,2	0,461	1,195	53,6	17,6
	12/03/2016	0,8	16 10 10,5	-36 05 41	0,448	1,191	53,7	17,5
	12/03/2016	2,3	16 10 33,2	-36 03 13,5	0,448	1,191	53,8	17,5

Tabela 3.4: Efemérides dos asteroides nas noites de observação – continuação.

Asteroide	Data	Tempo	AR	DE	Δ	r	α	Mag
		Obs. (h)	(J2000)	(J2000)	(UA)	(UA)	($^{\circ}$)	(V)
	07/04/2016	1,5	17 55 40,5	-14 29 40,5	0,345	1,156	55,3	16,9
	06/05/2016	2,0	19 14 14	+20 56 08,4	0,363	1,166	56,0	17,1
	09/05/2016	1,5	19 18 51,9	+23 44 41,6	0,371	1,170	56,0	17,1
(141354) 2002 AJ29	05/03/2016	3,2	12 36 51,8	-38 51 53,5	0,223	1,151	40,6	15,9
	05/03/2016	1,2	12 37 28,6	-38 53 43,7	0,223	1,151	40,7	15,9
	06/03/2016	2,4	12 42 16,3	-39 06 06,2	0,218	1,147	40,8	15,9
	06/03/2016	1,7	12 42 50,4	-39 07 34	0,218	1,147	40,8	15,9
	07/03/2016	4,3	12 47 49,3	-39 18 36,6	0,214	1,144	40,9	15,8
	08/03/2016	4,0	12 53 21,2	-39 29 01,1	0,209	1,141	41,2	15,8
	05/04/2016	0,9	16 26 53,8	-24 05 28	0,141	1,093	46,5	15,0
	05/04/2016	0,5	16 27 09,8	-24 02 18,4	0,141	1,093	46,5	15,0
	05/04/2016	0,3	16 27 36,2	-23 56 58,6	0,141	1,093	46,6	15,0
	11/05/2016	0,9	18 20 39,4	+10 49 13,9	0,221	1,154	44,9	16,0
	12/05/2016	2,2	18 21 15	+11 16 09	0,224	1,158	44,5	16,0
	13/05/2016	3,0	18 21 45,3	+11 41 14,8	0,227	1,161	44,0	16,1
(142040) 2002 QE15	15/10/2015	1,2	07 24 17,2	+23 54 29,7	0,428	1,106	64,0	16,9
	16/10/2015	1,3	07 26 08,9	+22 38 48	0,426	1,108	63,8	16,9
	17/10/2015	2,0	07 27 53,8	+21 24 37,6	0,425	1,109	63,6	16,9
	18/10/2015	1,4	07 29 37,6	+20 07 49	0,423	1,111	63,3	16,9
	11/11/2015	2,6	07 53 07	-10 20 55,4	0,433	1,173	54,8	16,8
	05/12/2015	4,3	07 42 37,5	-32 07 32	0,514	1,266	46,4	17,1
	06/12/2015	2,0	07 41 28,7	-32 45 09,4	0,518	1,270	46,0	17,1
(152679) 1998 KU2	19/06/2015	4,2	22 05 15,8	+10 51 39,8	0,258	1,128	58,3	16,2
	09/07/2015	2,5	00 40 43,3	+26 03 21,2	0,261	1,039	77,8	16,6
	10/07/2015	2,6	00 48 12,2	+26 29 17	0,264	1,036	78,5	16,6
	10/09/2015	2,5	04 57 15,8	+25 09 12,2	0,487	1,134	62,3	17,6
	11/09/2015	2,7	04 58 45	+25 00 29	0,489	1,140	61,8	17,6
	12/09/2015	2,5	05 00 13,8	+24 51 22	0,491	1,146	61,1	17,6
	13/09/2015	1,4	05 01 39,7	+24 42 04,8	0,493	1,152	60,4	17,6
(154807) 2004 PP97	12/10/2015	3,3	03 37 36,7	+36 58 24,7	0,192	1,143	37,7	16,8
	14/10/2015	1,1	03 42 44,2	+40 57 20,7	0,185	1,135	38,9	16,8
	16/10/2015	2,7	03 47 58,66	+44 42 36,9	0,180	1,127	40,3	16,7
(155110) 2005 TB	10/11/2015	5,0	00 54 10,9	+19 11 08	0,458	1,405	20,9	17,6

Tabela 3.4: Efemérides dos asteroides nas noites de observação – continuação.

Asteroide	Data	Tempo Obs. (h)	AR (J2000)	DE (J2000)	Δ (UA)	r (UA)	α ($^{\circ}$)	Mag (V)
	11/11/2015	1,7	00 54 23,2	+18 08 57,5	0,466	1,409	21,4	17,6
(163243) 2002 FB3	10/03/2016	1,3	06 29 30	-24 46 27,7	0,398	1,150	53,3	16,8
	10/03/2016	1,5	06 29 43,8	-24 39 33	0,399	1,150	57,3	16,8
	12/03/2016	2,0	06 34 32,8	-22 25 30	0,410	1,158	56,6	16,8
	12/03/2016	0,5	06 34 46	-22 18 55,7	0,411	1,158	56,6	16,8
	01/04/2016	2,4	07 17 20,3	-05 14 41,4	0,554	1,211	54,7	17,5
	03/04/2016	2,1	07 21 17,5	-04 00 36,6	0,570	1,214	54,8	17,6
(189008) 1996 FR3	21/04/2015	4,2	10 07 38	+18 09 42,5	0,643	1,411	39,7	17,7
(194268) 2001 UY4	06/11/2015	2,8	03 08 44,3	-05 22 14,6	0,282	1,257	17,1	16,9
	07/11/2015	1,0	03 02 45,8	-05 06 37,2	0,295	1,269	16,7	16,9
	08/11/2015	3,3	02 57 12,5	-04 51 17	0,308	1,282	16,4	17,0
	09/11/2015	2,8	02 52 07	-04 36 25,6	0,321	1,295	16,3	17,2
(235756) 2004 VC	13/04/2015	1,0	10 02 51,8	+41 10 53,7	0,124	1,054	62,5	16,5
(250706) 2005 RR6	05/03/2016	1,0	08 09 31	+42 13 48,3	0,321	1,210	41,1	18,1
	06/03/2016	1,5	08 15 46	+41 18 37,3	0,328	1,218	40,5	18,1
	06/03/2016	0,5	08 16 11	+41 14 39	0,329	1,219	40,5	18,1
	06/03/2016	0,7	08 16 21	+41 13 02,7	0,329	1,219	40,5	18,1
	07/03/2016	3,2	08 21 37,5	+40 24 23	0,337	1,227	39,8	18,2
	07/03/2016	0,7	08 22 24,6	+40 16 36,7	0,338	1,228	39,7	18,2
(315098) 2007 EX	04/04/2016	2,5	08 53 21,9	-50 01 03,6	0,426	1,232	48,3	17,3
	02/05/2016	2,8	08 54 38,5	-34 41 19,7	0,515	1,221	54,0	17,9
	03/05/2016	3,0	08 55 39,7	-34 14 27,8	0,519	1,219	54,3	17,9
	04/05/2016	1,5	08 56 44,4	-33 47 42	0,522	1,218	54,5	17,9
	05/05/2016	2,1	08 57 49	-33 22 29	0,525	1,216	54,8	17,9
(337069) 1998 FX134	14/05/2015	4,1	15 16 22	-39 46 22,1	0,298	1,294	16,4	17,4
	15/05/2015	2,0	15 17 08,4	-40 02 03,5	0,298	1,294	16,4	17,4
	16/05/2015	5,2	15 17 52,4	-40 15 32,7	0,298	1,293	16,5	17,4
	17/05/2015	6,2	15 18 38,2	-40 28 47,5	0,297	1,292	16,6	17,4
	14/06/2015	4,6	15 52 24,2	-42 38 01	0,318	1,305	21,5	17,7
	15/06/2015	2,1	15 54 12,4	-42 33 54,2	0,320	1,306	21,7	17,7
(337866) 2001 WL15	13/12/2015	7,0	06 26 14,7	+01 05 17,4	0,176	1,144	22,9	16,3
	14/12/2015	0,2	06 29 53,3	+01 12 10,7	0,169	1,138	22,8	16,2

Tabela 3.4: Efemérides dos asteroides nas noites de observação – continuação.

Asteroide	Data	Tempo Obs. (h)	AR (J2000)	DE (J2000)	Δ (UA)	r (UA)	α ($^{\circ}$)	Mag (V)
	15/12/2015	2,0	06 32 54	+01 18 42	0,165	1,134	22,7	16,1
	01/03/2016	2,5	14 06 21,2	+23 46 14	0,199	1,132	41,5	17,1
	02/03/2016	1,5	14 06 18,5	+23 43 45,8	0,203	1,136	40,8	17,1
	02/03/2016	0,8	14 06 16	+23 43 32	0,203	1,137	40,7	17,1
	03/03/2016	1,1	14 06 12,3	+23 41 15	0,206	1,140	40,1	17,2
	04/03/2016	1,2	14 05 55	+23 38 06,7	0,210	1,145	39,2	17,2
	31/03/2016	3,8	13 41 27,9	+20 23 17,3	0,320	1,289	21,9	17,8
	01/04/2016	0,8	13 40 21,3	+20 11 27,5	0,325	1,295	21,6	17,9
	02/04/2016	2,2	13 39 02,2	+19 57 14,5	0,331	1,302	21,2	17,9
	03/04/2016	4,0	13 37 57,2	+19 44 46,3	0,336	1,308	20,8	18,0
(348400) 2005 JF21	08/07/2015	2,6	18 03 22,2	+06 05 52,6	0,224	1,210	27,2	15,7
	09/07/2015	3,6	18 02 59,1	+05 56 22,8	0,044	0,175	27,7	15,6
	18/09/2015	3,8	04 42 43,9	-36 55 25,3	0,179	1,061	67,4	16,0
	19/09/2015	3,3	04 42 52,4	-36 27 22,4	0,179	1,061	66,7	16,0
	10/10/2015	3,3	04 32 00	-29 19 14,4	0,265	1,148	49,8	16,6
	11/10/2015	0,5	04 30 53,9	-29 01 05,2	0,269	1,154	48,8	16,6
	04/11/2015	6,5	03 58 09,1	-21 00 25,6	0,376	1,298	30,2	17,0
	05/11/2015	6,0	03 56 42,8	-20 37 01,2	0,382	1,305	29,6	17,0
(413192) 2002 VY94	21/04/2015	5,5	16 30 53,4	-40 04 59	0,637	1,528	26,5	18,0
(423747) 2006 CX	26/04/2015	1,0	10 21 46	-45 45 21	0,505	1,341	39,8	19,6
(425713) 2011 BK24	15/04/2015	7,5	13 07 43,7	-25 08 09,4	0,217	1,213	13,7	17,5
	16/04/2015	3,5	13 06 26,3	-25 45 23,6	0,217	1,213	14,2	17,5
	16/04/2015	3,2	13 06 10,6	-25 51 39	0,217	1,213	14,3	17,5
	17/04/2015	4,9	13 05 01,4	-26 25 11,6	0,217	1,212	14,9	17,5
	18/04/2015	6,8	13 03 50	-26 59 11,5	0,217	1,212	15,5	17,6
(430544) 2002 GM2	26/03/2015	2,2	12 15 44,6	-07 59 29	0,347	1,343	4,3	17,3
	27/03/2015	1,3	12 11 37,2	-07 28 18,6	0,362	1,359	4,3	17,5
	28/03/2015	1,3	12 08 07,2	07 01 22	0,376	1,373	4,8	17,6
(436724) 2011 UW158	21/05/2015	1,0	13 05 25,7	-31 30 59,2	0,190	1,166	33,2	18,0
	21/06/2015	2,8	12 35 38,9	-24 23 16,3	0,094	1,048	68,0	17,3
	08/07/2015	2,7	12 42 06,1	-09 46 20,7	0,040	1,015	90,5	16,2
	09/07/2015	2,0	12 43 14,3	-07 36 52,5	0,037	1,014	92,3	16,0
	10/07/2015	2,5	12 44 33,4	-05 04 03,7	0,034	1,013	94,0	15,9

Tabela 3.4: Efemérides dos asteroides nas noites de observação – continuação.

Asteroide	Data	Tempo	AR	DE	Δ	r	α	Mag
		Obs. (h)	(J2000)	(J2000)	(UA)	(UA)	($^{\circ}$)	(V)
	11/07/2015	2,5	12 46 06,4	-02 01 41,7	0,031	1,013	96,0	15,8
	06/09/2015	2,5	00 09 51,4	+32 57 11,8	0,165	1,134	36,8	17,8
	07/09/2015	1,5	00 09 05,4	+32 33 54,1	0,168	1,139	35,7	17,8
	07/10/2015	0,8	23 53 27,8	+20 47 01,8	0,305	1,289	18,7	16,0
	10/10/2015	0,8	23 53 22,8	+19 47 02,8	0,323	1,305	18,9	16,2
	11/10/2015	0,5	23 53 26	+19 29 16,1	0,329	1,310	19,0	16,4
(436775) 2012 LC1	12/05/2015	4,2	14 06 01,5	+11 16 12,3	0,333	1,299	25,9	15,8
	13/05/2015	4,8	14 02 27,06	+09 35 35,2	0,346	1,312	25,5	15,9
(442243) 2011 MD11	15/09/2015	3,6	00 29 38,65	-30 22 52,4	0,280	1,255	23,9	16,9
	19/09/2015	2,5	00 24 56	-26 25 45,6	0,276	1,257	21,0	16,8
(450160) 2000 RM12	07/04/2016	1,3	08 27 26,3	+08 26 31,2	0,484	1,242	49,8	17,4
	08/04/2016	4,0	08 28 59	+07 10 25	0,50	1,251	49,5	17,4
	09/04/2016	1,7	08 30 37,5	+05 51 15	0,518	1,261	49,1	17,5
	10/04/2016	1,8	08 32 22	+04 29 06,4	0,538	1,272	48,7	17,6
(459872) 2014 EK24	13/03/2015	1,0	10 21 08	-07 55 48,2	0,054	1,045	20,0	18,1
	13/03/2015	1,7	10 20 50,4	-07 58 10,3	0,054	1,045	20,2	18,1
	13/03/2015	0,5	10 20 04,8	-08 03 52,4	0,054	1,045	20,4	18,1
1998 GL10	16/01/2015	1,8	06 11 01,51	-45 25 32,8	0,166	1,051	61,7	17,4
	17/01/2015	1,7	06 18 28,32	-45 58 04,4	0,165	1,051	61,8	17,4
	12/03/2015	2,1	11 38 54,1	-12 58 03	0,262	1,248	12,8	17,3
	13/03/2015	1,2	11 40 05	-12 21 11,1	0,267	1,253	12,0	17,3
	13/03/2015	3,5	11 40 12,2	-12 16 25,8	0,268	1,254	11,8	17,3
	14/03/2015	3,0	11 41 17,8	-11 41 44,6	0,272	1,260	11,1	17,4
	14/03/2015	3,0	11 41 29,2	-11 34 16	0,273	1,261	10,9	17,4
	15/03/2015	3,3	11 42 30,7	-11 01 12	0,278	1,267	10,2	17,4
	19/03/2015	3,3	11 46 52,3	-08 30 01,4	0,304	1,296	7,1	17,5
	24/03/2015	6,2	11 51 27	-05 46 38	0,339	1,334	5,3	17,7
	25/03/2015	2,5	11 52 22,6	-05 13 13,4	0,348	1,343	5,3	17,8
2012 TM139	09/09/2015	3,1	21 11 27,68	+07 22 53,7	0,208	1,188	26,98	17,8
2015 CA1	12/03/2015	0,5	13 37 47,4	-11 45 26,8	0,131	1,104	31,1	17,7
	12/03/2015	1,3	13 38 04,5	-11 55 11,8	0,131	1,104	31,2	17,7
	15/03/2015	1,6	13 51 33,4	-18 53 44	0,130	1,099	34,0	17,8

Tabela 3.4: *Efemérides dos asteroides nas noites de observação – continuação.*

Asteroide	Data	Tempo	AR	DE	Δ	r	α	Mag
		Obs. (h)	(J2000)	(J2000)	(UA)	(UA)	(°)	(V)
	15/03/2015	1,2	13 52 18	-19 19 00	0,130	1,099	34,2	17,8
	19/03/2015	1,3	14 10 16,5	-27 57 43,1	0,132	1,096	38,2	17,9
2015 FS332	14/10/2015	2,1	02 42 36,94	-36 41 06	0,135	1,091	43,8	15,9
	15/10/2015	5,0	02 42 30	-38 09 42,5	0,146	1,096	44,5	16,1
	17/10/2015	2,8	02 42 02	-40 46 46,7	0,170	1,108	45,8	16,5
	18/10/2015	2,9	02 41 48,4	-41 44 33,2	0,182	1,113	46,3	16,7
2016 HL	06/05/2016	4,8	14 05 45	-16 53 12	0,248	1,258	9,8	18,0
	07/05/2016	1,5	14 05 36	-16 25 10,6	0,258	1,268	10,5	18,2
	08/05/2016	2,0	14 05 30,7	-16 00 44,7	0,269	1,272	11,2	18,3

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, apresentaremos a análise das curvas de luz obtidas para os 35 NEA da nossa amostra. É importante salientar que para grande parte dos asteroides não foi possível determinarmos a direção de seu eixo de rotação e sua forma, porque as noites de observação não foram ou em número suficiente ou favoráveis à fotometria. Na maioria dos casos obtivemos apenas o período de rotação. Devemos remarcar que, a determinação da direção do eixo de rotação e um modelo de forma do objeto, somente podem ser determinadas conhecendo-se a amplitude da curva de luz ao longo de diversas aparições.

Todas nossas curvas de luz foram construídas utilizando magnitudes relativas, ou seja, a diferença entre a magnitude instrumental do asteroide e a de uma estrela do campo. A determinação do período de rotação dos NEA estudados foi feita utilizando o método da análise de séries de Fourier, descrito na seção 2.2. Os gráficos das curvas individuais para cada asteroide são apresentados utilizando a mesma escala de magnitude relativa para melhor visualizar a variação da amplitude. Além disso, as curvas de luz individuais apresentam as seguintes informações: data da noite de observação, horário do início e do fim da observação, número de pontos obtidos e o tempo total durante o qual foi observado o objeto, considerado como o tempo transcorrido entre a primeira e última imagem, mesmo que tenham ocorrido interrupções. É importante ressaltarmos que nossas curvas de luz individuais e de fase apresentam o eixo da magnitude relativa invertido, ou seja, os máximos e os mínimos das curvas aparecem trocados.

Para a determinação da direção do eixo de rotação e modelo de forma convexa, aplicamos o método da inversão de curva de luz (ICL) desenvolvido por Kaasalainen e colaboradores (Kaasalainen and Torppa, 2001; Kaasalainen et al., 2001), conforme mencionado na seção 2.3. Os programas utilizados para desenvolver a análise são livres e se encontram no *site* do DAMIT, descrito em Durech et al. (2010).

Ao descrever nossos resultados, atribuímos a cada período determinado um código de confiança conforme proposto em Harris and Young (1983) e Harris et al. (1999). Este código assume valores de 1 até 4, sendo que: o código 1 indica um período que está mal determinado, podendo estar completamente errado, 2 corresponde a um resultado razoavelmente seguro, provavelmente errado por não mais do que um fator 2 e incluindo casos de ambiguidades ou harmônicos, 3 indica um resultado seguro, sem ambiguidade, e por fim, 4 indica além de um resultado seguro do período de rotação que também houve a obtenção da direção do polo.

Em resumo, a análise das curvas de luz descreve basicamente três fatores importantes:

1. O número de noites usadas na determinação do período de rotação. Às vezes nem todas as noites em que o asteroide foi observado foram utilizadas, visto que algumas noites apresentaram pouca cobertura temporal, e não foram úteis para determinação do período.
2. O período de rotação determinado.
3. A ordem ou grau do ajuste da série de Fourier.

No que segue, apresentaremos as curvas de luz e os resultados para os asteroides da nossa amostra em quatro partes: primeiro, aqueles que tiveram as propriedades rotacionais e modelo de forma determinados, segundo, os que tiveram apenas o período de rotação determinado, terceiro, aqueles que apresentam indícios de um período longo ou de que as noites de observação não foram suficientes, e por último, os que apresentaram curvas de luz sem variação ou com grande dispersão. Os asteroides que passaram a ter período de rotação publicado no decorrer do desenvolvimento desta dissertação serão discutidos e comparados com os resultados obtidos a partir de nossas observações. Na seção 4.5, iremos discutir coletivamente os resultados obtidos e apresentar um resumo dos períodos de rotação e direções de polo determinados neste trabalho.

4.1 NEA com propriedades rotacionais e modelo de forma determinados

Alguns asteroides da nossa amostra foram observados ao longo de várias temporadas observacionais. Desta forma, para estes objetos contamos com curvas de luz observadas em diferentes configurações de observação, podendo aplicar o método de inversão de curvas de luz para determinar as propriedades rotacionais. A informação introduzida nos programas de inversão é resumidamente: a data de observação, o brilho do asteroide, a geometria de observação (distância do asteroide ao Sol e à Terra), o ângulo e a data de rotação inicial. Os parâmetros a serem determinados são: o período de rotação, a direção do eixo de rotação e um modelo de forma. Kaasalainen and Torppa (2001) e Kaasalainen et al. (2001) estabelecem um erro de $\pm 10^\circ$ na determinação da direção do eixo, e o erro nos valores do período sendo da ordem da última decimal fornecida.

A seguir, apresentaremos dois asteroides para os quais conseguimos, além de determinar o período de rotação com alta confiabilidade, determinar a direção do eixo de rotação e um modelo de forma. Os modelos de forma convexa são mostrados em três diferentes configurações de um referencial cartesiano centrado no asteroide, visualizando os eixos positivos X, Y e Z à esquerda, ao centro e à direita das figuras, respectivamente.

4.1.1 (348400) 2005 JF21

O asteroide (348400) 2005 JF21 do subgrupo Amor, também classificado como um PHA, tem diâmetro entre 300 e 900 metros e foi observado durante oito noites, sendo duas noites em julho, duas em setembro, duas em outubro e duas em novembro de 2015. As curvas de luz obtidas a partir das noites de julho não apresentaram cobertura suficiente para a determinação do período rotacional, porém as curvas de setembro, outubro e novembro são bastante satisfatórias, e revelaram a cobertura completa da rotação deste asteroide.

As curvas de luz para cada noite de observação é mostrada na Figura 4.1. Por outro lado, análise anterior realizada por Stephens and Warner (2016) utilizando dados observacionais obtidos em junho e agosto de 2015, indicam a possibilidade do asteroide ser binário. Em agosto, observações do radar de Goldstone relatadas por Naidu et al. (2016) confirmaram que o asteroide é parte de um sistema binário.

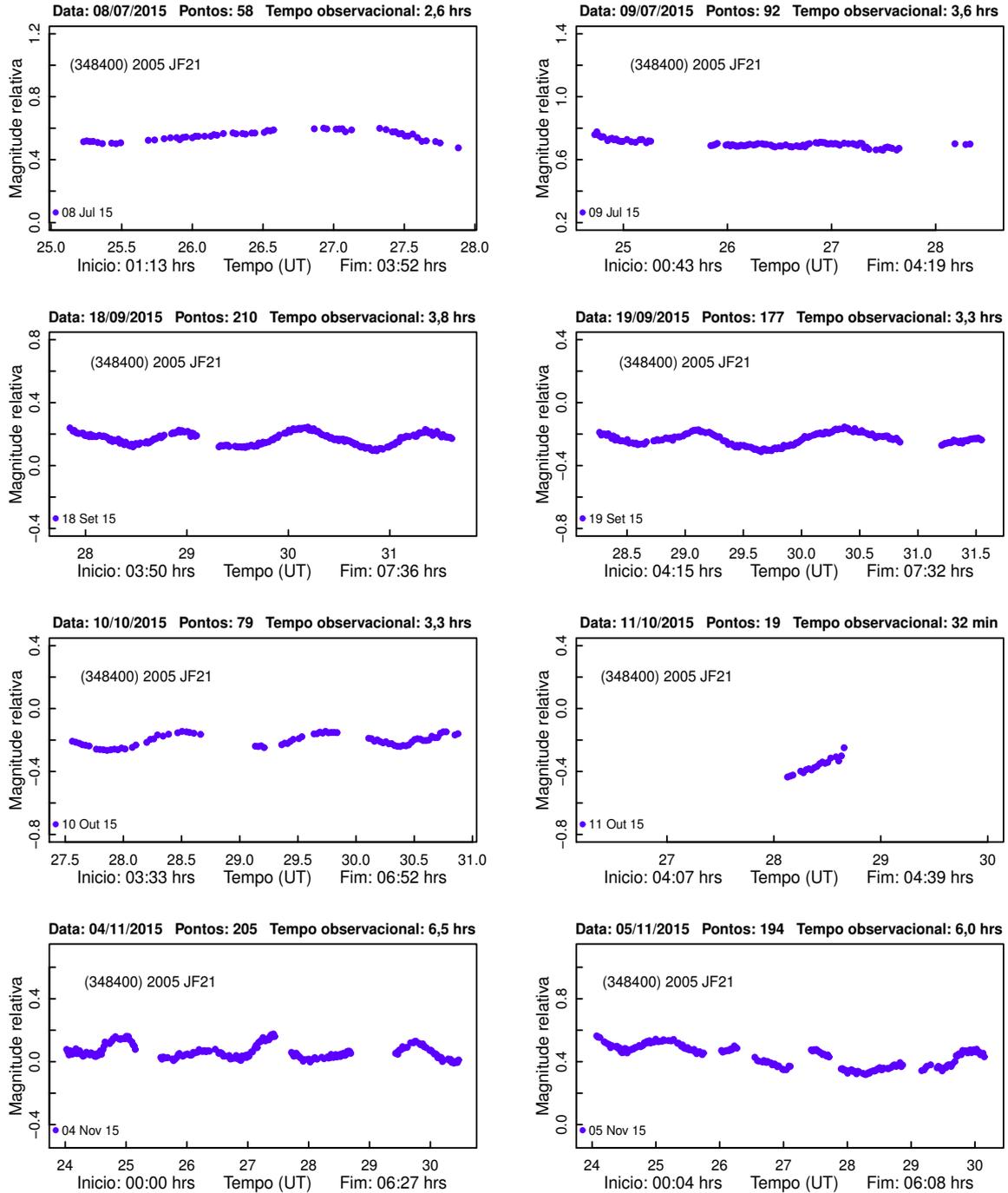


Figura 4.1: *Curvas de luz de (34840) 2005 JF21 de julho a novembro/2015.*

Realizamos três análises de Fourier, uma com as curvas de luz de setembro, uma para a noite de maior cobertura obtida em outubro e outra utilizando as noites de novembro de 2015. Em setembro ($\alpha = 68^\circ$), obtivemos uma curva de luz composta, somando cerca de 7 horas de observação, o que nos permitiu determinar um período de rotação de $2,4181 \pm 0,0005$ horas. Esta curva foi ajustada por um polinômio de grau 4 e apresenta uma dispersão relativamente baixa. A amplitude

da curva de luz é de 0,12 mag. O ajuste dado para a noite de outubro ($\alpha = 50^\circ$), forneceu um período de $2,653 \pm 0,0006$ horas com uma ordem 4. A curva de luz tem amplitude de 0,11 mag, sendo razoavelmente bem coberta pelos pontos observados. Por fim, a análise realizada com as curvas de luz obtidas no mês de novembro ($\alpha = 30^\circ$) resultou novamente um período de $2,4181 \pm 0,001$ horas. A curva de luz composta foi ajustada por um polinômio de grau 5 e tem amplitude de 0,14 mag. A variação do ângulo de fase durante o período das observações foi de 68° para 30° . Os resultados para os três ajustes são dados na Figura 4.2.

Conseqüentemente, baseado no melhor ajuste consideramos o valor de $2,4181 \pm 0,0005$ horas como bem determinado, sendo igual nos meses de setembro e novembro. Damos a este período um índice de confiança 3. Apesar da grande variação do ângulo de fase, verifica-se em todas as curvas de luz apresentadas uma amplitude muito pequena, portanto, acreditamos se tratar de um objeto de forma bastante esférica.

Stephens and Warner (2016) encontraram fracos indícios de eventos mútuos (ocultação e/ou eclipse) provocando variações na curva de luz, e ajustaram um modelo de dois períodos, como descrito em Pravec et al. (2000b), para asteroides binários. Os valores determinados para o objeto primário foram de $2,4131 \pm 0,0009$ horas para os dados obtidos em junho ($\alpha = 22^\circ$) e $2,4157 \pm 0,0007$ horas para os dados obtidos em agosto ($\alpha = 37^\circ$) de 2015, apresentando amplitudes das curvas de luz de 0,05 mag e 0,07 mag, respectivamente. O segundo melhor ajuste, utilizando os dados do mês de agosto, forneceu um período de $14,74 \pm 0,003$ horas, sendo este resultado para o objeto secundário (satélite), que segundo os autores, deve ter um período orbital em torno do primário de cerca de 14,3 horas.

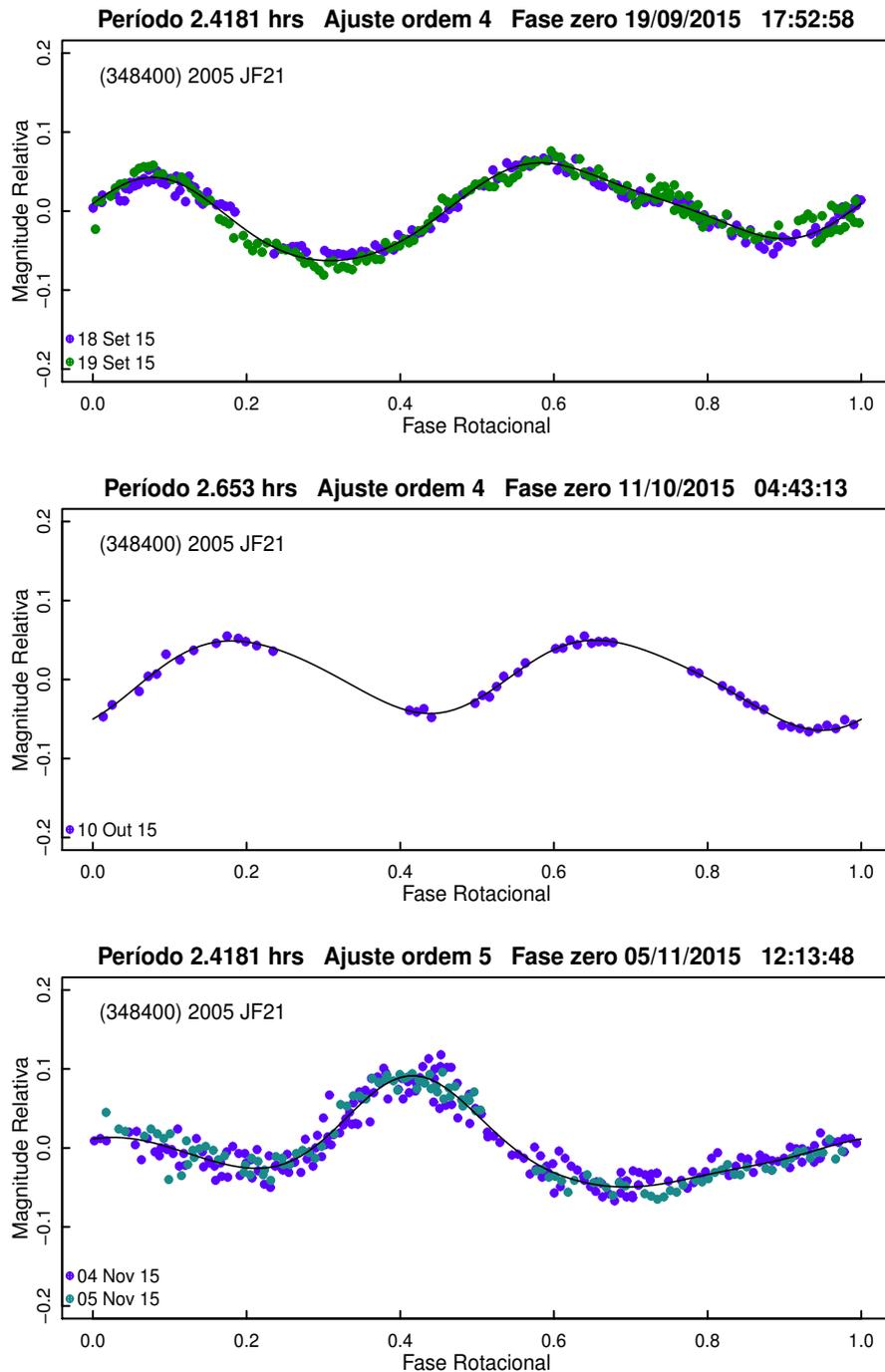


Figura 4.2: *Curvas de fase para (348400) 2005 JF21 com os dados de setembro, outubro e novembro/2015. A linha representa o melhor ajuste.*

As curvas de fase para o corpo primário e para o satélite, publicadas por Stephens and Warner (2016), são reproduzidas nas Figuras 4.3 e 4.4. A curva de luz resultante para o satélite de (348400) 2005 JF21 mostra uma constante variação de brilho, provavelmente efeito de eventos mútuos. Em consequência disto, a partir dos nossos dados obtidos em novembro/2015, tentamos reproduzir ou obter um valor para o

período do satélite, porém não obtivemos bons resultados, visto que as noites somam apenas cerca de 12 horas de observação. São necessárias mais observações deste objeto para se realizar uma análise mais robusta deste sistema.

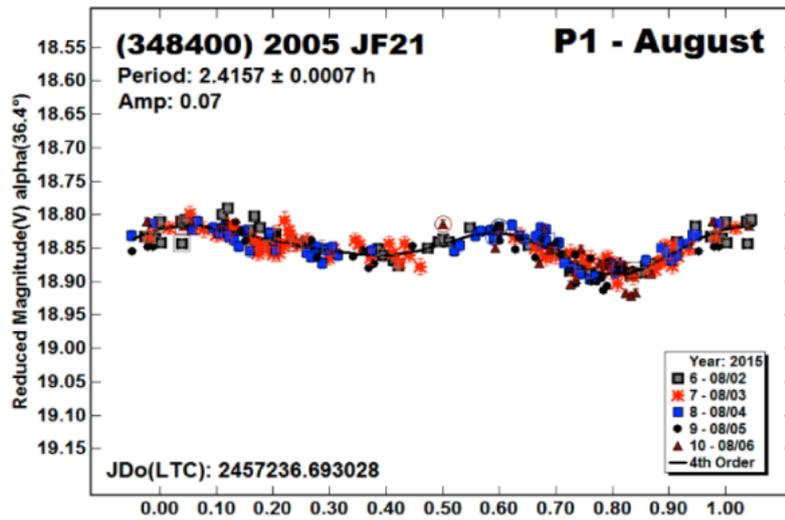


Figura 4.3: Curva de fase para (348400) 2005 JF21 retirada de Stephens and Warner (2016).

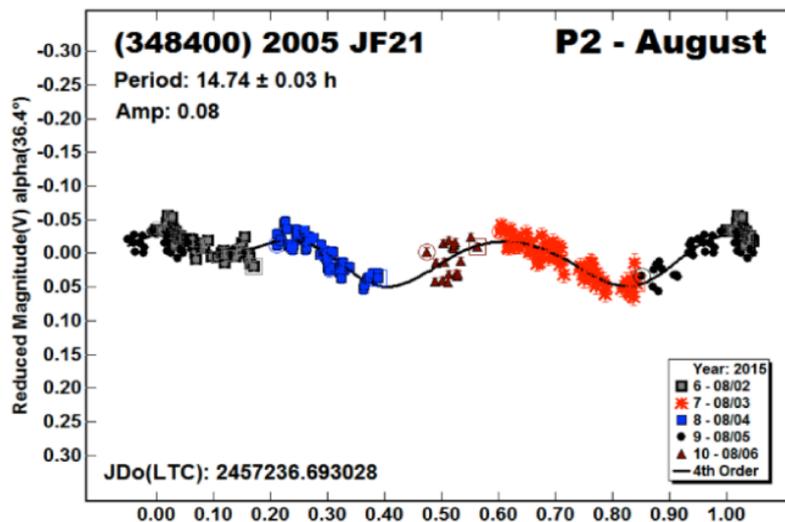


Figura 4.4: Curva de fase para o satélite de (348400) 2005 JF21 retirada de Stephens and Warner (2016).

Tendo uma boa cobertura observacional de (348400) 2005 JF21 nas três missões, aplicamos o método de inversão de curvas de luz (ICL) para determinar as propriedades rotacionais e a forma do objeto primário. A variação do ângulo de fase observada foi de 68° a 30° . Sendo assim, as propriedades rotacionais fornecidas por ICL foram de 2,415713 horas para o período, com longitude e latitude eclíptica

de $\lambda = 276^\circ$ e $\beta = -9^\circ$, respectivamente. O modelo de forma determinado para este asteroide está de acordo com as amplitudes das curvas de luz observadas. Nosso modelo está representado na Figura 4.5, e foi determinado apenas com as curvas de luz obtidas do OASI. É importante ressaltar que este modelo foi obtido utilizando apenas cinco curvas de luz, mas que apresentam uma cobertura de ângulo de fase razoável, tornando a nossa estimativa para a forma bastante aceitável. Até o momento, este objeto não conta com a sua direção do eixo de rotação e nem modelo de forma determinado, sendo esta a sua primeira determinação.

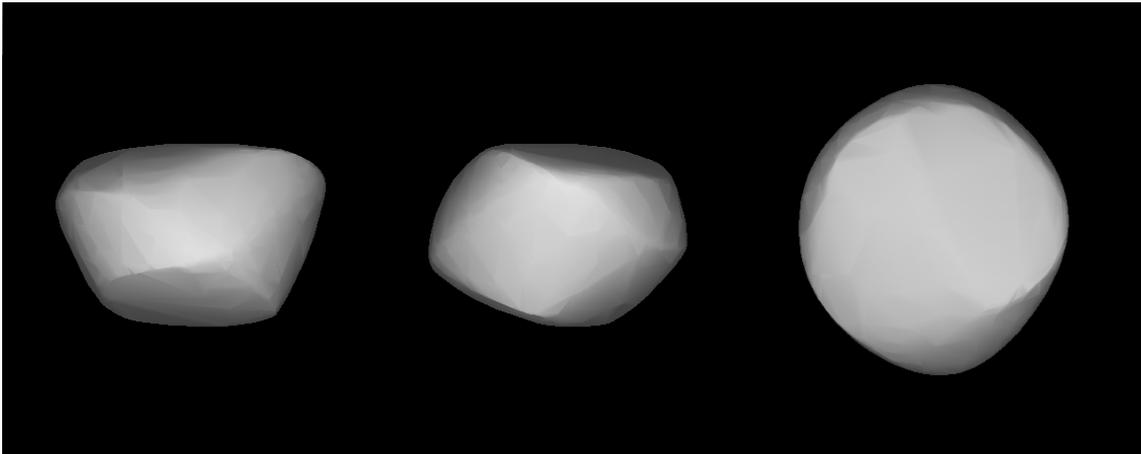


Figura 4.5: *Modelo de forma para (348400) 2005 JF21. Esta forma foi obtida utilizando apenas dados do OASI.*

4.1.2 (436724) 2011 UW158

O NEA 436724 (2011 UW158) é um asteroide potencialmente perigoso (PHA) descoberto em 25 de outubro de 2011 do Observatório Pan-STARRS em Haleakala (Havaí, EUA). Durante sua aproximação com a Terra, em 19 de julho de 2015, ele alcançou uma distância de apenas 0,0164 UA, isto é, 6,4 distâncias lunares do nosso planeta, sendo alvo de diversas observações fotométricas assim como dos grandes radiotelescópios do mundo. As imagens de radar do Observatório Arecibo (localizado em Porto Rico), revelaram um tamanho de 300 por 600 metros para este asteroide (Naidu et al., 2015).

Este NEA do subgrupo Apollo está na lista de estudo de potenciais alvos de missão humana da NASA, ou NHATS, baseado em sua órbita favorável (<http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/nhats>). Nossas observações deste objeto ocorreram antes e depois do seu encontro próximo com a Terra. Foram ao todo treze noites

de observação de (436724) 2011 UW158 correspondentes a cinco missões observacionais, sendo uma em maio, uma em junho, quatro em julho, duas em setembro e três em outubro de 2015. As curvas de luz individuais são mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7. A quantidade de noites de observação em maio e junho foram limitadas em razão das oscilações atmosféricas nos intervalos de observação do objeto.

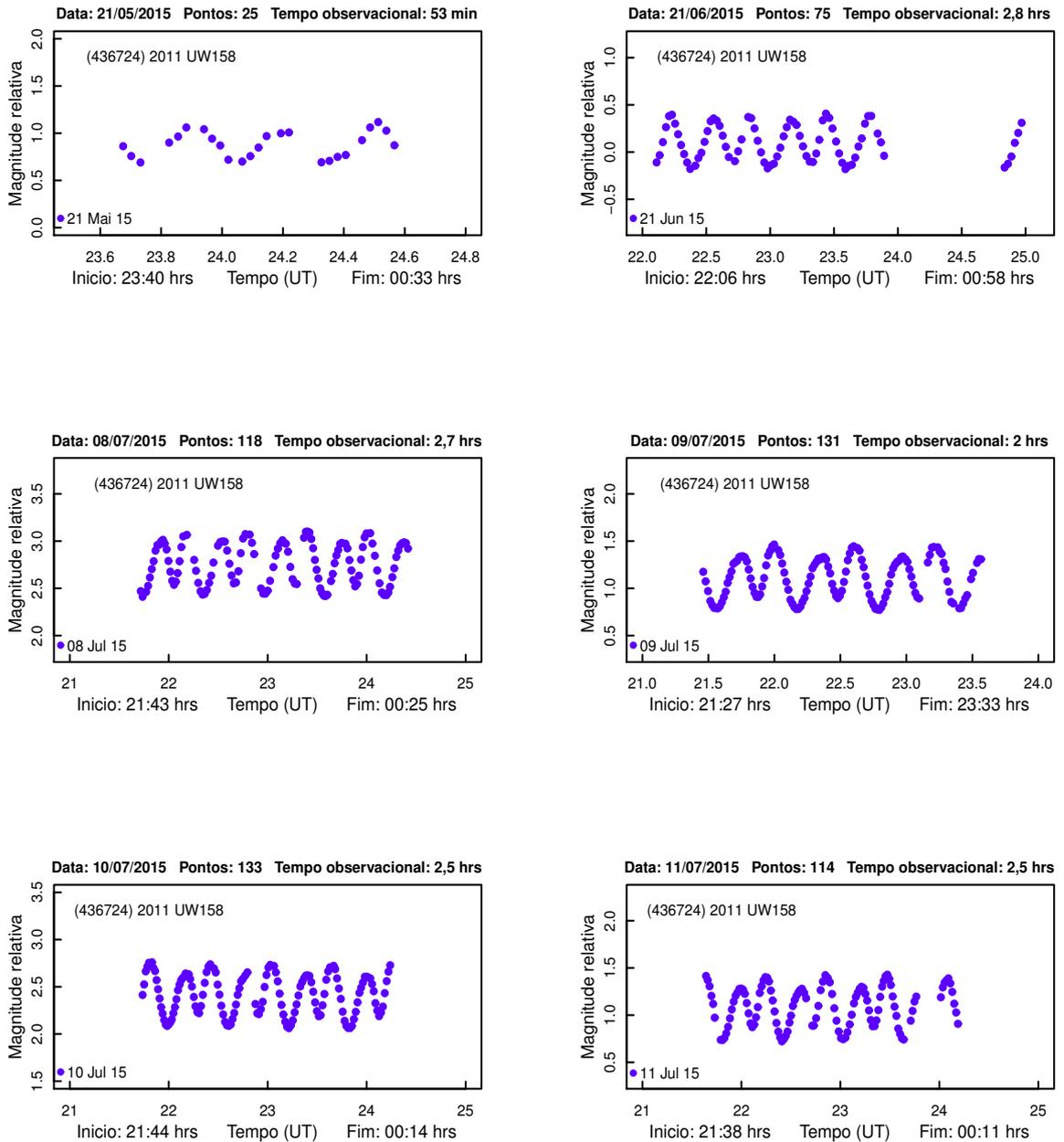


Figura 4.6: Curvas de luz de (436724) 2011 UW158 de maio, junho e julho/2015.

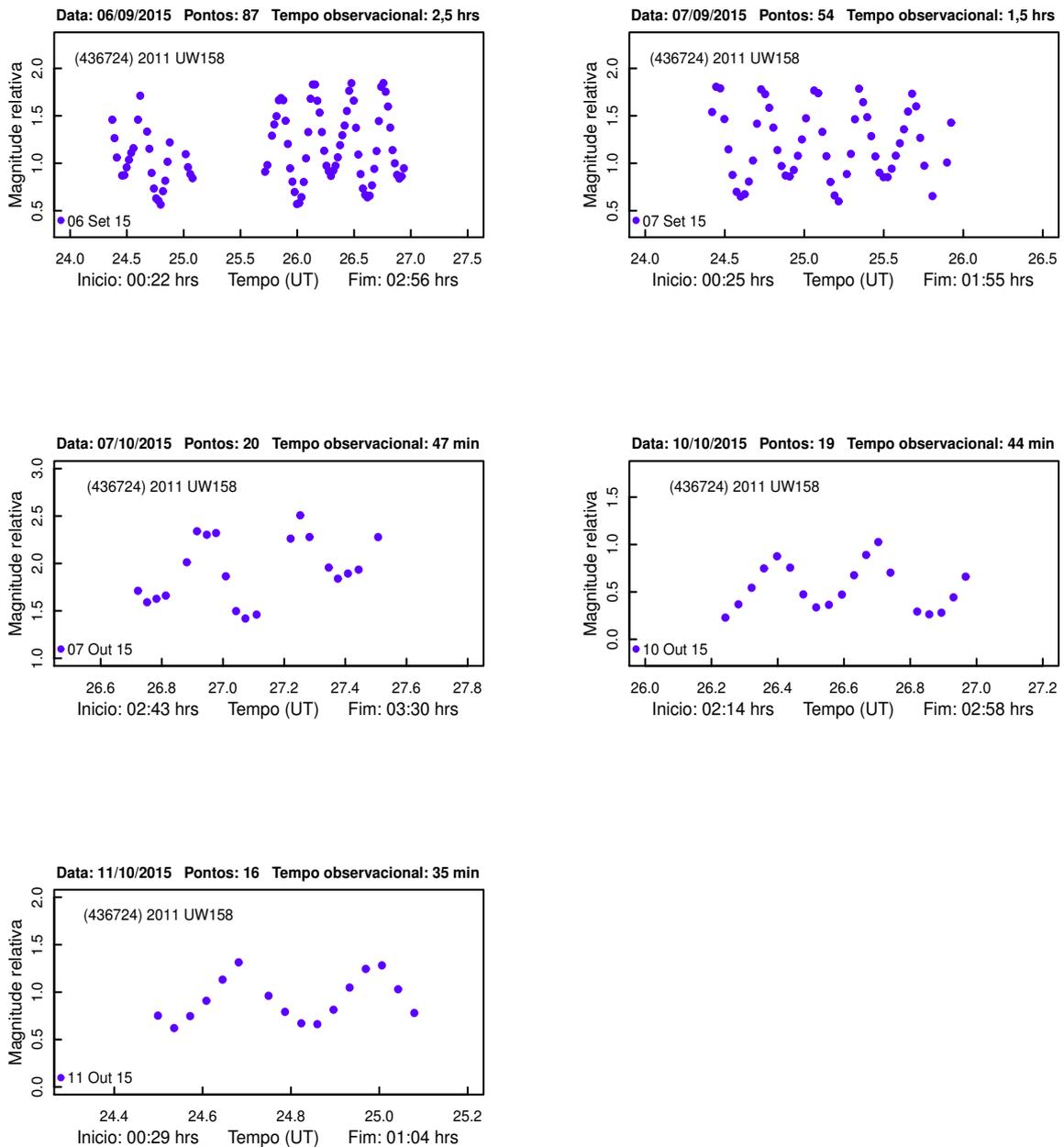


Figura 4.7: Curvas de luz de (436724) 2011 UW158 de setembro e outubro/2015.

Obtivemos uma boa cobertura temporal nas cinco temporadas de observação, sendo possível verificar uma cobertura rotacional completa em todas as noites de observação. Sendo assim, realizamos uma análise de série de Fourier para cada conjunto e os resultados encontrados foram: em maio ajustamos um período de $0,6001 \pm 0,006$ horas à única curva obtida; em junho, também para a única curva de luz observada ajustamos um período de $0,60954 \pm 0,002$ horas; em julho,

utilizamos todas as noites para compor uma ótima curva de luz da qual resultou um período de $0,61070 \pm 0,0006$ horas; em setembro, utilizamos as duas curvas e determinamos um período de $0,61076 \pm 0,004$ horas, e por fim, em outubro, utilizamos as noites dos dias 10 e 11 para determinar um período de $0,61072 \pm 0,009$ horas. Todos os melhores ajustes foram obtidos com polinômio de Fourier de ordem 5 e são mostrados nas Figuras de 4.8 a 4.9. Todas as curvas de luz apresentam baixa dispersão e as amplitudes verificadas foram de 0,41, 0,56, 0,67, 1,17 e 0,69 magnitudes, correspondentes aos ângulos de fase observados de 33° , 68° , 91° , 36° e $16,3^\circ$, para os respectivos meses observados.

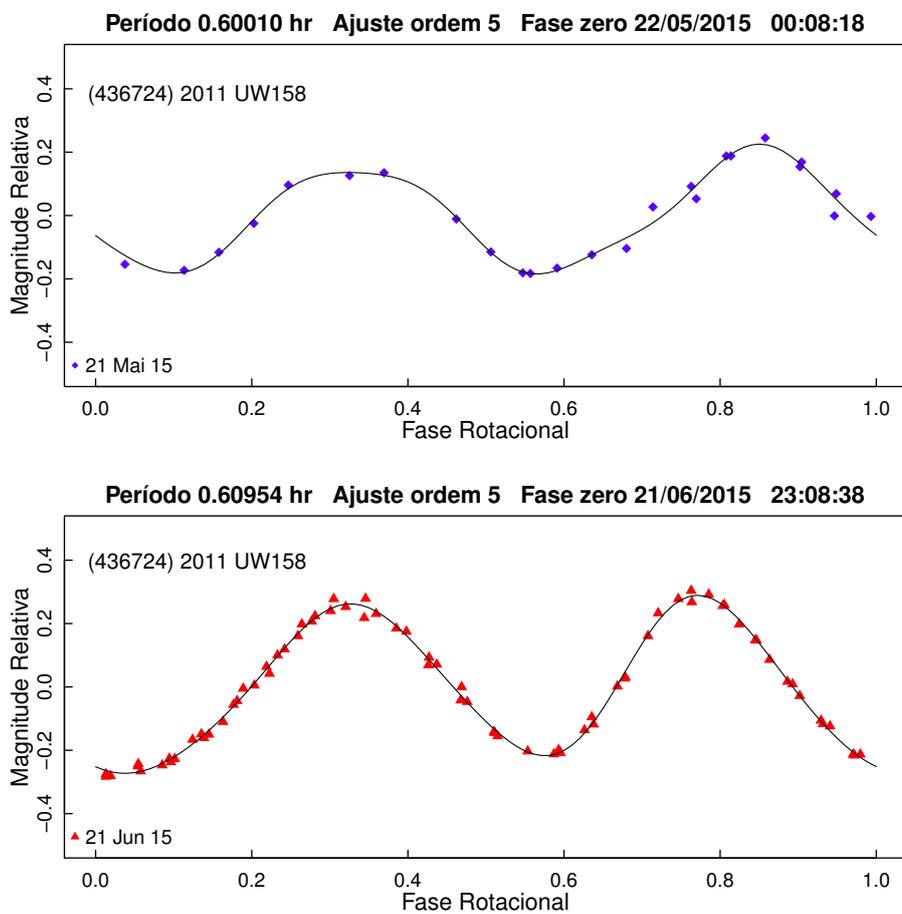


Figura 4.8: Curvas de fase para (436724) 2011 UW158 com os dados de maio e junho/2015. A linha representa o melhor ajuste.

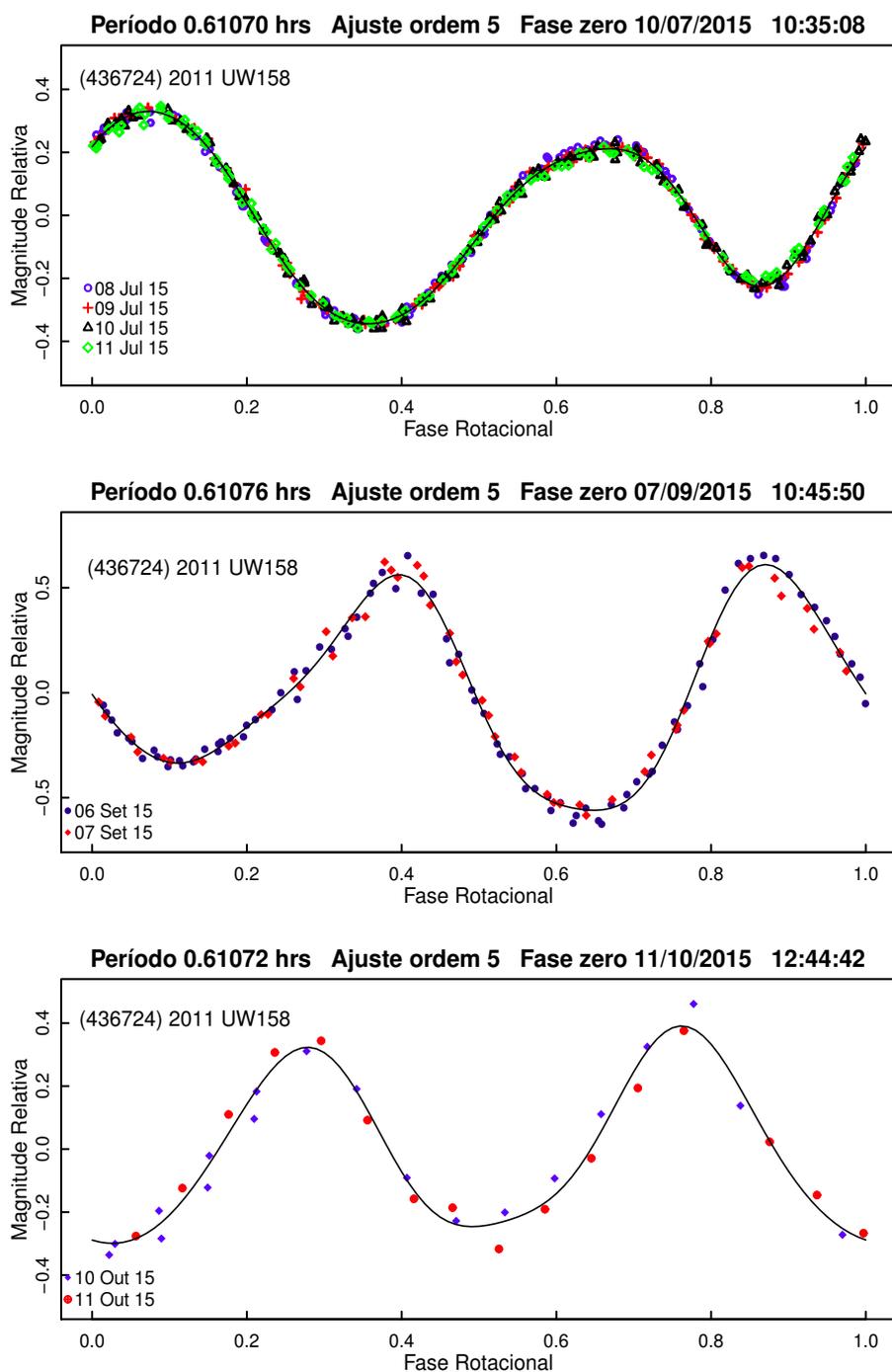


Figura 4.9: *Curvas de fase para (436724) 2011 UW158 com os dados de julho, setembro e outubro/2015. A linha representa o melhor ajuste.*

Consideramos, portanto, o melhor resultado o valor de $0,61070 \pm 0,0006$ horas baseado nos dados obtidos em julho de 2015, que se superpuseram perfeitamente na curva de luz composta com mais de 400 pontos. É importante também destacar que as curvas de luz observadas em maio e outubro, são baseadas em observações do objeto apresentando magnitude visual de 18 e 19, respectivamente, mas fornecendo

mesmo assim resultados similares aos dos outros meses.

A variação da amplitude das curvas de luz observadas é grande, e os picos dos máximos e mínimos é suave, o que concorda com um objeto bastante alongado e simétrico. Esta conclusão é baseada na amplitude de 1,17 mag verificada em nossa curva de luz de setembro/2015, a partir da qual obtivemos uma estimativa da razão entre a e b de um elipsóide triaxial de 2,95. Segundo Burns and Tedesco (1979), podemos estimar a razão a/b de um elipsóide triaxial a partir da equação 4.1, onde A é a amplitude máxima alcançada em visão equatorial, a é o raio de maior comprimento, b é o de comprimento médio e c , o de menor comprimento.

$$A = 2.5 \log\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4.1)$$

Após a determinação do período para cada conjunto de dados, aplicamos o método de inversão de curvas de luz (ICL) para determinar as propriedades rotacionais e a forma do asteroide, para tanto, usamos novamente apenas as curvas de luz obtidas com os dados do OASI, as quais apresentam uma variação do ângulo de fase de $33^\circ - 95^\circ - 16,3^\circ$. As propriedades rotacionais fornecidas por ILC foram de $0,610752 \pm 0,000001$ horas para o período, com longitude e latitude eclíptica de $\lambda = 290^\circ$ e $\beta = -19,6^\circ$, respectivamente. O modelo para a forma deste asteroide, determinado a partir das nossas observações é consistente com as imagens de radar, obtidas pelos observatórios Arecibo e Goldstone, e com as amplitudes das curvas de luz. Nosso modelo está representado na Figura 4.10 enquanto as imagens feitas pelo radar de Goldstone na Figura 4.11.

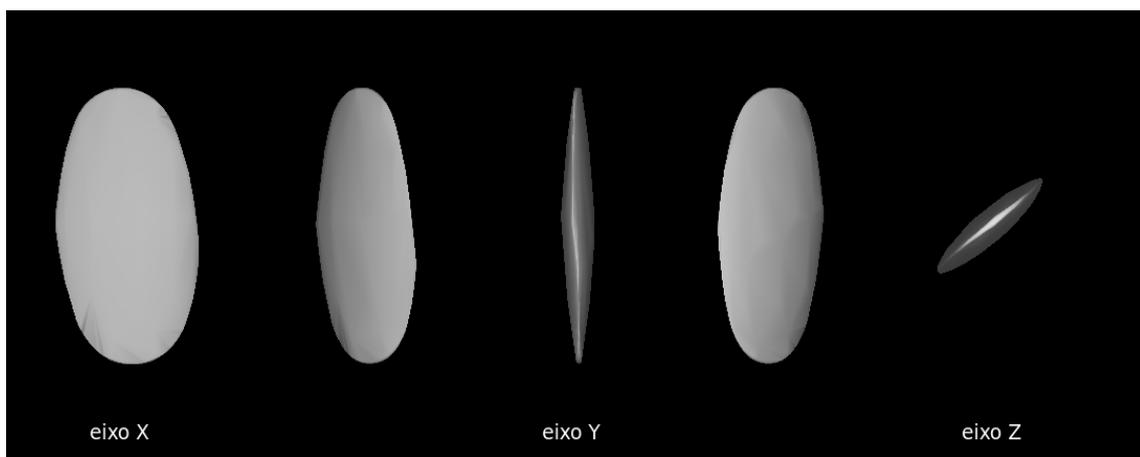


Figura 4.10: *Modelo de forma para (436724) 2011 UW158. Esta forma foi obtida utilizando apenas dados do OASI.*

Este NEA conta com algumas publicações para o seu período rotacional. Warner (2016a) a partir de observações realizadas em julho/2015 determinou um valor de $0,61069 \pm 0,00002$ horas, com amplitude da curva de luz de 0,65 mag. Gary (2016) obteve um período de $0,61073 \pm 0,00003$ horas baseado em observações realizadas em julho e agosto de 2015. Constatamos que nenhuma das observações relatadas pelos trabalhos publicados utilizaram dados obtidos em maio ou outubro, visto que o objeto apresentava-se com brilho baixo, sendo portanto, de difícil observação e sendo apenas observado do OASI.

Apenas uma única solução para a direção do eixo de rotação deste asteroide se encontra publicada até o momento. Carbognani et al. (2016) utilizando também o mesmo método de inversão, obtiveram como solução $\lambda = 290^\circ \pm 3^\circ$ e $\beta = -39^\circ \pm 2$ e um período de $0,610752 \pm 0,000001$ horas. Os resultados relatados por Carbognani et al. (2016) são baseados em 31 noites de observação realizadas entre junho e setembro de 2015, e mesmo assim, os valores encontrados por nossa análise são similares indicando a forma alongada do objeto. Portanto, o nosso resultado para as propriedades rotacionais, determinadas a partir apenas das curvas de luz obtidas do OASI é bastante satisfatório, mostrando que o método de inversão é bastante poderoso, e que fornece bons resultados mesmo com poucas curvas de luz, desde que bem espalhadas ao longo de toda a oposição.

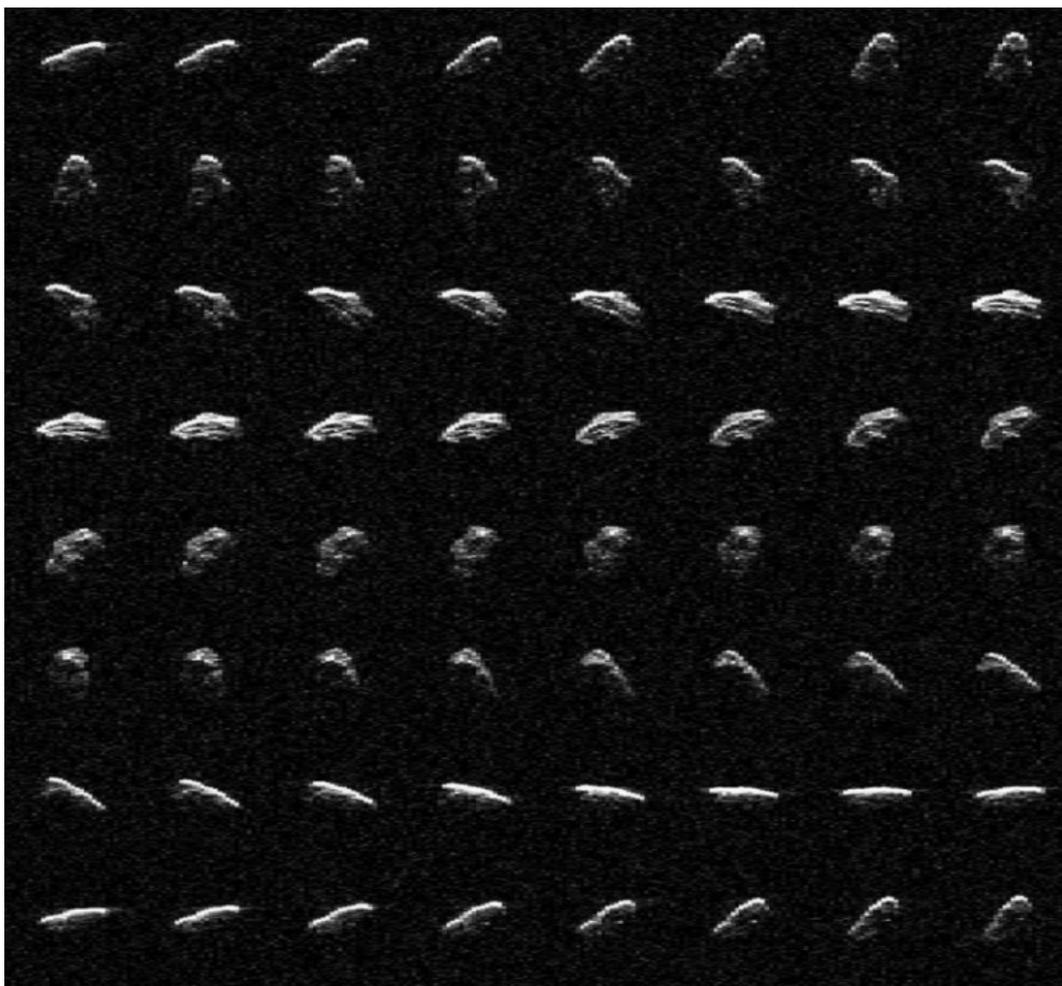


Figura 4.11: *Imagens de delay-doppler de (436724) 2011 UW158 obtidas em 18 de julho de 2015 a partir do Goldstone radar observatory, usando o instrumento DSS-14 para transmitir e o Green Bank Telescope (GBT) para receber. A resolução é de $7,5 \text{ m} \times 5 \text{ Hz}$. Fonte: <http://echo.jpl.nasa.gov/>*

4.2 NEA com período de rotação determinados

Nesta seção, são apresentados 24 asteroides para os quais foi possível determinar o período de rotação com índices de confiança 2 ou 3. Muitos desses objetos foram observados ao longo de duas ou mais temporadas observacionais, mas devido às condições meteorológicas adversas ou problemas técnicos, não foi possível determinar a direção de polo e a forma. Contudo, para alguns destes asteroides descrevemos suas possíveis formas a partir da análise da forma e da amplitude da curva de luz obtida. Ressaltamos que os parâmetros orbitais, diâmetro e magnitude absoluta dos asteroides estudados foram dados na Tabela 3.3 e as circunstâncias observacionais na Tabela 3.4.

4.2.1 (31221) 1998 BP26

Este asteroide do subgrupo Amor foi observado apenas na missão de março de 2016. Foram três noites de observação, e todas elas com condições atmosféricas desfavoráveis. As observações contém muito ruído e algumas lacunas causadas por variações nas condições atmosféricas e outras por conta de um campo com muitas estrelas. Por motivo de uma dessas interrupções, as estrelas de comparação da noite do dia 2 de março mudaram, e devido a este fato, temos duas curvas de luz para esta mesma noite. As curvas de luz são dadas na Figura 4.12. Ao realizar uma inspeção visual destas curvas, percebemos que não foi possível cobrir o período de rotação completo numa só noite, mas também verificamos que temos indícios de máximos e mínimos capazes de nos fornecer um bom período de rotação.

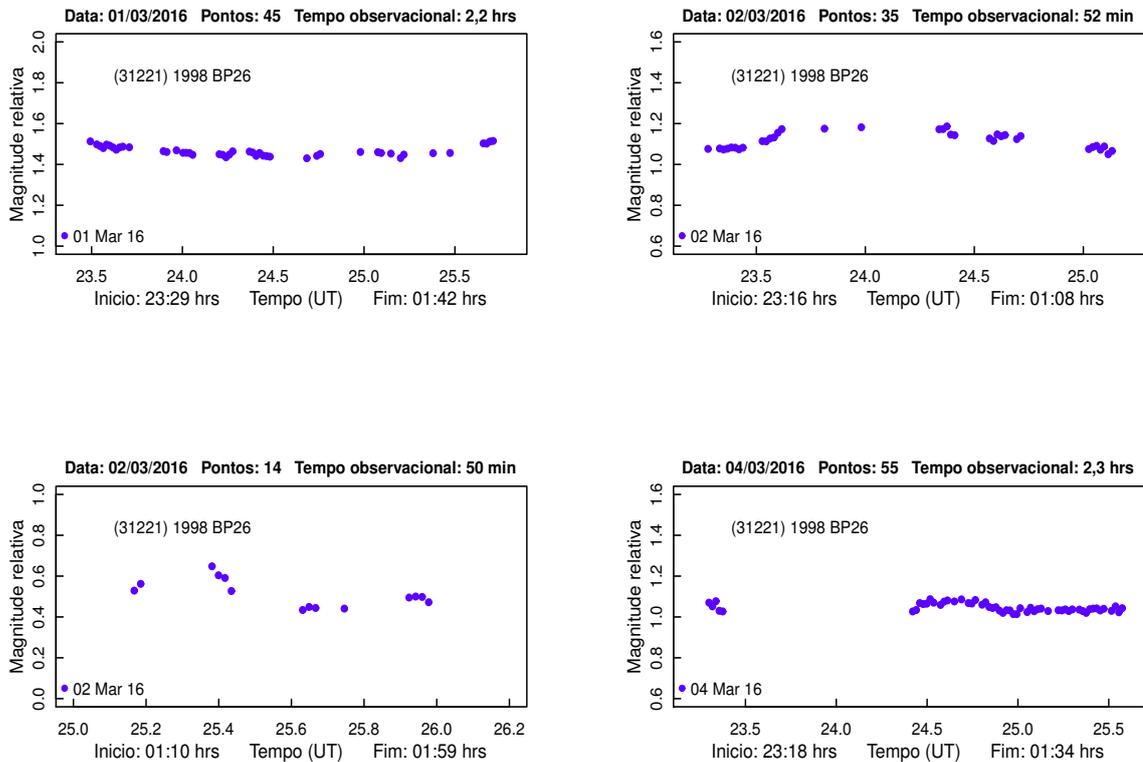


Figura 4.12: *Curvas de luz de (31221) 1998 BP26.*

Obtivemos uma curva de luz composta relativamente boa com estas três noites, somando cerca de 6 horas de observação. Na Figura 4.13 é mostrada a curva de fase composta com a curva que se ajusta a um período de $2,444 \pm 0,002$ horas. A curva de luz é bastante irregular e tem amplitude de aproximadamente

0,14 mag, o que pode indicar um objeto arredondado e com irregularidades na superfície, ou que foi observado em um ângulo de aspecto próximo da nossa linha de visada. Esta curva tem dispersão relativamente alta, e foi ajustada por um polinômio de Fourier de grau 6. Como pode ser notado, a curva apresenta uma enorme irregularidade, mas é possível distinguir um máximo com uma longa duração e outro mais fino, mostrando uma possível característica da superfície deste asteroide. Atribuímos um índice de confiança 3 ao período encontrado.

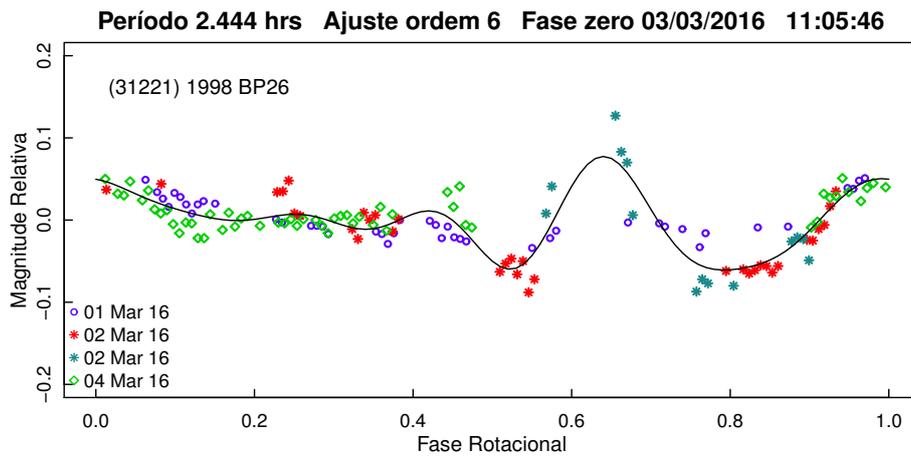


Figura 4.13: *Curva de fase para (31221) 1998 BP26 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

Nosso resultado coincide com o valor publicado por Hergenrother and Whiteley (2009), que encontrou um período de $2,44 \pm 0,01$ horas utilizando dados obtidos em duas noites de fevereiro de 2007. A curva de luz publicada por Hergenrother and Whiteley (2009) é reproduzida na Figura 4.14 e também apresenta uma forma bastante irregular e de baixa amplitude. O ângulo de fase das nossas observações foi em torno de $41,6^\circ$, enquanto o de Hergenrother and Whiteley (2009) foi de $6^\circ - 8^\circ$, o que reforça a possibilidade de uma forma arredondada e irregular do asteroide, visto que as amplitudes se mantiveram na ordem de 0,1.

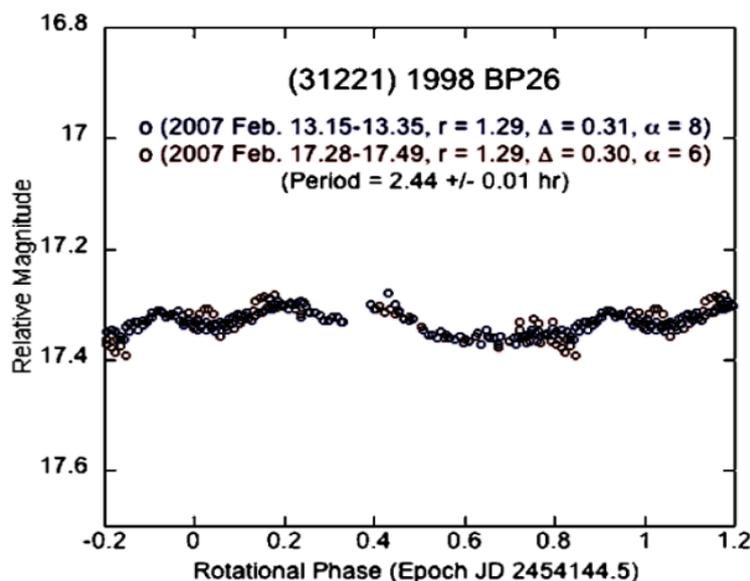


Figura 4.14: Curva de fase para (31221) 1998 BP26 retirada de Hergenrother and Whitley (2009).

4.2.2 (52381) 1993 HA

O NEA (52381) 1993 HA do subgrupo Amor é um dos objetos mais pesquisados da nossa amostra. Ele foi sugerido pela Dra. Antonella Barucci, do Observatório de Paris, a principal pesquisadora da missão MarcoPolo-R (<http://www.lesia.obspm.fr/La-mission-MarcoPolo-R.html>), cujo objetivo principal era o retorno de amostras de um NEA primitivo. A missão, inicialmente selecionada como parte do programa *Cosmic Vision* da Agência Espacial Européia (ESA) acabou não sendo aprovada. Uma nova proposta está sendo encaminhada à ESA dentro de uma nova chamada. A sugestão dada por Barucci, durante sua passagem pelo Observatório Nacional em novembro de 2015, foi para que obtivéssemos cores, para confirmar que se trata de um asteroide primitivo do tipo D, e também o período rotacional até então desconhecido. Segundo a pesquisadora, este objeto seria o melhor alvo para a nova missão. Foi dentro deste contexto que o NEA (52381) 1993 HA foi adicionado às nossas observações.

As observações ocorreram durante a missão de dezembro de 2015, quando o objeto apresentava um brilho fraco e próximo do nosso limite observacional. O objeto foi observado por duas noites, somando cerca de 10 horas de acompanhamento. Em razão do fato das noites não serem fotométricas e do brilho fraco, não pudemos observar em diferentes filtros para obtenção das cores, mas conseguimos determinar o período rotacional com uma boa precisão. As curvas de luz individuais são mostradas na Figura 4.15, e ao inspecioná-las, percebemos que na primeira noite

coberimos mais do que um ciclo completo de rotação, enquanto que na noite seguinte, temos uma lacuna a qual nos impediu de observar novamente uma rotação completa.

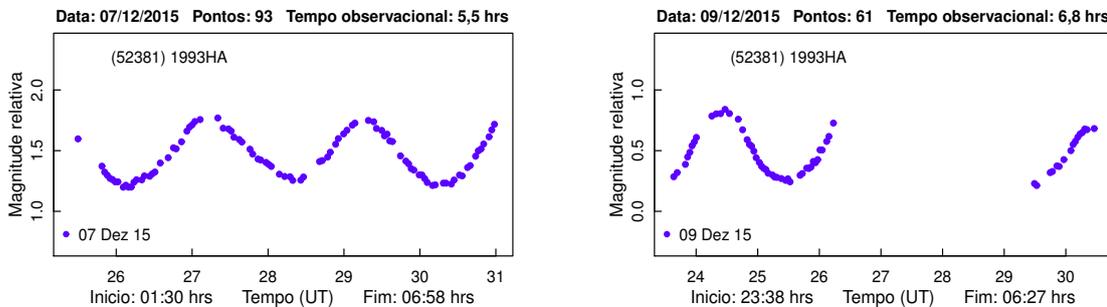


Figura 4.15: *Curvas de luz de (52381) 1993 HA obtidas a partir de observações realizadas em dezembro/2015.*

A partir destas observações, obtivemos uma boa curva de luz composta que nos permitiu determinar um período de $4,107 \pm 0,002$ horas com índice de confiança 3. A curva de luz de (52381) 1993 HA tem amplitude de 0,58 mag, baixa dispersão e foi ajustada por um polinômio de grau 4. Os máximos e mínimos estão bem definidos e as duas noites se superpõem muito bem ao formar a curva de luz composta. A variação da curva de luz indica que este é um dos objetos mais alongados e simétricos que estudamos, o que concorda com a estimativa da razão a/b de um elipsóide triaxial de 1,71, calculado por meio da equação 4.1. Na Figura 4.16 está apresentada a nossa solução para o período rotacional deste NEA, para o qual não encontramos nenhum registro publicado, sendo o nosso resultado a sua primeira determinação. Este resultado, foi incluído num artigo sobre as propriedades físicas de dois NEA possíveis alvos de missões espaciais, que acaba de ser submetido para publicação (Perna et al., 2016).

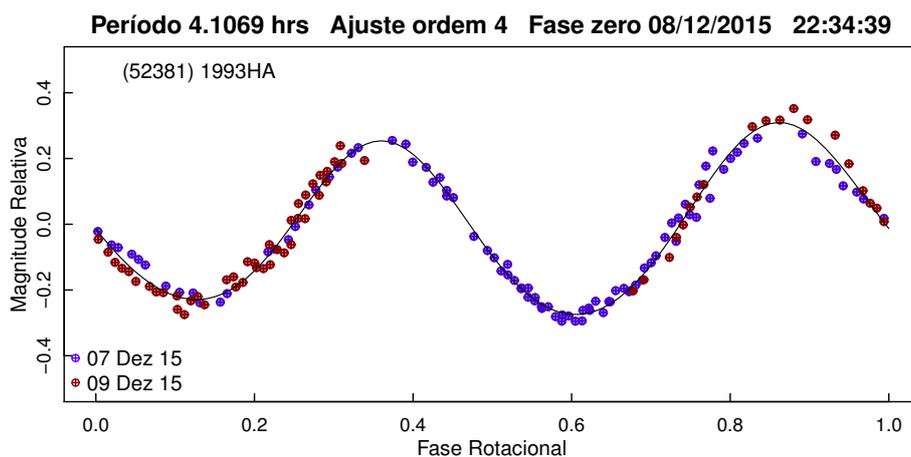


Figura 4.16: Curva de fase para (52381) 1993 HA utilizando as observações de dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.3 (68278) 2001 FC7

O NEA (68278) 2001 FC7, integrante do subgrupo Amor, foi observado numa única noite em 10 de setembro de 2015, durante aproximadamente 5 horas. Apesar do objeto apresentar um fraco brilho na época da observação ($V = 17,9$), conseguimos verificar em sua curva de luz uma variação irregular de um ciclo completo de rotação. A curva de luz deste objeto é mostrada na Figura 4.17.

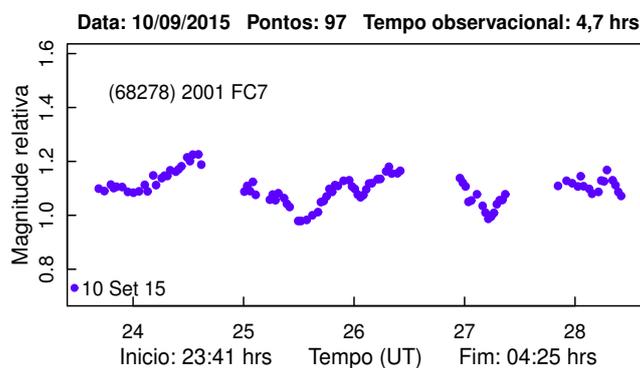


Figura 4.17: Curvas de luz do asteroide (68278) 2001 FC7.

A curva de luz apresenta muito ruído e regiões carentes de pontos, estas últimas ocasionadas por paralizações devido à variações nas condições atmosféricas. Mesmo assim foi possível determinar um período de $4,230 \pm 0,002$ horas. A curva de luz foi ajustada por um polinômio de grau 7 e tem uma amplitude de 0,22 mag. A curva de luz apresenta irregularidades sendo que o período correto pode ser um pouco diferente do aqui determinado, por isso demos um índice de confiança 2. Não existe até o momento um valor de período publicado para (68278) 2001 FC7, sendo esta sua primeira determinação. O resultado do ajuste é apresentado na Figura 4.18.

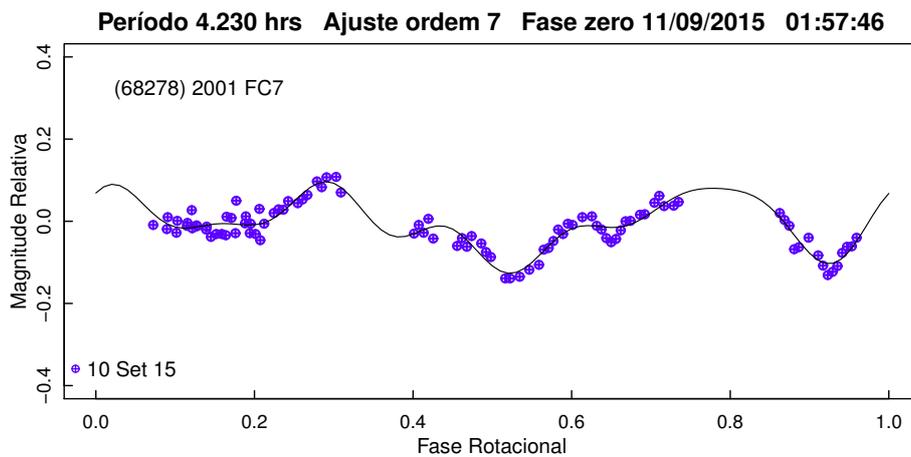


Figura 4.18: Curva de fase para (68278) 2001 FC7 onde a linha representa o melhor ajuste.

4.2.4 (88263) 2001 KQ1

(88263) 2001 KQ1 tem diâmetro de 5,31 km e pertence aos Amor. Tem uma das órbitas mais inclinadas da nossa amostra, com $i = 38,8^\circ$, e uma das maiores excentricidades, com $e = 0,43$. Sua observação se deu em seis noites, sendo três em novembro e três em dezembro de 2015. Em cada temporada totalizamos cerca de 10 horas de observação. O movimento do asteroide foi bastante rápido nas duas temporadas, e por este motivo, nas noites de 6 de novembro, 10, 11 e 12 de dezembro, não conseguimos ter as mesmas estrelas de comparação durante toda a noite de observação, sendo necessário dividir tais noites em várias partes. As curvas de luz estão dadas nas Figuras 4.19 e 4.20.

Utilizamos as noites de cada temporada observacional, novembro e dezembro, para determinar o valor do período rotacional do asteroide. Nossos resultados são

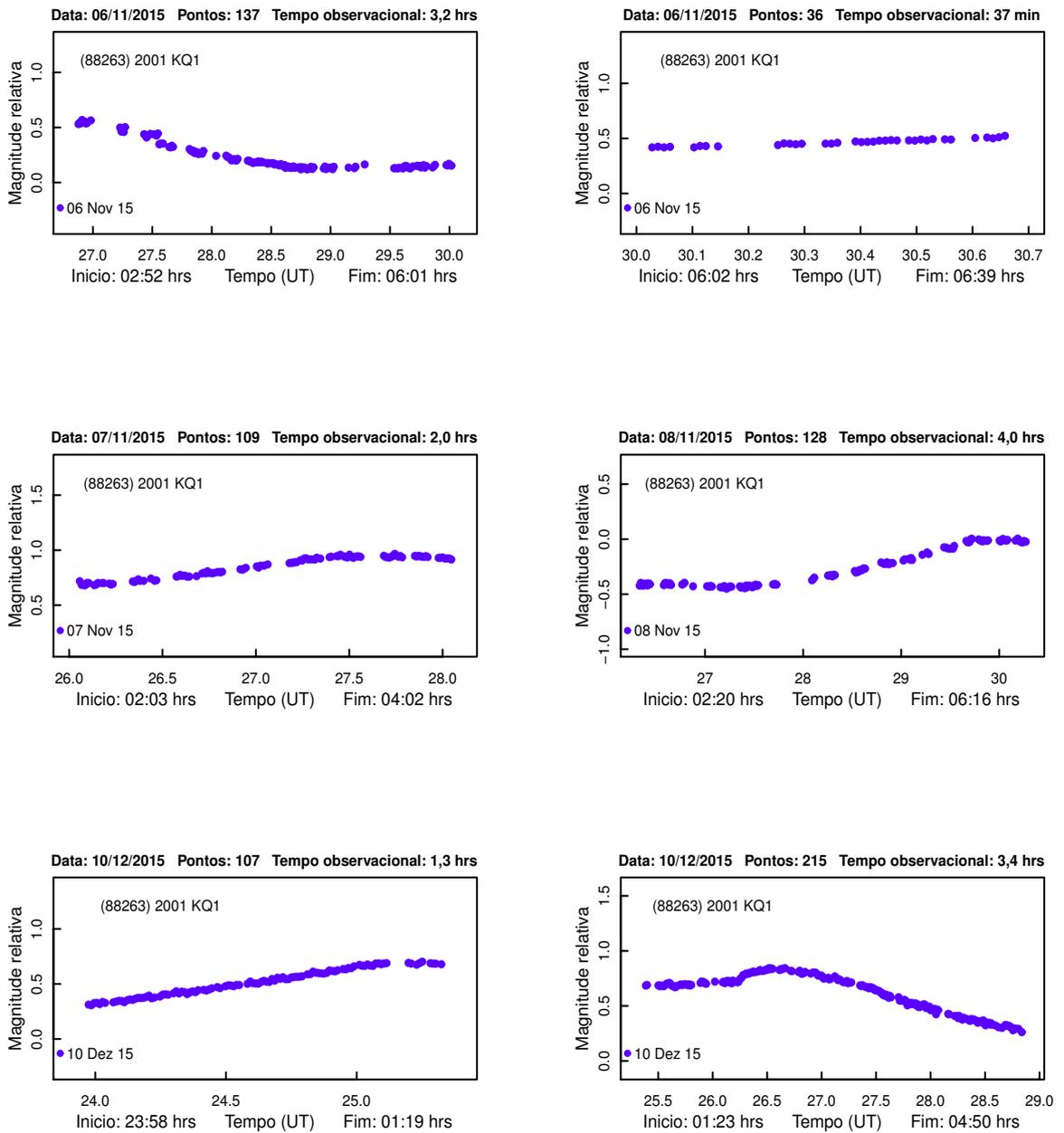


Figura 4.19: *Curvas de luz de (88263) 2001 KQ1 obtidas a partir das observações realizadas em novembro e dezembro/2015.*

mostrados na Figura de 4.21.. O melhor ajuste obtido com as curvas de novembro, foi através de um polinômio de grau 6, do qual resultou um período de $10,2480 \pm 0,0005$ horas com dispersão baixa, mas apresentando uma cobertura incompleta da rotação. Com as curvas de dezembro, compomos uma curva de luz ajustada por um polinômio de grau 5, com período de $10,344 \pm 0,001$ horas. Esta última curva

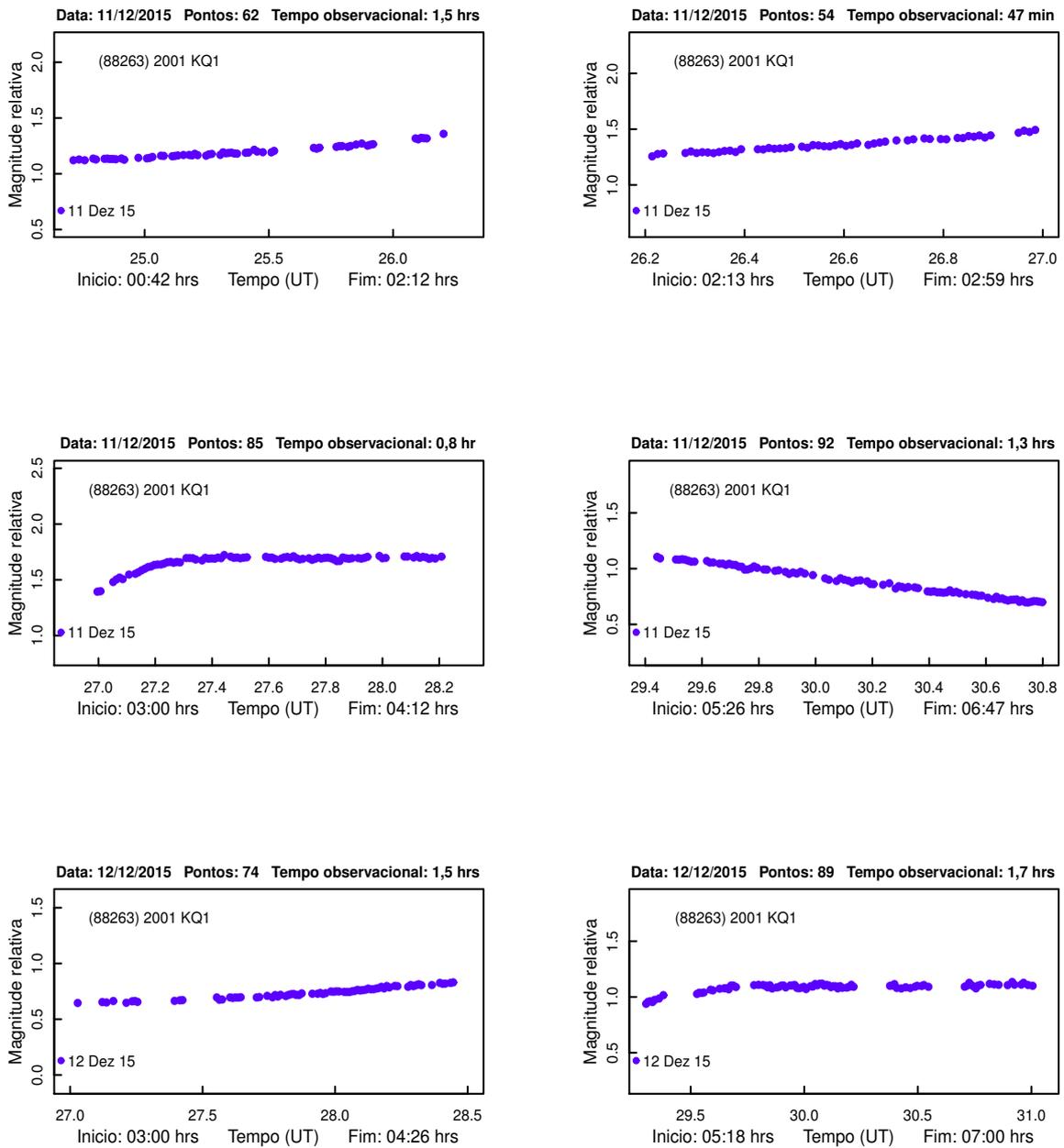


Figura 4.20: *Curvas de luz de (88263) 2001 KQ1 obtidas a partir das observações realizadas em dezembro/2015.*

tem superposição razoável, porém, assim como o resultado de novembro, apresenta uma cobertura ainda incompleta. Portanto, acreditamos que o período possa ser em até 30% maior do que o apresentado por estas soluções, e por isso demos um índice 2 de confiança ao último período estimado.

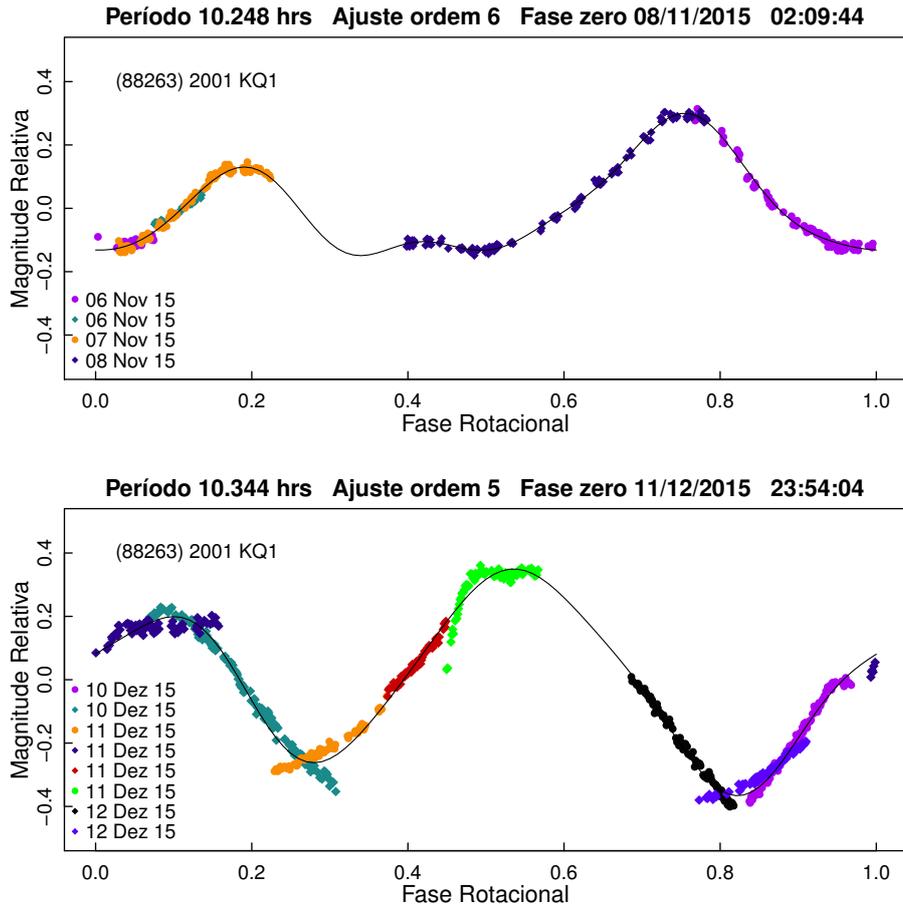


Figura 4.21: *Curvas de fase para (88263) 2001 KQ1 com os dados de novembro e dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

Até o momento, apenas uma curva de luz foi publicada para este NEA. Warner (2016b) obteve um valor de $13,16 \pm 0,01$ horas a partir de 8 noites de outubro de 2015. Sua curva de fase, mostrada na Figura 4.22, tem amplitude de 0,51 mag, enquanto a nossa de dezembro tem uma variação de 0,71 mag. Esta diferença verificada nas amplitudes, provavelmente é resultado da mudança na geometria de observação, pois enquanto Warner (2016b) utilizou dados observacionais obtidos em um ângulo de fase de $38,1^\circ$, a nossa curva de dezembro tem dados obtidos com ângulo de 49° . Estes valores de amplitude indicam se tratar de um objeto com forma bastante alongada. Finalmente, consideramos a solução estabelecida por Warner (2016b) como o período mais correto, pois apresenta uma melhor cobertura da rotação.

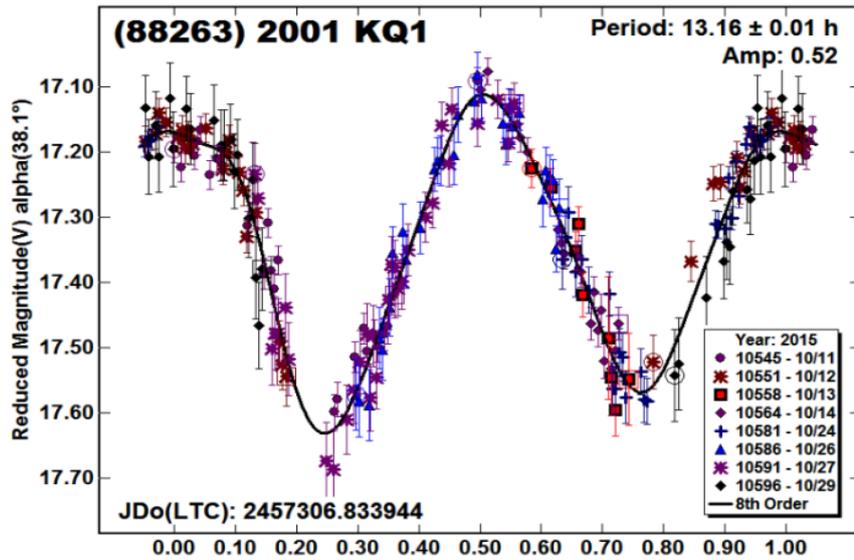


Figura 4.22: Curva de fase para (88263) 2001 KQ1 retirada de Warner (2016b).

4.2.5 (138847) 2000 VE62

Este NEA dos Amor foi observado nas temporadas observacionais de março, abril e maio de 2016. Foram quatro noites de observação em cada temporada, porém, em razão das condições meteorológicas e de campos repletos de estrelas, a quantidade de noites aproveitadas foi muito menor. Assim, temos ao todo 5 noites que somam um total de aproximadamente 12 horas de observação. Ao longo desse período de observação a mudança do ângulo de fase foi de apenas 3° . A noite do dia 12 de março foi dividida em duas partes em razão da mudança do campo de observação. As curvas de luz individuais estão dadas na Figura 4.23.

Como descrito acima, o ângulo de fase permaneceu praticamente constante durante os meses de observação, e por isso, decidimos utilizar todas as noites para realizar a procura do período de rotação. O melhor ajuste forneceu um período de $6,469 \pm 0,002$ horas para este objeto. A curva de luz composta tem amplitude de 0,36 mag, dispersão moderada e foi ajustada por um polinômio de grau 5. Os máximos e mínimos estão definidos e todas as noites se superpõem relativamente bem. Um aspecto importante da curva é que seus máximos são bem diferentes, sendo um arredondado e outro com dupla elevação, o que indica uma possível irregularidade da superfície deste asteroide. Nosso resultado é mostrado na Figura 4.24. (138847) 2000 VE62 não tem período publicado na literatura, sendo a nossa solução a sua primeira determinação. Damos um índice de confiança 3 ao valor determinado.

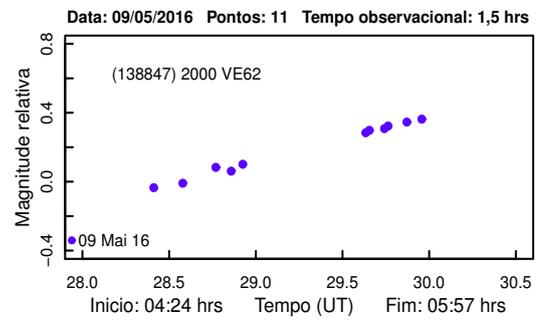
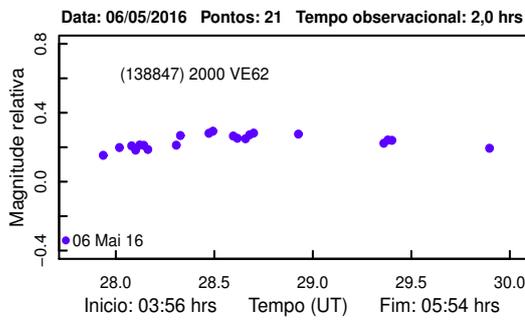
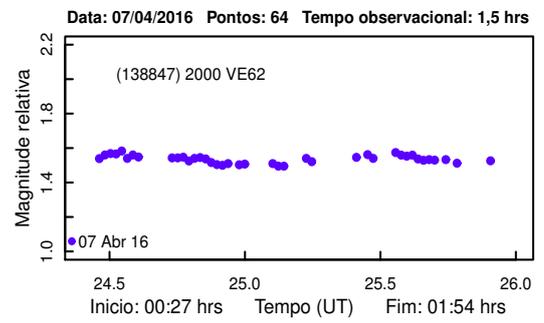
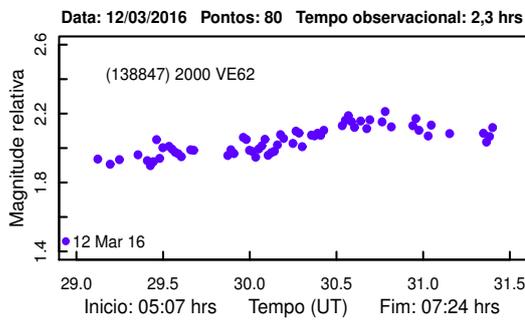
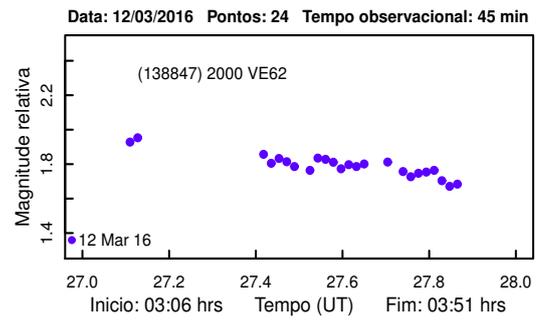
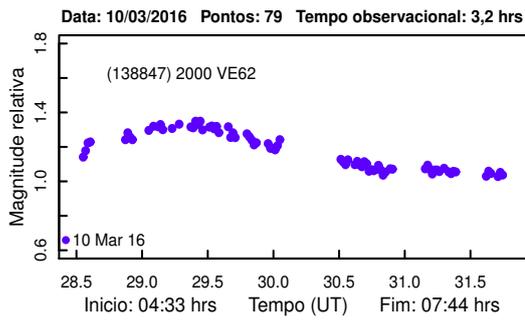


Figura 4.23: Curvas de luz de (138847) 2000 VE62 obtidas a partir das observações realizadas em março, abril e maio/2015.

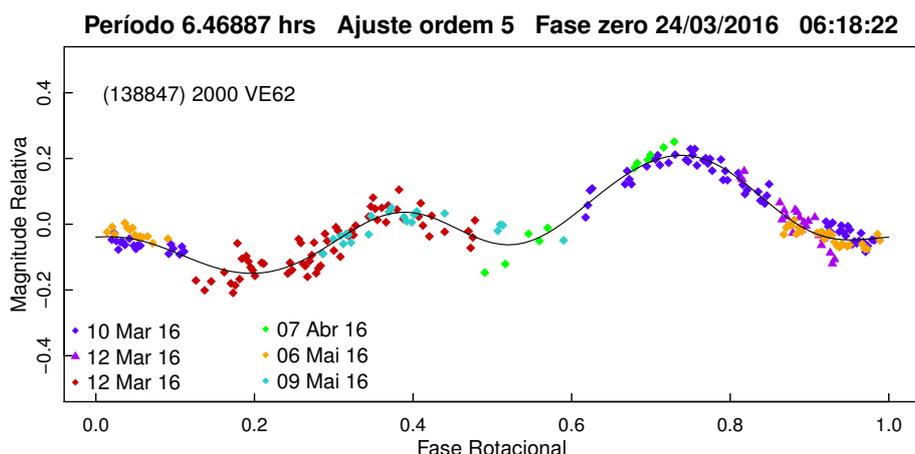


Figura 4.24: Curva de fase para (138847) 2000 VE62 utilizando as observações de março, abril e maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.6 (141354) 2002 AJ29

(141354) 2002 AJ29 do subgrupo Amor é um dos NEA mais excêntricos da nossa amostra, com $e = 0,45$. Esse objeto foi observado nas temporadas de março, abril e maio de 2016, somando 8 noites de observação, todas elas com interrupções por causa tanto das variações atmosféricas como da passagem do asteroide muito próximo de estrelas do campo. Em razão das paralizações durante as observações não conseguimos ter as mesmas estrelas de comparação em algumas noites, e por este motivo, as noites dos dias 5 e 6 de março foram divididas em duas partes e a do dia 5 de abril em três partes. As curvas de luz individuais são apresentadas nas Figuras 4.25 e 4.26.

As observações deste asteroide em março, somam aproximadamente 17 horas de observação, enquanto que nos meses consecutivos tivemos uma cobertura bastante inferior. Utilizamos apenas as curvas de luz de março para a determinação do período rotacional deste asteroide. A Figura 4.27 mostra a curva que se ajusta a um período longo de $10,7880 \pm 0,0005$ horas. As noites se superpõem bem para formar uma curva de luz composta com baixa dispersão e ajustada por um polinômio de Fourier de grau 6. Esta curva de luz composta tem amplitude de cerca de 0,31 mag e apresenta uma forma bastante particular, com máximos mais amplos e arredondados do que os mínimos, sendo estes últimos mais finos e menos duradouros, possivelmente sendo ocasionado por um objeto de forma bastante oblata. O período determinado recebeu um índice de confiança 3. Até o momento,

(141354) 2002 AJ29 não possui período de rotação publicado.

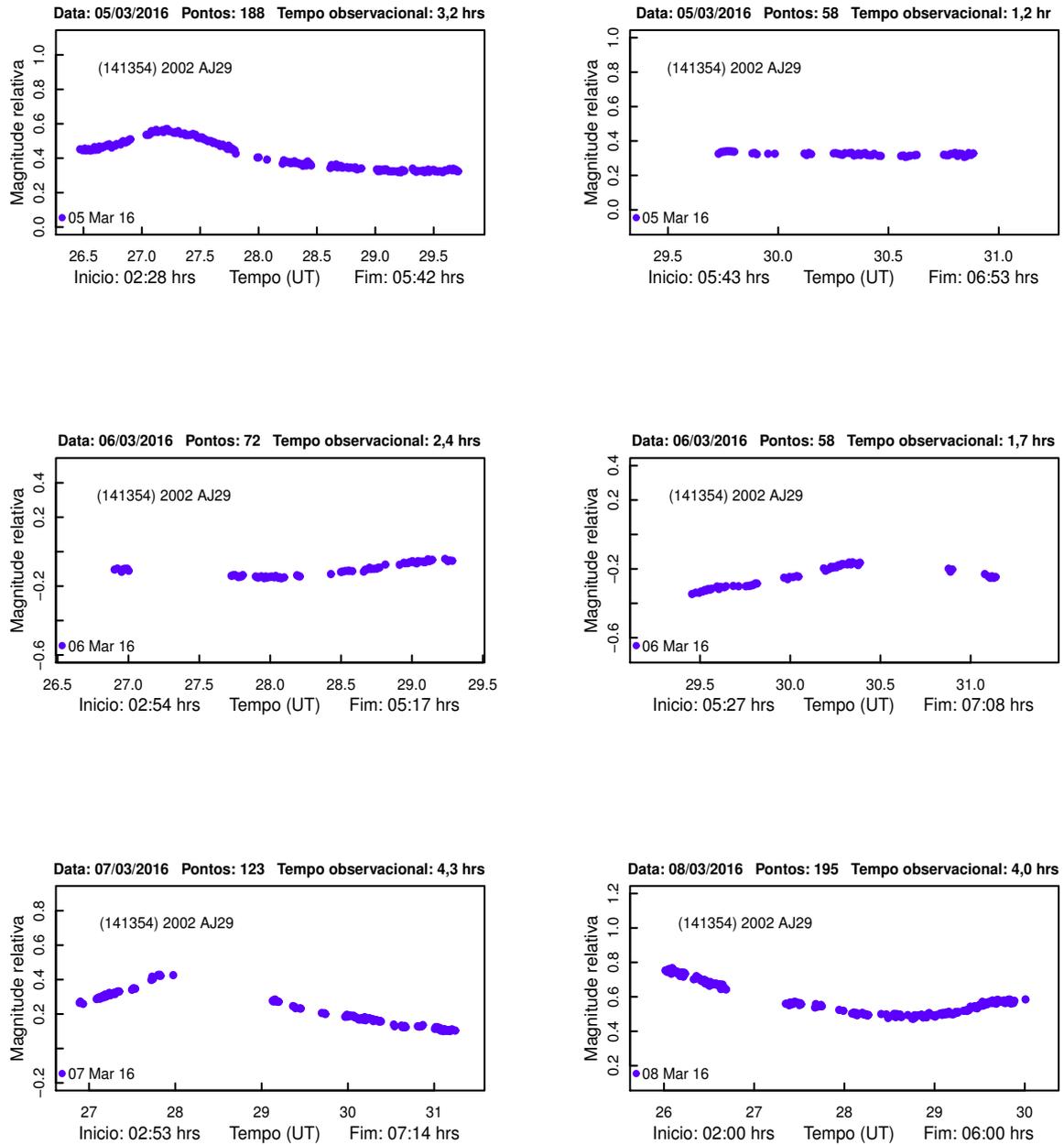


Figura 4.25: *Curvas de luz de (141354) 2002 AJ29 obtidas a partir das observações realizadas em março/2016.*

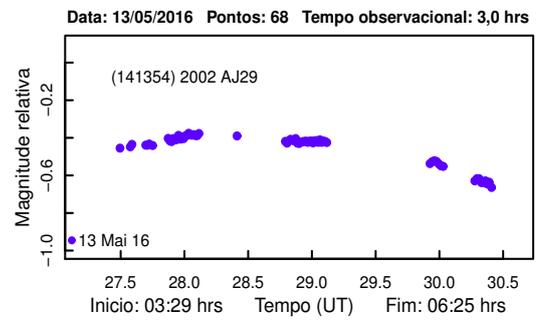
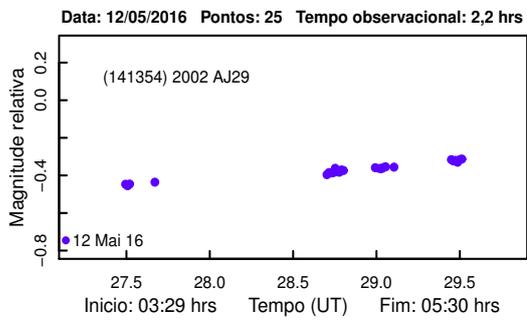
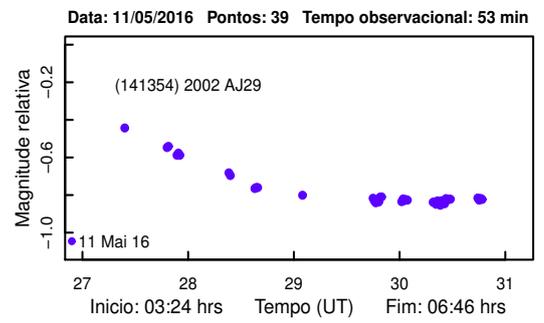
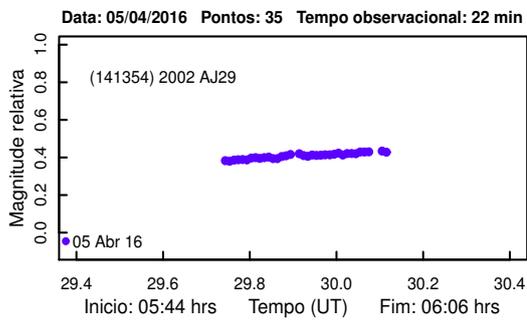
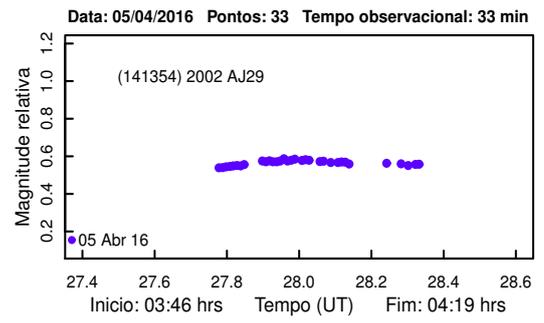
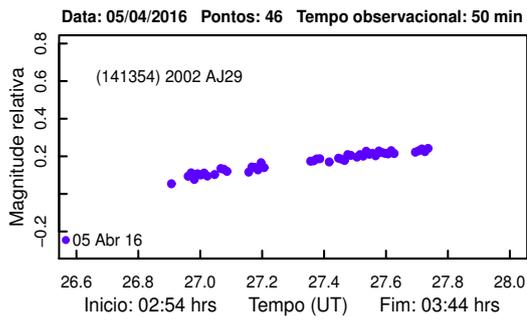


Figura 4.26: *Curvas de luz de (141354) 2002 AJ29 obtidas a partir das observações realizadas em abril e maio/2015.*

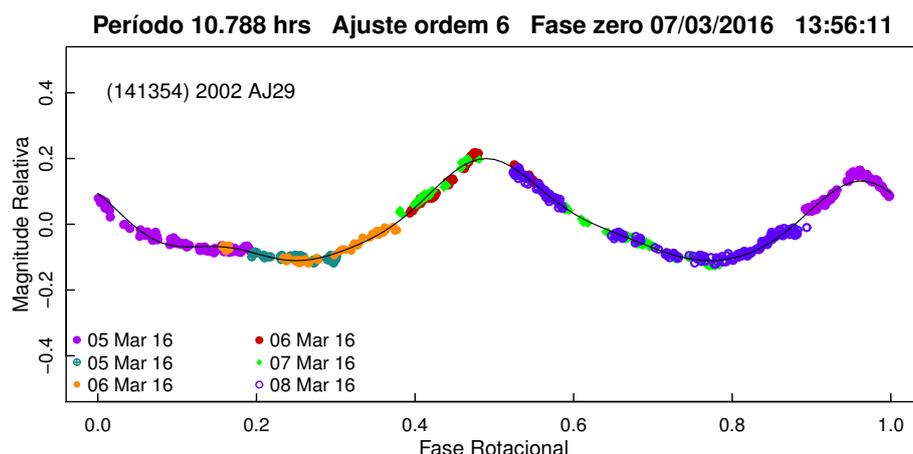


Figura 4.27: Curva de fase para (141354) 2002 AJ29 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.7 (142040) 2002 QE15

Quatro noites de outubro, uma de novembro e duas de dezembro de 2015 compõem o conjunto total de dados para este NEA do subgrupo Amor. As curvas de luz de outubro apresentaram muito ruído e algumas lacunas causadas por variações nas condições atmosféricas, sendo que as das noites 16 e 17 apresentaram indícios de máximos e mínimos. As curvas de luz individuais para as noites observadas em outubro podem ser visualizadas na Figura 4.28. Em relação aos dados obtidos nos dois últimos meses, obtemos novamente curvas de luz com amplitudes muito baixas, sendo que as curvas de dezembro, assim como as de outubro, apresentaram muito ruído e lacunas, mas mesmo assim foram as que tiveram maiores intervalos de observação. Em novembro, em razão de problemas técnicos, as observações deste objeto foram limitadas a apenas uma noite. As curvas de novembro e dezembro estão representadas na Figura 4.29.

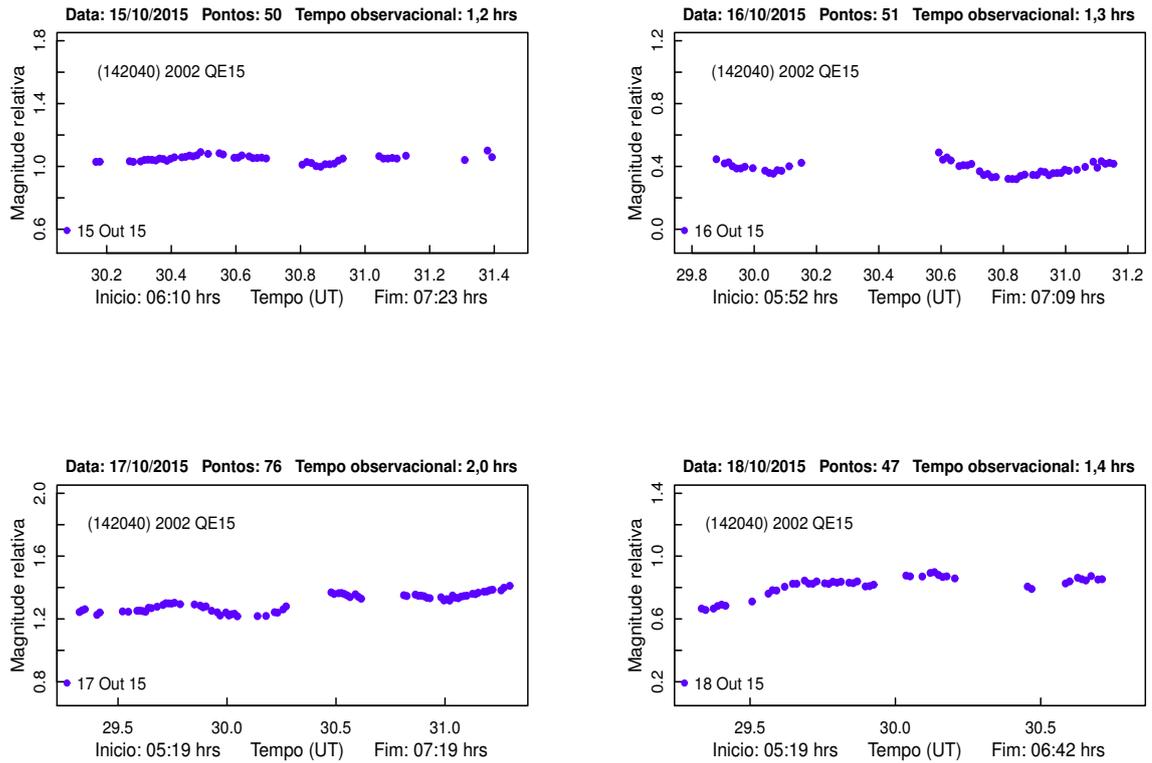


Figura 4.28: *Curvas de luz de (142040) 2002 QE15 obtidas utilizando as observações de outubro/2015.*

Realizamos análises de série de Fourier com os três conjuntos de dados nos meses observados. O melhor período de rotação ajustado aos dados de outubro foi de $1,6607 \pm 0,001$ horas, utilizando as curvas de luz dos dias 15, 16 e 17, as quais tiveram maior cobertura temporal e número de pontos. Este resultado foi obtido a partir de uma curva de luz composta ajustada por um polinômio de grau 4, com amplitude de cerca de 0,11 mag e com alta dispersão. Em novembro, os pontos da única curva de luz foram ajustados com um polinômio de grau 4, com período de $2,8200 \pm 0,0008$ horas e com uma amplitude de 0,14 mag. Por fim, utilizando as duas curvas de dezembro determinamos um período de $4,659 \pm 0,002$ horas com ajuste de 4. Esta curva composta tem amplitude de 0,17 mag e apresenta alta dispersão. Os resultados apresentados neste parágrafo estão representados na Figura de 4.30.

Assumimos, portanto, o valor de $1,661 \pm 0,001$ horas baseados no melhor ajuste e na melhor cobertura observacional dos pontos obtidos. Este resultado não é conclusivo, e por isto, atribuímos um índice de confiabilidade 2.

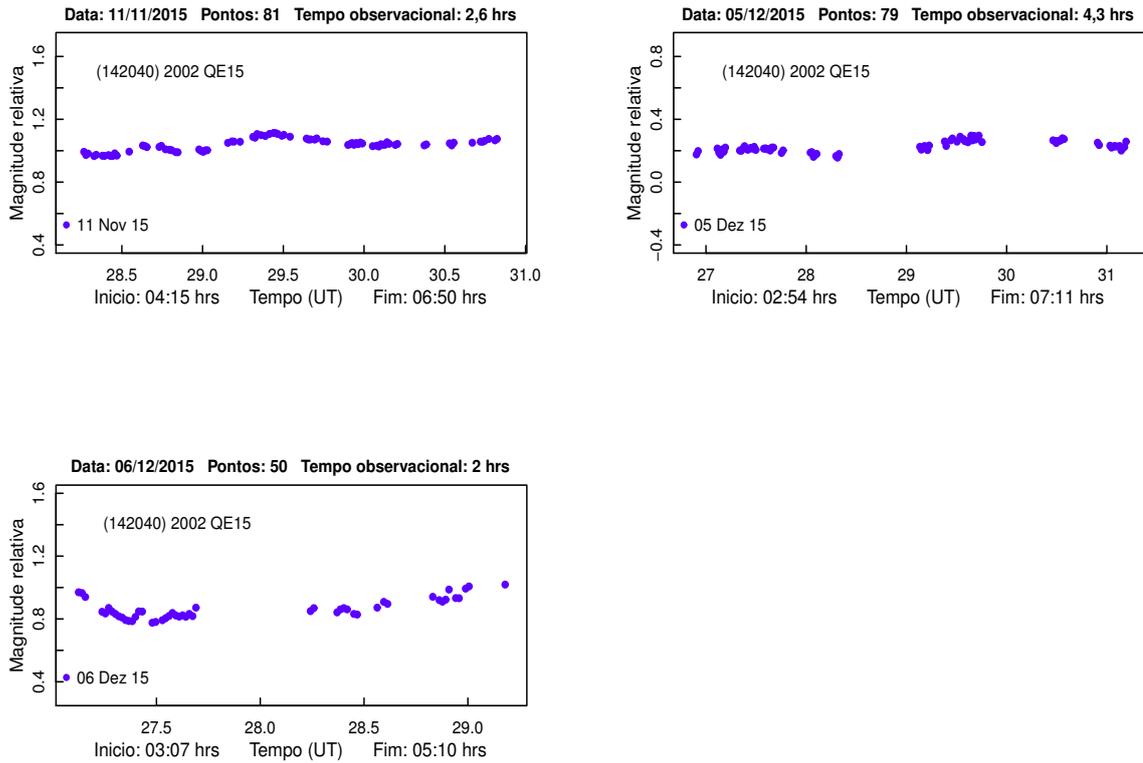


Figura 4.29: *Curvas de luz de (142040) 2002 QE15 obtidas utilizando as observações de novembro e dezembro/2015.*

Quatro valores para o período de rotação deste asteroide estão publicados, porém nenhum deles é conclusivo. Um valor de 2,5811 horas e um valor alternativo de cerca de 3,87 horas são relatados por meio do *site* <http://www.asu.cas.cz/~ppravec/neo.htm>, o qual é mantido pelo grupo de P. Pravec, sendo estes valores determinados a partir de dados obtidos em 2002. Warner (2016a) também relata dois valores para o período de rotação deste asteroide, $3,66 \pm 0,01$ horas e $3,884 \pm 0,005$ horas, baseados nos dados coletados em julho ($\alpha = 51,7^\circ$) e outubro ($\alpha = 66,3^\circ$) de 2015, sendo o segundo período adotado por ele como o mais correto. Sua curva de fase para o melhor ajuste é mostrada na Figura 4.31.

Nossos resultados diferem bastante daqueles mencionados no parágrafo anterior, sendo apenas o de novembro próximo do primeiro valor obtido por Pravec. Entretanto, todas as curvas apresentadas tem amplitudes bem pequenas, da ordem de 0,1 mag, implicando ser um asteroide de forma aproximadamente esférica. Novas

observações são necessárias para determinar o período rotacional deste NEA com maior precisão e segurança.

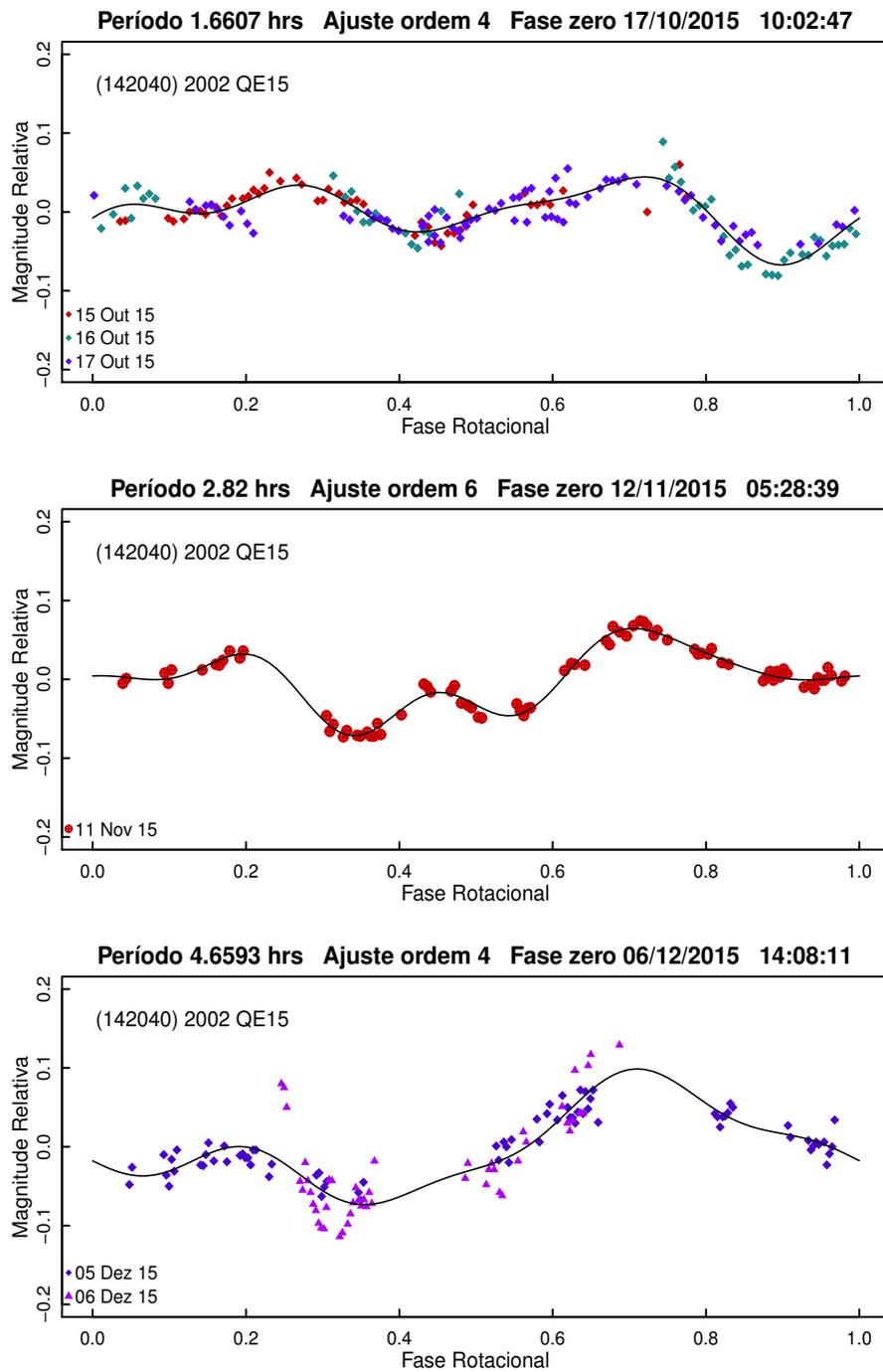


Figura 4.30: Curvas de fase para (142040) 2002 QE15 com os dados de outubro, novembro e dezembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

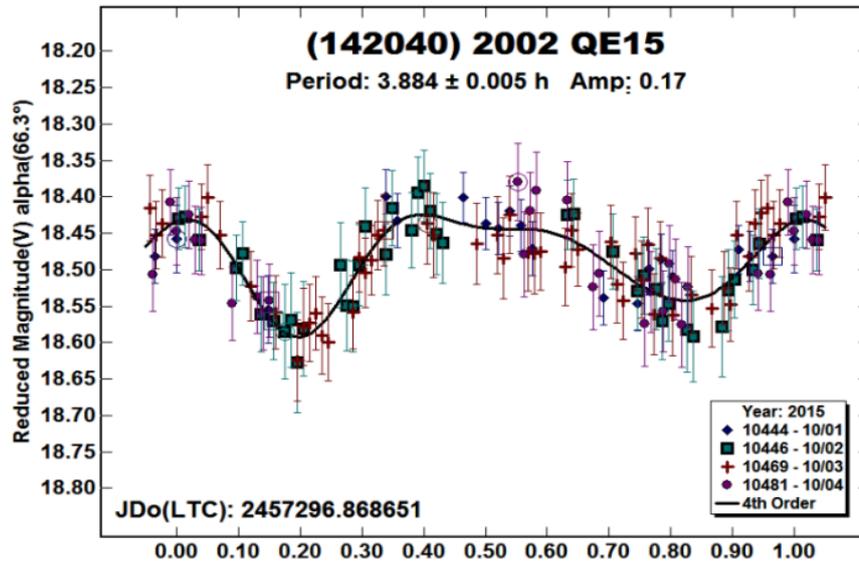


Figura 4.31: *Curvas de fase para (142040) 2002 QE15 de Warner (2016a).*

4.2.8 (155110) 2005 TB

Este objeto do subgrupo Apollo, foi observado por apenas duas noites em novembro de 2015. (155110) 2005 TB foi selecionado, sobretudo, porque na época de sua observação não se tinha período para ele publicado. As duas curvas de luz obtidas estão dadas na Figura 4.32. A curva construída com os dados da primeira noite de observação, mostra que conseguimos cobrir mais do que uma rotação completa, enquanto que a segunda, mostra apenas um mínimo e metade dos máximos.

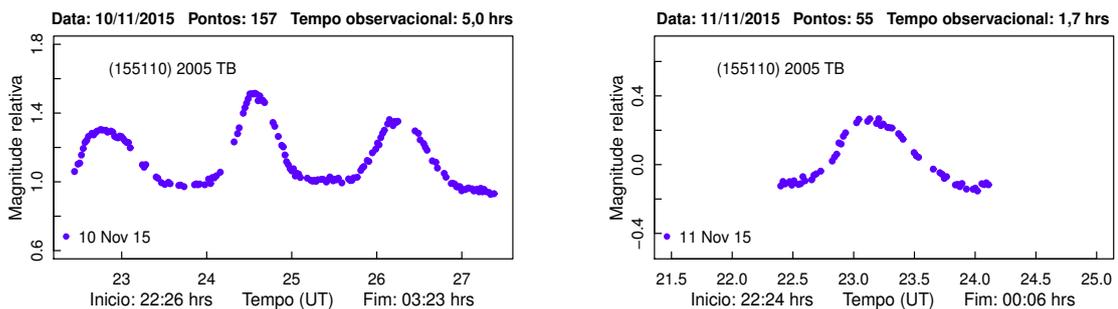


Figura 4.32: *Curvas de luz de (155110) 2005 TB.*

A curva de luz composta foi ajustada por um polinômio de grau 5, com período de $3,479 \pm 0,002$ horas. Os pontos obtidos formaram uma curva de fase muito bem coberta, com 0,55 mag de amplitude e baixa dispersão, indicando uma forma

provavelmente alongada do objeto. Uma característica notável da curva é que seus mínimos são bastante diferentes: um arredondado e outro estreito, revelando uma possível irregularidade da superfície deste NEA. Consideramos o período bem determinado e demos um índice 3 de confiança. A solução deste período é dada pela curva mostrada na Figura 4.33.

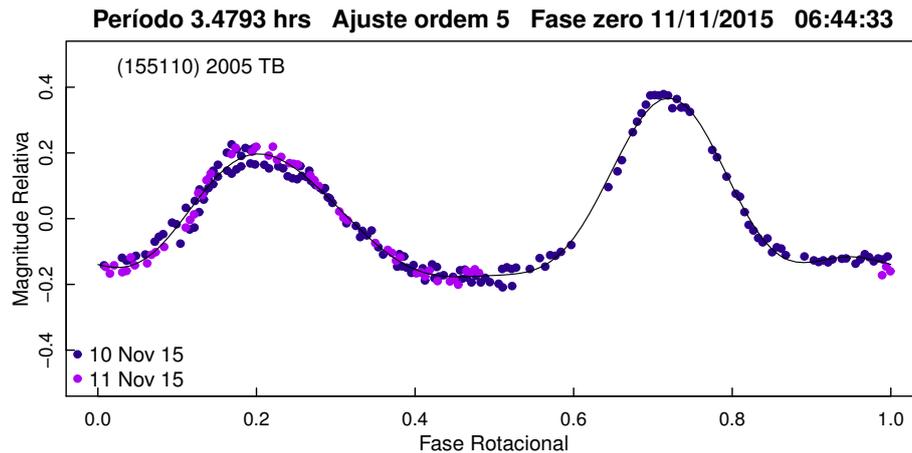


Figura 4.33: Curva de fase para (155110) 2005 TB utilizando as observações de novembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Dois valores de períodos rotacionais são relatados para este objeto. Warner (2016b) obteve um valor de $3,479 \pm 0,005$ horas e Carbognani and Buzzi (2016) obteve $3,4820 \pm 0,0005$ horas. As curvas de fase destes trabalhos são reproduzidas nas Figuras 4.34 e 4.35. Nossa solução para o período deste asteroide está de acordo com o valor determinado por Warner (2016b), contudo, apresenta uma pequena diferença do valor relatado por Carbognani and Buzzi (2016). Por fim, analisamos todas as curvas de fase apresentadas e verificamos que a nossa demonstra um melhor ajuste em razão de termos uma curva de luz composta com menor dispersão e boa cobertura.

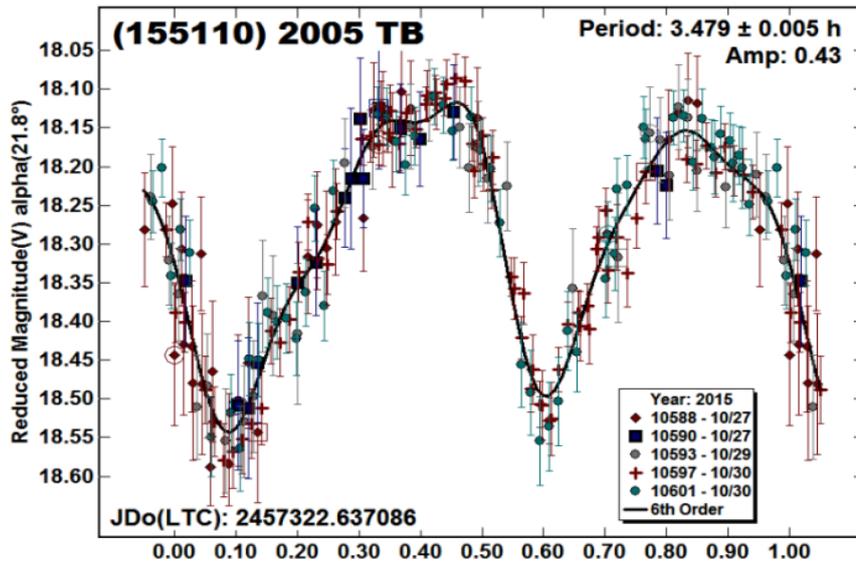


Figura 4.34: Curva de fase para (155110) 2005 TB retirada de Warner (2016b).

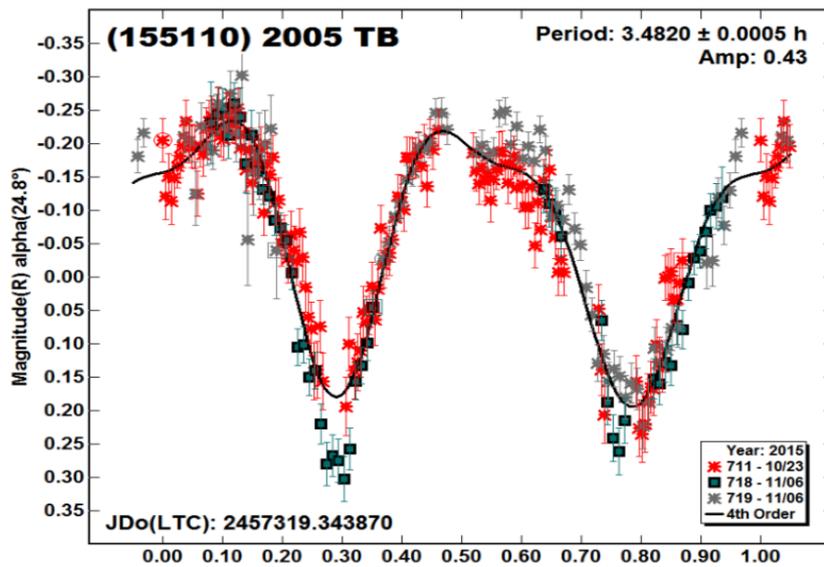


Figura 4.35: Curva de fase para (155110) 2005 TB retirada de Carbognani and Buzzi (2016).

4.2.9 (163243) 2002 FB3

Em nossa amostra, contamos apenas com dois asteroides do subgrupo Aten, sendo (163243) 2002 FB3 um deles. A órbita deste asteroide é bastante excêntrica e cruza a órbita da Terra. Este asteroide também é classificado como um PHA, pois possui um diametro de cerca de 1,6 km e $MOID \leq 0,05$ UA.

As observações fotométricas deste objeto aconteceram nos meses de março e abril de 2016, durante 4 noites, somando aproximadamente 10 horas de observação.

Em razão da alteração das estrelas de comparação, as noites dos dias 10 e 12 de março foram divididas em duas partes para a realização da análise. As curvas de luz individuais estão exibidas na Figura 4.36. O ângulo de fase durante o intervalo das observações praticamente não variou, e devido à este fato, utilizamos todas as noites na análise de série de Fourier.

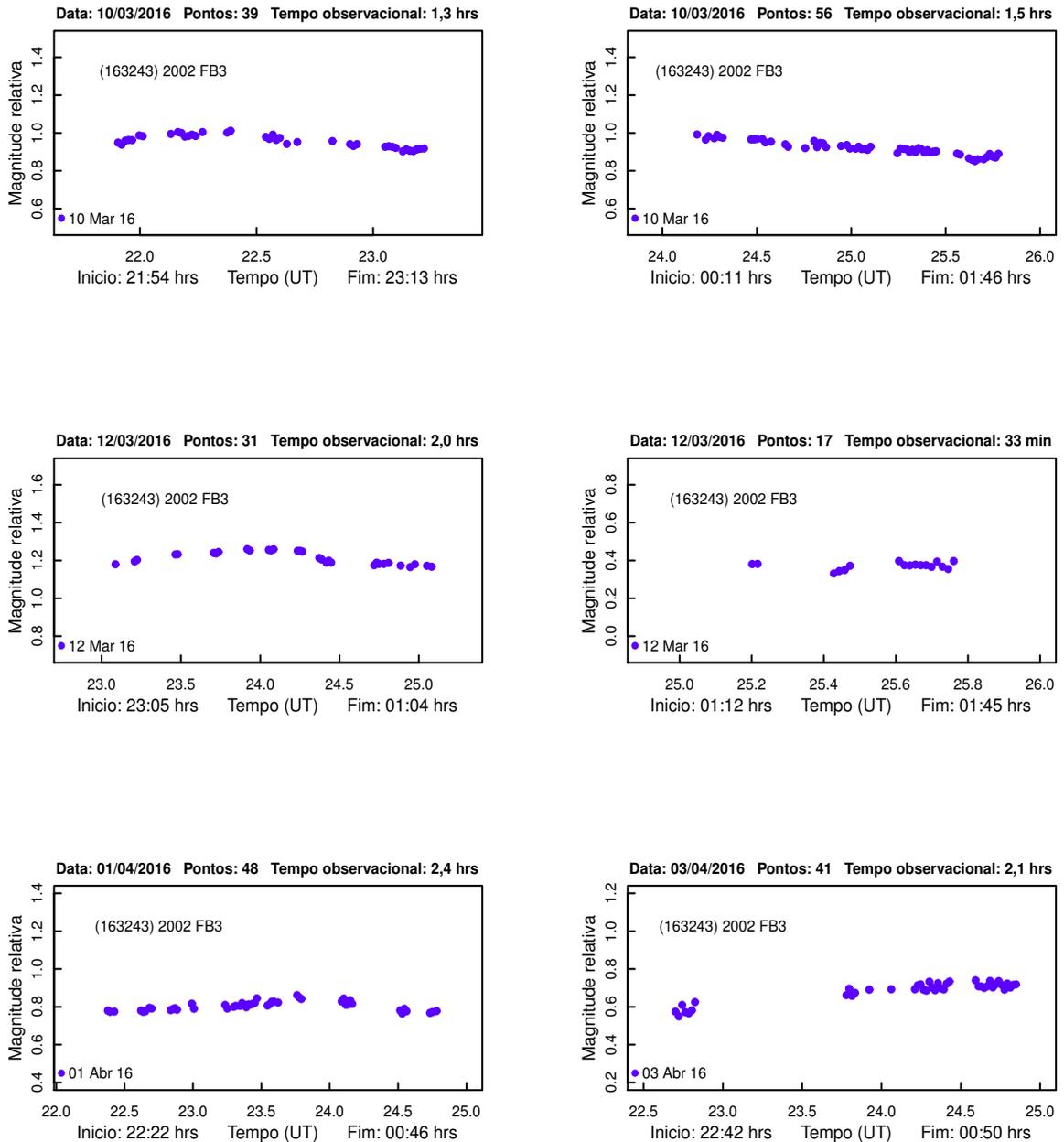


Figura 4.36: Curvas de luz de (163243) 2002 FB3 obtidas a partir das observações realizadas em março e abril/2015.

Todos os pontos foram ajustados com um polinômio de grau 5 fornecendo um período de $6,231 \pm 0,001$ horas e amplitude de cerca de 0,19 mag. O melhor ajuste alcançado, representado na Figura 4.37, apresenta uma dispersão relativamente baixa e uma pequena região com ausência de pontos. Como pode ser notado, todas as noites se superpõem bem para compor a curva de luz, porém, a cobertura do segundo mínimo não está totalmente completa. Em vista disto, atribuímos um índice de confiança 2 ao período determinado. A forma da curva de fase denuncia a forma de um objeto assimétrico, visto que apresenta máximos e mínimos bastante diferentes. (163243) 2002 FB3 não possui período publicado, então o valor aqui apresentado servirá como referência para futuras observações.

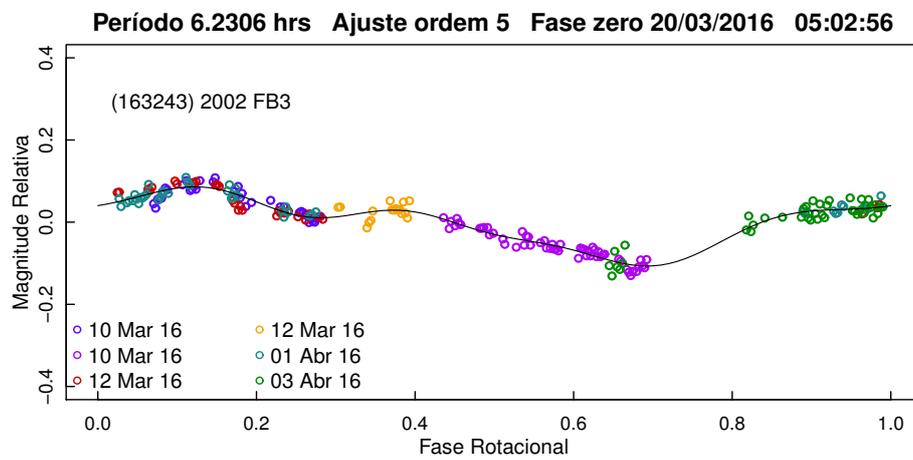


Figura 4.37: Curva de fase para (163243) 2002 FB3 utilizando as observações de março e abril/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.10 (194268) 2001 UY4

NEA do subgrupo Apollo, (194268) 2001 UY4, possui 1,244 km de diâmetro e uma órbita altamente excêntrica, com $e = 0,78$. Em razão tanto do seu tamanho como da aproximação da sua órbita com a da Terra, este objeto foi classificado como um PHA. (194268) 2001 UY4 foi observado por 4 noites durante a temporada observacional de novembro de 2015, somando um total de 10 horas de observação. As curvas de luz apresentam muito ruído, como pode ser visto na Figura 4.38.

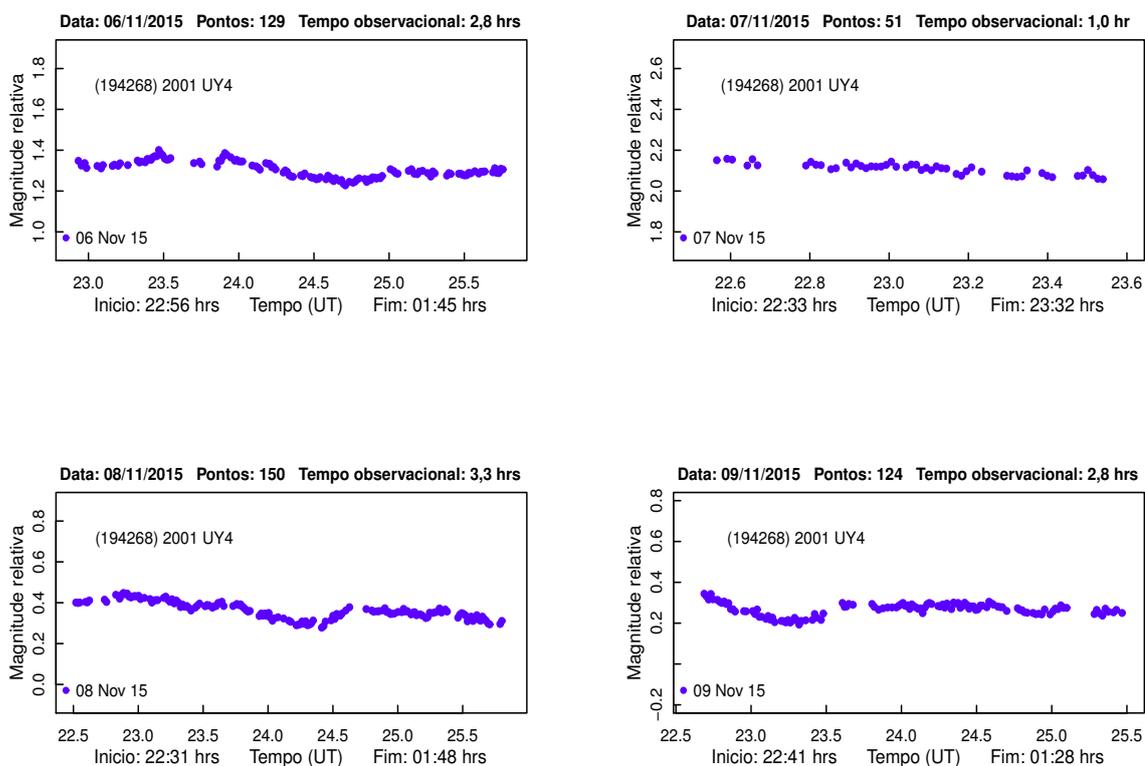


Figura 4.38: *Curvas de luz de (194268) 2001 UY4.*

Para formar uma boa curva de luz composta utilizamos todas as noites em que este objeto foi observado, a fim também de obter um período rotacional o mais próximo possível do verdadeiro. A curva de luz composta foi ajustada por um polinômio de Fourier de grau 6 e com isso determinamos um período de $6,8020 \pm 0,0008$ horas. Este resultado está representado pela Figura 4.39. A curva de fase composta tem dispersão relativamente alta e apresenta uma pequena região não coberta pelos pontos. Sua amplitude é de aproximadamente 0,16 mag, o que parece indicar um objeto arredondado e irregular. Em consequência desta dispersão,

adotamos um índice de confiança 2 ao resultado encontrado.

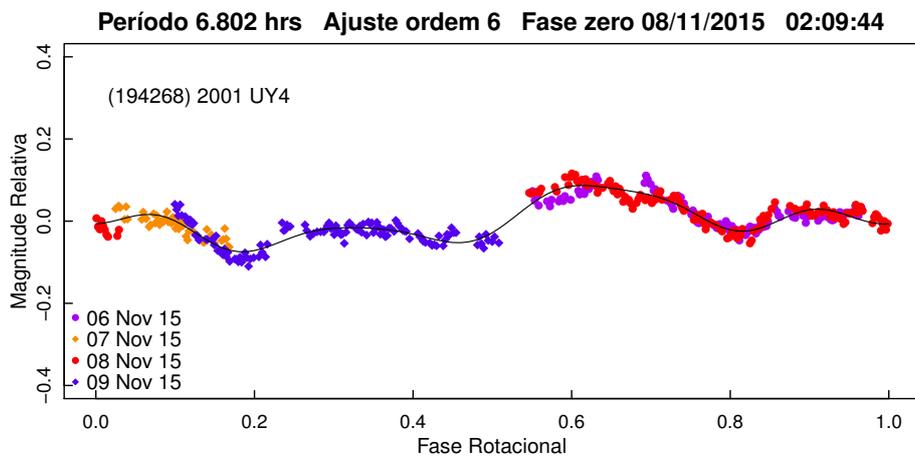


Figura 4.39: Curva de fase para (194268) 2001 UY₄ utilizando as observações de novembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Dois valores de período estão publicados por Warner (2016b) para este PHA. O melhor ajuste obtido por ele, mostrado na Figura 4.40, fornece um valor de $7,88 \pm 0,02$ horas sendo que um valor estimativo de $5,91 \pm 0,02$ horas também foi relatado. Nosso resultado difere bastante dessas estimativas, contudo, nenhum dos resultados apresentados é conclusivo. Portanto, são necessárias mais observações a fim de se obter o valor correto do período rotacional deste asteroide.

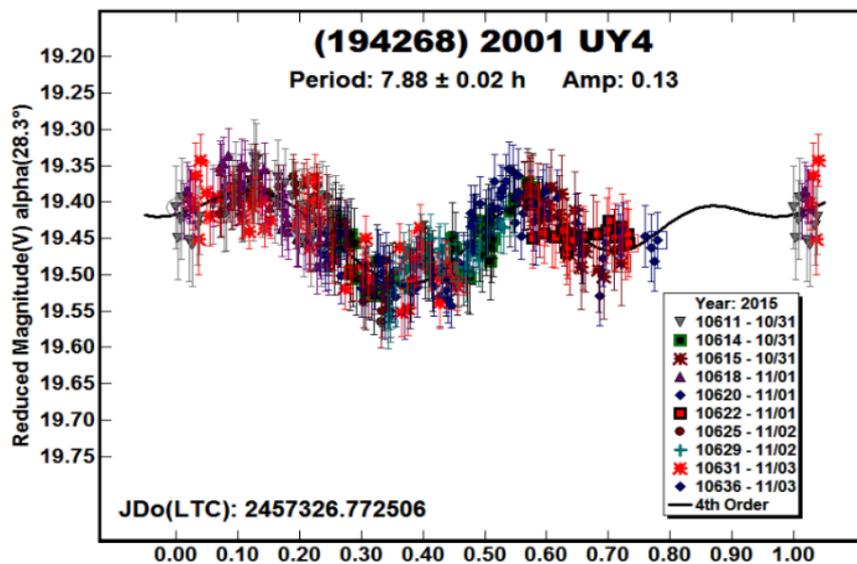


Figura 4.40: Curva de fase para (194268) 2001 UY₄ retirada de Warner (2016b).

4.2.11 (250706) 2005 RR6

NEA do subgrupo Apollo, (250706) 2005 RR6 possui a segunda maior excentricidade da nossa amostra, com $e = 0,69$. Este objeto, que é também classificado como um PHA, foi observado por três noites durante a temporada de observação de março de 2016, quando apresentava uma magnitude de 18,1. As noites dos dias 6 e 7 de março sofreram mudanças de campo em razão de paralizações para a realização da observação de outro alvo, e por isso, houveram mudanças das estrelas de comparação, o que ocasionou termos 3 curvas de luz para o dia 6 e duas para o dia 7 de março. Todas as curvas de luz são mostradas na Figura 4.41.

Realizamos uma análise de série de Fourier utilizando todas as curvas de luz e obtivemos dois bons ajustes. O primeiro ajuste resultou um período de $7,000 \pm 0,002$ horas. A curva de luz composta tem dispersão relativamente baixa e apresenta uma pequena região com ausência de pontos. Esta curva foi ajustada por um polinômio de grau 5 e tem amplitude de aproximadamente 0,28 mag. O segundo ajuste, forneceu um período de $8,956 \pm 0,002$ horas com uma ordem 6. O resultado dos ajustes é apresentado na Figura 4.42. A segunda curva de fase composta apresenta uma boa superposição e baixa dispersão, porém também apresenta uma região sem pontos. Consideramos o primeiro valor apresentado como o mais correto, mas não descartamos a possibilidade de que o período correto seja um pouco maior. O código de confiança 2 foi dado ao valor considerado. Não existe até o momento um valor de período publicado para (250706) 2005 RR6, sendo esta a sua primeira determinação.

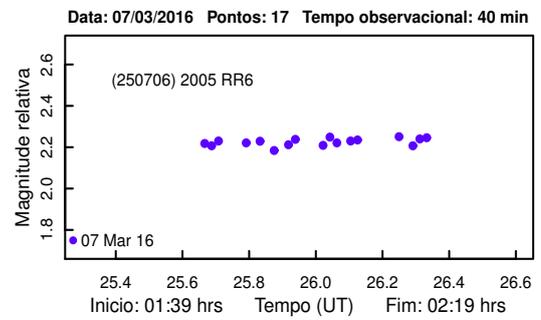
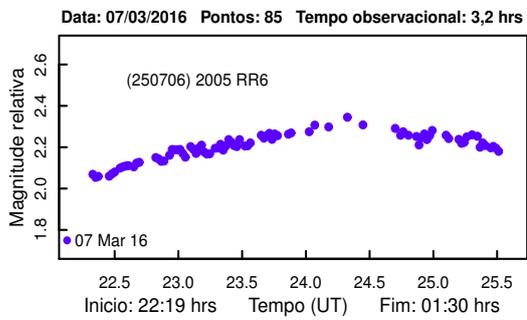
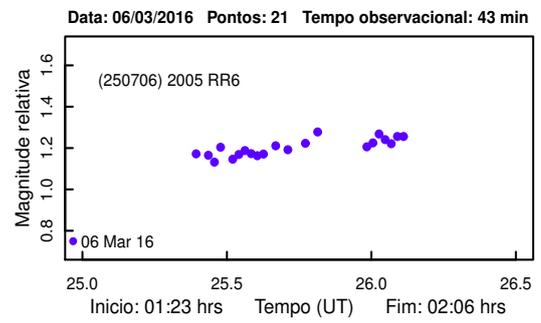
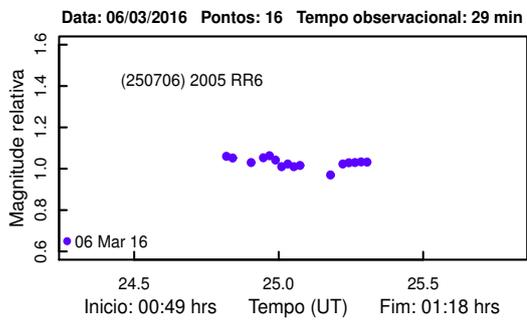
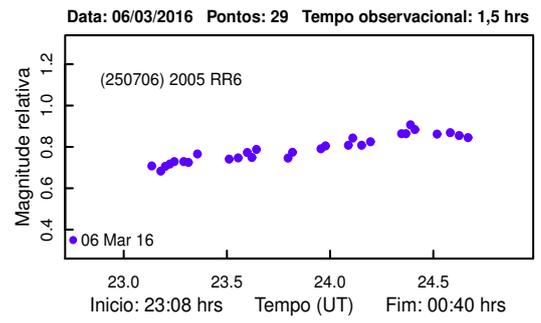
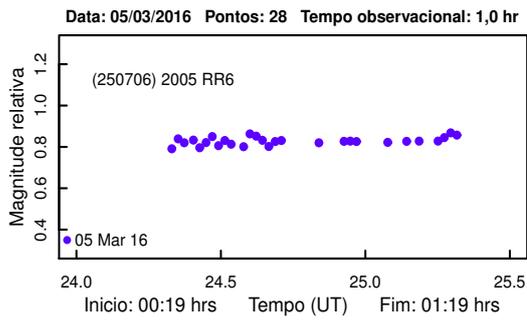


Figura 4.41: *Curvas de luz de (250706) 2005 RR6.*

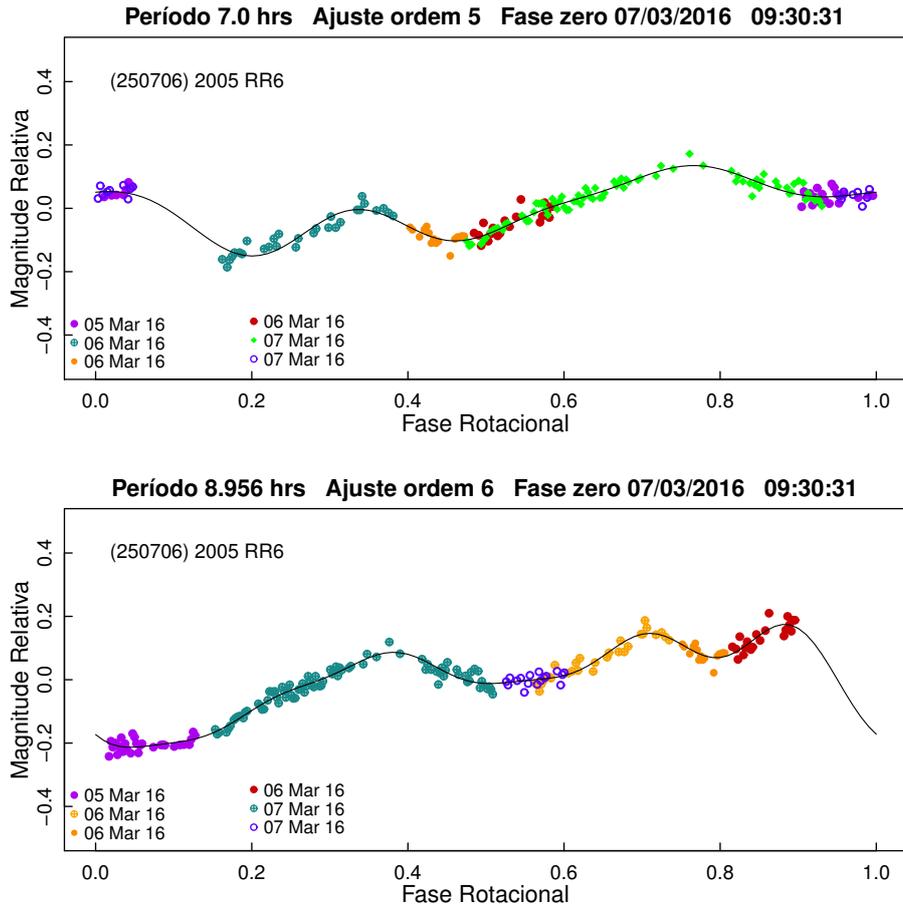


Figura 4.42: *Curvas de fase para (250706) 2005 RR6 utilizando as observações de março/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

4.2.12 (315098) 2007 EX

Integrante do subgrupo Aten, (315098) 2007 EX foi observado por nove noites em abril e maio de 2016, porém apenas uma noite abril e quatro de maio tiveram os dados aproveitados para a obtenção das curvas de luz, que são apresentadas na Figura 4.43. As observações apresentam bastante ruído e interrupções em razão tanto das condições climáticas como dos momentos em que o asteroide passou muito próximo de estrelas do campo.

Utilizamos todas as curvas de maio para realizar a análise, e o melhor resultado foi com um período de $2,447 \pm 0,003$ horas ajustado por um polinômio de ordem 4. O resultado do ajuste está dado na Figura 4.44. A curva de luz tem amplitude de 0,20 mag e dispersão relativamente baixa, sendo razoavelmente bem coberta pelos pontos observados. Os máximos e mínimos estão definidos e as quatro noites se superpõem bem. A forma da curva de fase indica se tratar de um objeto oblato e regular. Foi atribuído um índice de confiança 3 ao período determinado. Até o

momento, não consta nenhum valor de período publicado para (315098) 2007 EX.

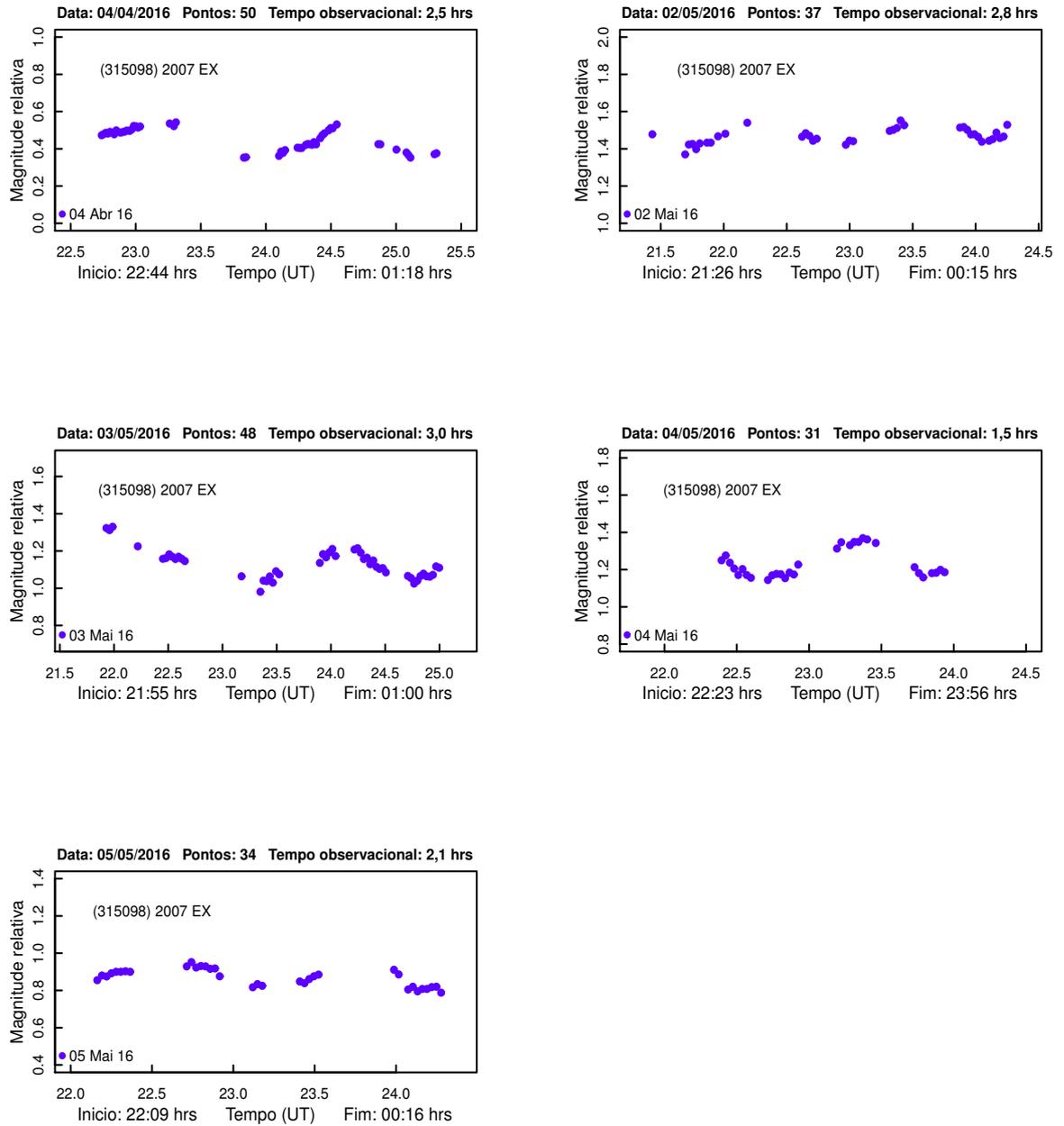


Figura 4.43: *Curvas de luz de (315098) 2007 EX obtidas a partir das observações realizadas em abril e maio/2015.*

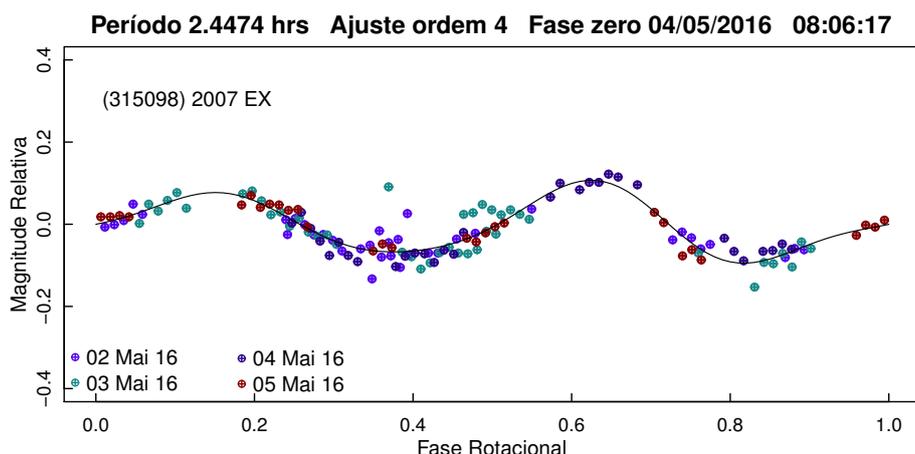


Figura 4.44: *Curva de fase para (315098) 2007 EX utilizando as observações de maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

4.2.13 (337069) 1998 FX134

Este NEA faz parte dos asteroides do subgrupo Amor, possui entre 574 m e 1,283 km de diâmetro, e foi observado durante quatro noites em maio de 2015, as quais forneceram a melhor cobertura temporal, e duas noites em junho de 2015. Todas as noites de observação deste objeto tiveram interrupções devido às más condições meteorológicas e também pela passagem do asteroide muito próximo de estrelas do campo. As curvas de luz individuais são apresentadas na Figura 4.45.

Determinamos o período de rotação de $7,487 \pm 0,001$ horas para (337069) 1998 FX134. Os pontos obtidos a partir das observações realizadas em maio forneceram uma boa curva de luz composta, ajustada por um polinômio de Fourier de grau 6. Como pode ser notado, as quatro noites se superpõem muito bem para compor a curva de luz composta possuindo máximos e mínimos bem definidos. A curva de luz deste asteroide tem amplitude de 0,46 mag e sua forma parece indicar um objeto alongado e simétrico. O resultado do ajuste é mostrado na Figura 4.46. Este asteroide não tem nenhum valor de período de rotação reportado na literatura, sendo nosso resultado a sua primeira determinação. Foi atribuído um índice de confiança 3 ao período determinado.

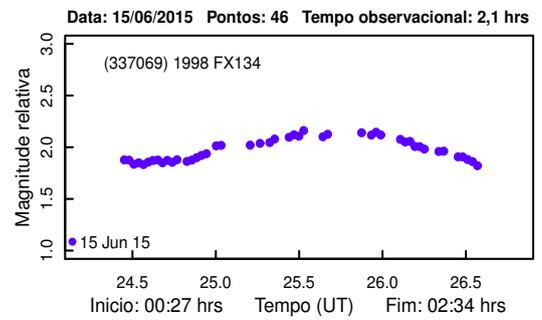
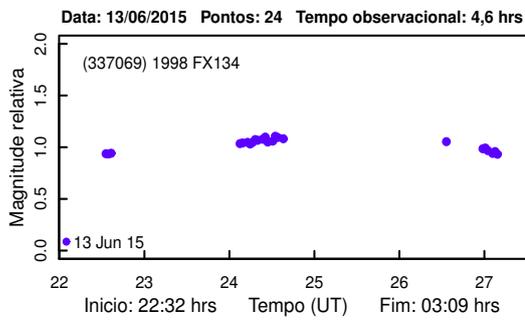
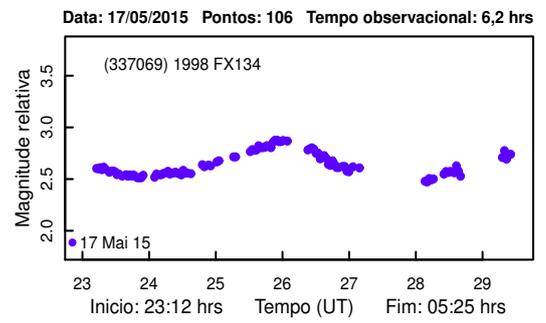
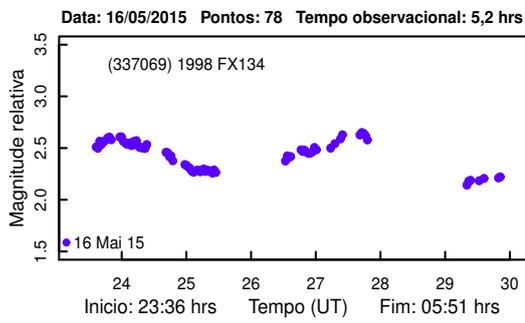
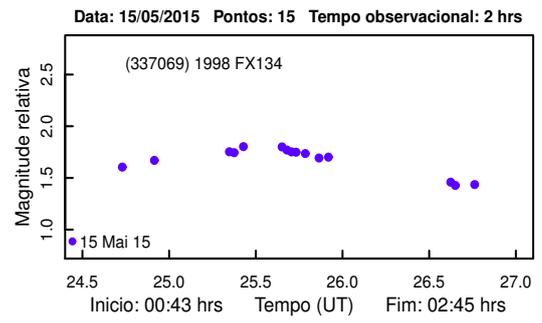
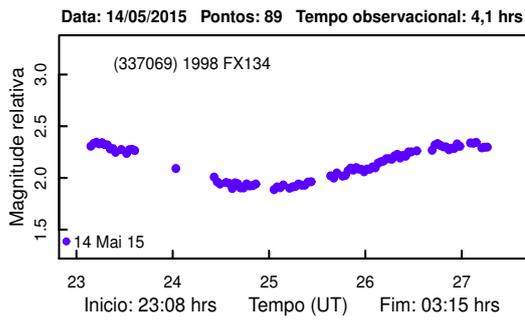


Figura 4.45: *Curvas de luz de (337069) 1998 FX134 obtidas a partir das observações realizadas em maio e junho/2015.*

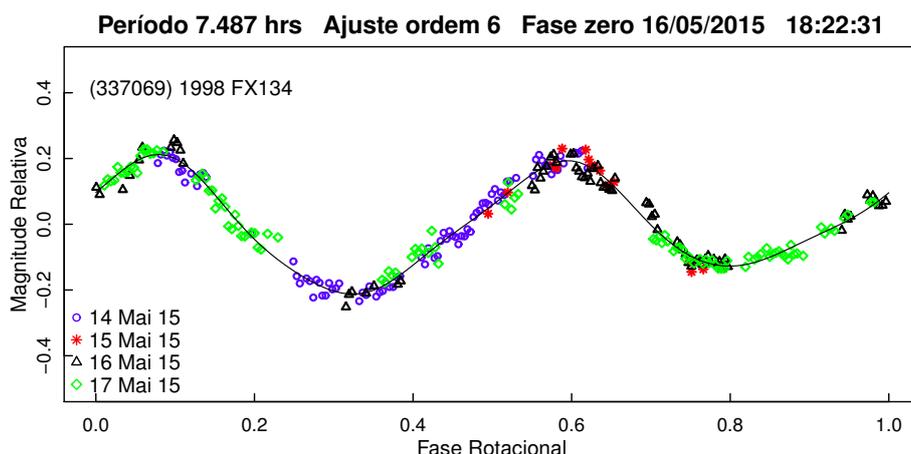


Figura 4.46: Curva de fase para (337069) 1998 FX134 com os dados de maio/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.14 (337866) 2001 WL15

Integrante do subgrupo Amor, (337866) 2001 WL15 fez uma passagem próxima da Terra em janeiro de 2016, chegando até 0,080 UA. Este NEA foi observado nos meses de dezembro de 2015, março e abril de 2016, antes e depois do seu encontro próximo com o nosso planeta, visando obter resultados precisos do período de rotação. Observações deste objeto também estavam planejadas para as temporadas de janeiro e fevereiro de 2016, porém, em consequência de um fenômeno meteorológico, que mudou o cenário do semiárido brasileiro com chuvas em praticamente toda a região nordeste, as observações foram inviabilizadas.

Contamos ao todo com 11 noites de observação do asteroide (337866) 2001 WL15, sendo três em dezembro/2015, cinco em março e três em abril/2016. Em praticamente todas as noites ocorreram interrupções e outras noites não puderam ser aproveitadas em razão das condições meteorológicas, o que propiciou a limitação do tempo de cobertura de um ciclo rotacional. As curvas de luz individuais são mostradas nas Figuras 4.47 e 4.48.

As curvas de luz apresentam ruído moderado e variações de brilho irregulares de diferentes regiões do objeto. Utilizamos cada conjunto de curvas de luz para realizar análises de Fourier e determinar o melhor período rotacional. Ajustamos aos pontos obtidos em dezembro/2015, um período de $8,7290 \pm 0,0005$ horas com um polinômio de grau 5. A curva de luz composta com os dados de dezembro,

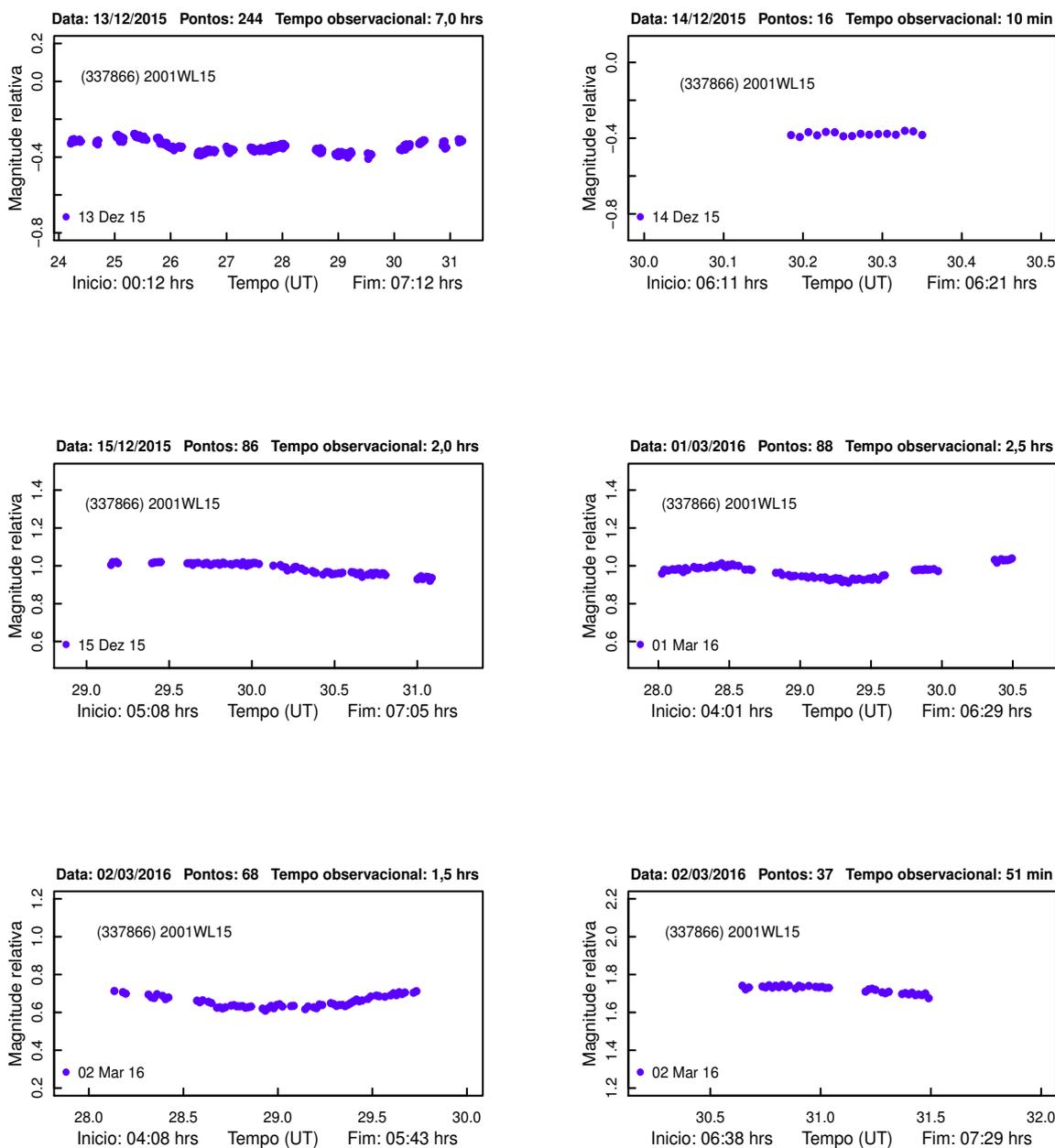


Figura 4.47: *Curvas de luz de (337866) 2001 WL15 obtidas a partir das observações realizadas em dezembro/2015 e março/2016.*

mostrada na Figura 4.49, tem dispersão razoável, uma região não coberta pelas observações, e um amplitude de aproximadamente 0,13 mag.

O ajuste aos pontos obtidos nas noites de 1, 2, 3 e 4 de março/2016 forneceu um período de $8,8150 \pm 0,0005$ horas com um polinômio de grau 5. A curva de luz

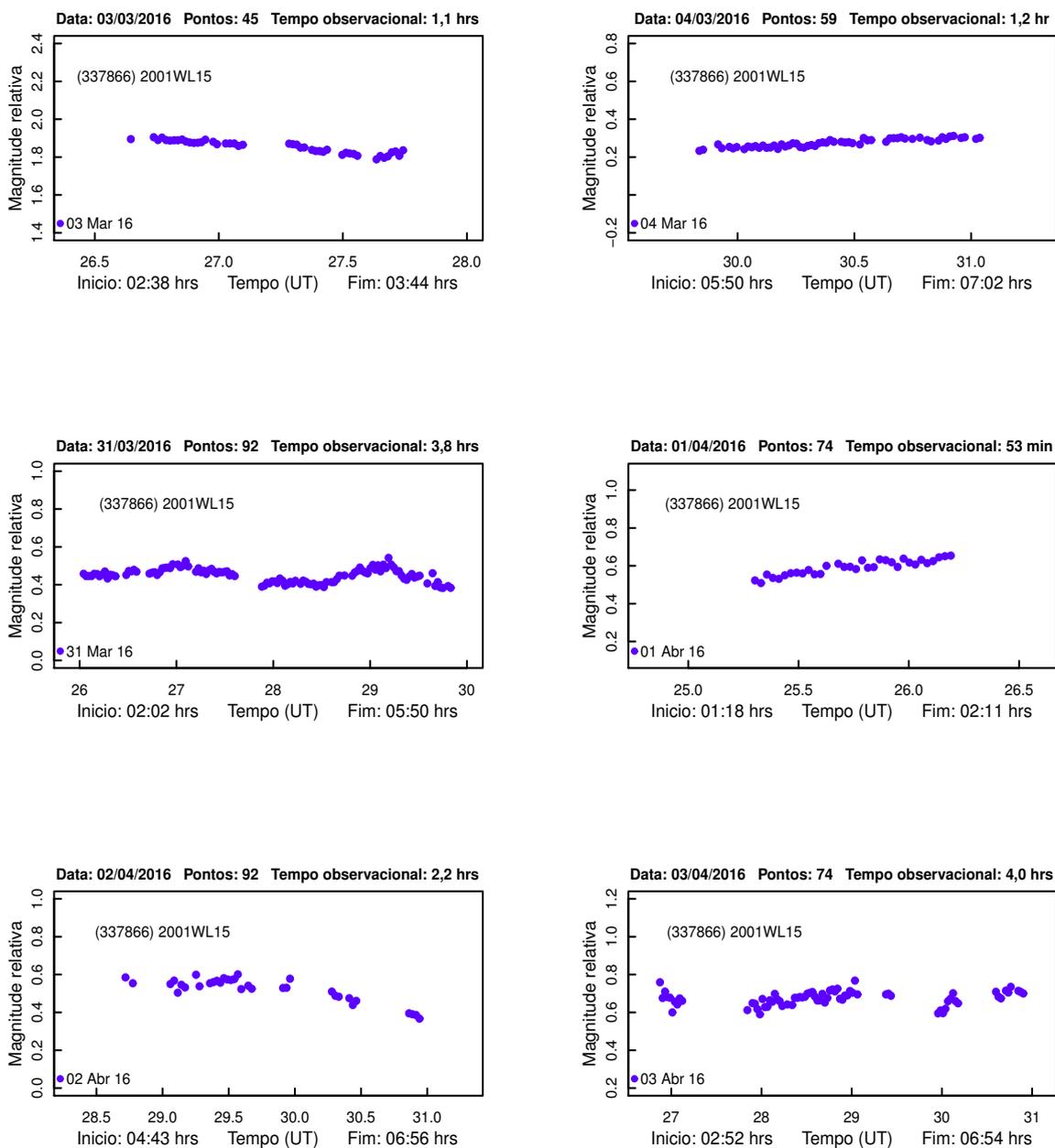


Figura 4.48: *Curvas de luz de (337866) 2001 WL15 obtidas a partir das observações realizadas em março e abril/2016.*

composta apresenta baixa dispersão e um bom ajuste apesar de não ter a cobertura total da rotação. A amplitude da curva é de cerca 0,31 mag. Na temporada de abril, que conta com a noite de 31 de março, obtivemos uma maior cobertura temporal, e devido a este fato obtivemos um ajuste relativamente bom, com uma ordem 5 e um período de $8,957 \pm 0,002$ horas. A curva de luz composta de abril apresenta

dispersão razoável e melhor cobertura da rotação do que nos meses anteriores, com amplitude de 0,25 mag. Portanto, consideramos este último período determinado como o mais correto e atribuímos um índice de confiança 3 ao valor obtido. Nossos resultados são mostrados na Figura 4.49

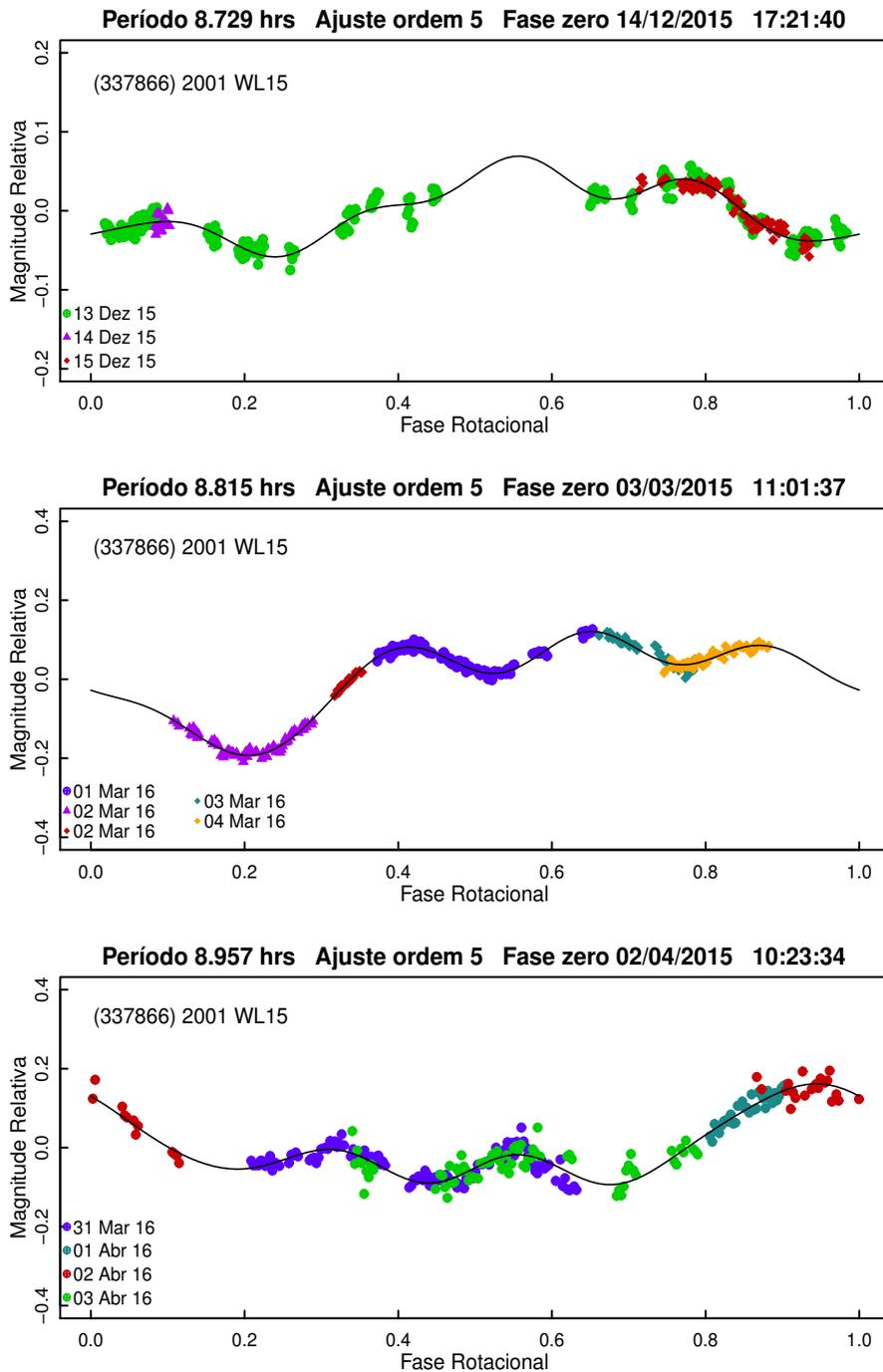


Figura 4.49: Curvas de fase para (337866) 2001 WL15 com os dados de dezembro, março e abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Para este asteroide, três estimativas de período foram publicadas. O valor de $8,65 \pm 0,09$ horas é relatado por Hicks et al. (2016) (<http://newton.dm.unipi.it/neodys/index.php?pc=1.1.9&n=2001%20WL15>) e uma estimativa de aproximadamente 5 horas é dado por Carbognani and Buzzi (2016). Uma terceira estimativa, de $8,955 \pm 0,002$ horas foi publicada por B. Warner em sua página de internet (<http://www.minorplanetobserver.com/PDO/PDOLightcurves.htm>). Nosso resultado de dezembro está de acordo com o de Hicks et al. (2016) dentro dos erros, e o de abril concorda com o de Warner. A curva de fase divulgada por Hicks et al. (2016) é mostrada na Figura 4.50.

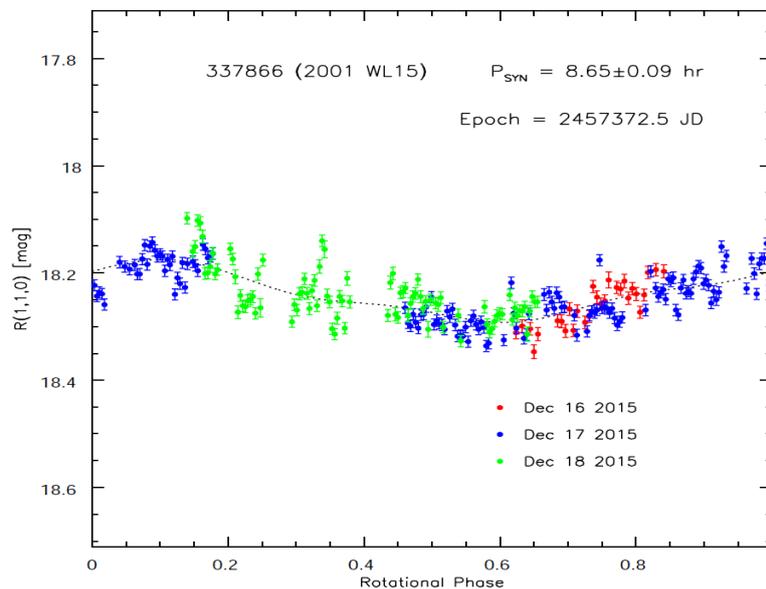


Figura 4.50: Curva de fase para (337866) 2001 WL15 retirada de Hicks et al. (2016).

4.2.15 (425713) 2011 BK24

O NEA (425713) 2011 BK24, do subgrupo Amor, possui algumas centenas de metros de diâmetro e, assim como quase todos os objetos do subgrupo Amor, cruza a órbita do planeta Marte, podendo no futuro se tornar um cruzador da órbita da Terra. As observações deste asteroide, realizadas durante quatro noites em abril de 2015, nos forneceram uma boa cobertura temporal, porém as curvas de luz individuais, mostradas na Figura 4.51, apresentam estruturas um pouco distintas entre si.

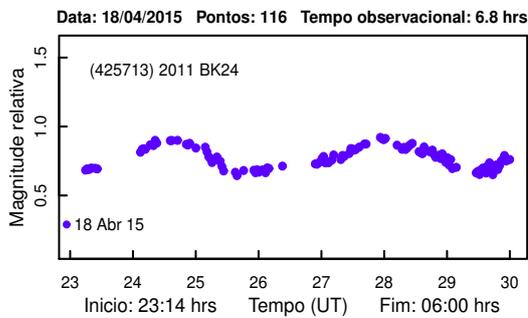
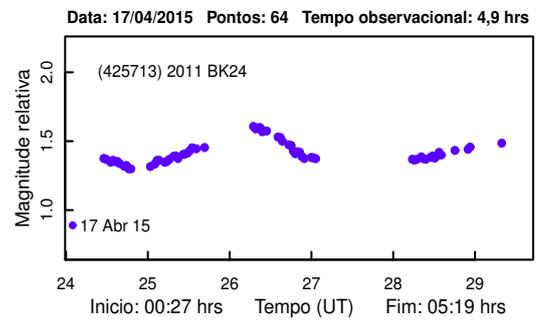
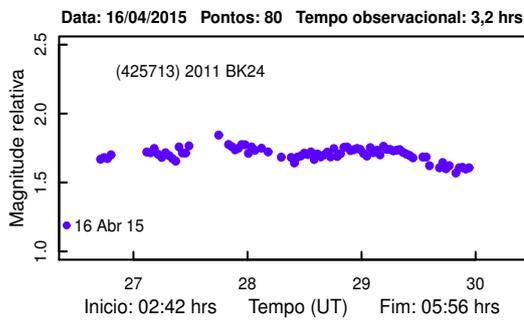
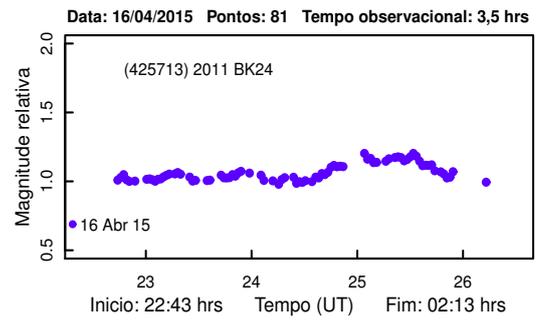
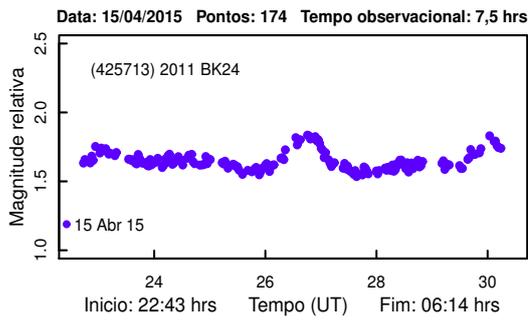


Figura 4.51: *Curvas de luz de (425713) 2011 BK24.*

As curvas de luz contém muito ruído e algumas interrupções ocasionadas por variações nas condições atmosféricas. A paralização da observação na noite de 16 de abril fez com que as estrelas de comparação fossem trocadas, e por este motivo, temos duas curvas de luz para a mesma noite. Estas variações atmosféricas, assim como estrelas do campo nas proximidades do asteroide, podem ser responsáveis pelas diferentes estruturas apresentadas nas curvas individuais.

Inicialmente, realizamos a análise de Fourier utilizando as curvas de luz dos dias 17 e 18 de abril, mas não obtivemos uma boa superposição das noites. Por isso, resolvemos utilizar apenas os dados obtidos na noite do dia 18 para realizar a procura do período, visto que nesta noite percebemos que a rotação foi totalmente coberta.

Os pontos obtidos foram ajustados com um polinômio de grau 4 fornecendo um período de $6,010 \pm 0,002$ horas. A curva de luz apresenta baixa dispersão e amplitude de 0,24 mag, o que parece indicar um objeto de forma esférica ou que foi observado em uma configuração de aspecto particular. A solução para o período deste objeto está mostrado na Figura 4.52. Para este NEA, não encontramos nenhum valor de período publicado na literatura, sendo nosso resultado sua primeira determinação. Um índice de confiança 3 foi atribuído ao período encontrado.

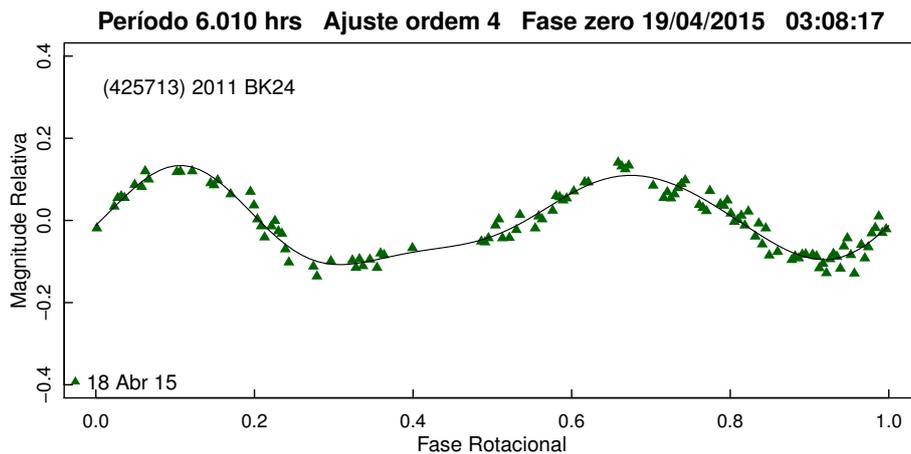


Figura 4.52: Curva de fase para (425713) 2011 BK24 com os dados de abril/2015. A linha representa o melhor ajuste.

4.2.16 (430544) 2002 GM2

Três noites de março de 2015 compõem o total de dados do asteroide (430544) 2002 GM2 do subgrupo Apollo. Este asteroide, que também é classificado como um PHA, possui a órbita mais excêntrica da nossa amostra, com $e = 0,80$. Durante as noites de observação, a presença de nuvens interrompeu e minimizou a cobertura temporal da rotação do objeto. As curvas de luz obtidas para cada noite são dadas na Figura 4.53.

Utilizamos as três noites, que somam cerca de 5 horas de observação, para ajustar o melhor período. O valor que forneceu o melhor ajuste foi de $2,635 \pm 0,005$ horas, com uma ordem 5 da série de Fourier. A superposição das curvas de luz individuais foi relativamente boa, mas a curva de luz composta mostra que não conseguimos cobrir o primeiro máximo, o que torna nosso resultado um pouco duvidoso. Por isso, atribuímos um índice de confiança 2 ao valor encontrado. A Figura 4.54 mostra o ajuste resultante. A amplitude da curva de luz é de 0,34 mag e sua forma parece indicar um objeto de forma oblata e simétrico.

Apenas um registro para o período deste asteroide se encontra publicado. Warner (2015) determinou o valor de $2,630 \pm 0,002$ horas para a rotação deste objeto, utilizando dados obtidos nas mesmas noites que os nossos. Sua curva de fase apresenta uma dispersão relativamente alta, mas apresenta o dois máximos bem definidos, como pode ser visto na Figura 4.55. Nosso resultado é compatível com o de Warner (2015), dentro dos erros.

Warner (2015) também argumenta que este asteroide é um forte candidato a ser um binário devido à dispersão dos pontos da sua curva de fase. Contudo, nossas observações permitiram obter uma boa superposição das noites em uma curva de luz composta com baixa dispersão, e embora não tenhamos pontos no primeiro máximo, acreditamos que possivelmente o ruído seja o motivo da dispersão da curva de luz composta apresentada por Warner (2015). Assim, somente observações futuras devem esclarecer se este asteroide é mesmo um binário, porém tais observações poderão ocorrer apenas a partir de março de 2028, quando o objeto apresentará magnitude visual menor do que 19.

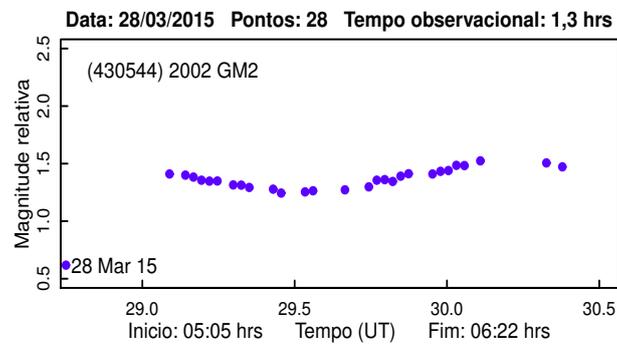
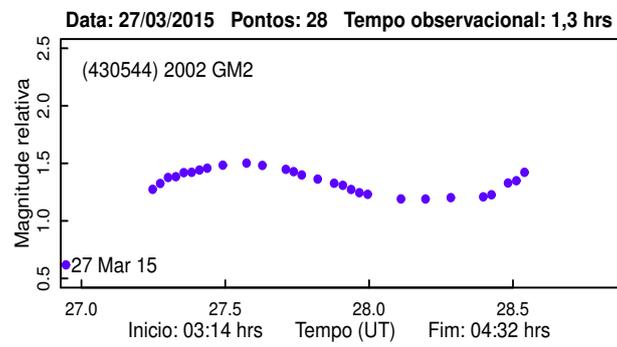
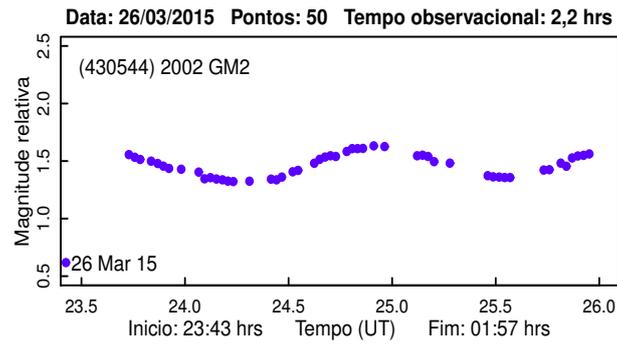


Figura 4.53: *Curvas de luz de (436724) 2002 GM2.*

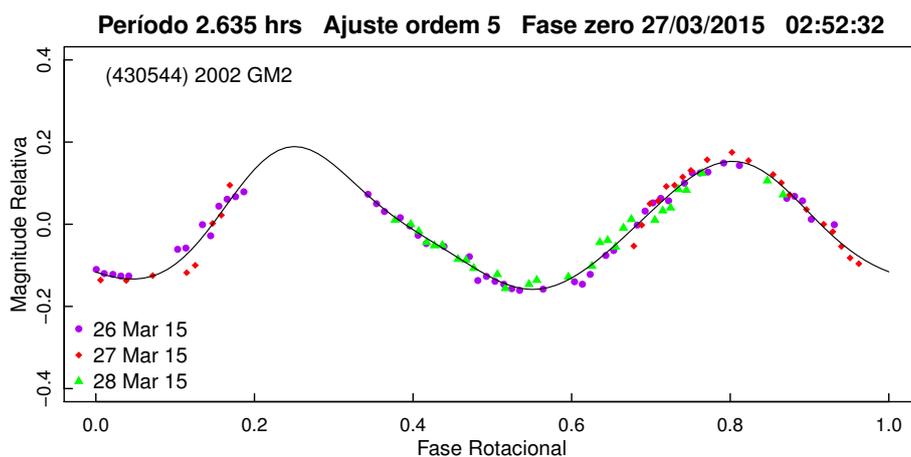


Figura 4.54: Curva de fase de (337069) 2002 GM2 utilizando observações de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.

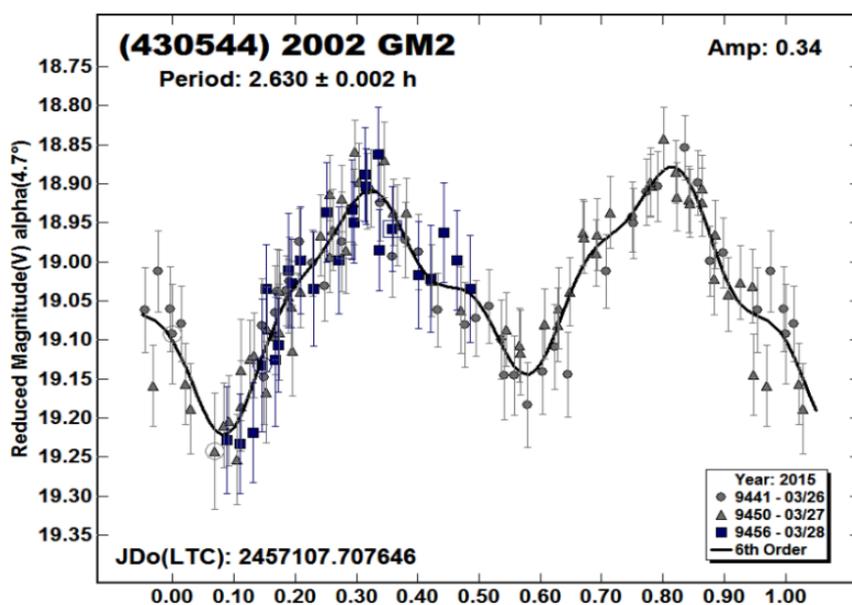


Figura 4.55: Curva de fase para (436724) 2002 GM2 retirada de Warner (2015).

4.2.17 (436775) 2012 LC1

O asteroide do subgrupo Apollo, (436775) 2012 LC1, foi observado por quatro noites em maio de 2015, porém, as imagens obtidas nas duas primeiras noites não foram aproveitadas, pois apresentaram bastante ruído e pequena cobertura temporal. Sendo assim, apresentamos apenas as curvas de luz das duas noites seguintes na Figura 4.56.

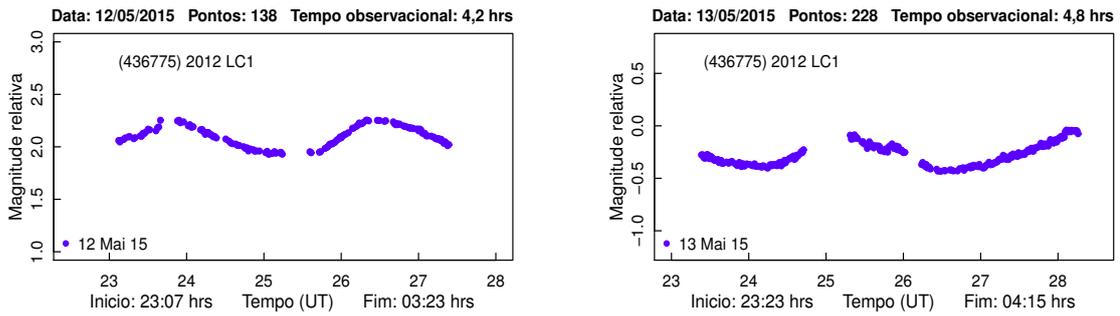


Figura 4.56: *Curvas de luz de (436724) 2012 LC1.*

Como pode ser notado, as duas curvas de luz mostram a cobertura quase completa do período de rotação, e por este motivo, realizamos a busca do período no intervalo de 4 a 6 horas. Obtivemos uma curva de luz composta, somando cerca de 9 horas de observação, o que nos permitiu determinar um período de $5,684 \pm 0,004$ horas com índice de confiança 3. A curva de luz composta foi ajustada por um polinômio de Fourier de ordem 8. O resultado que melhor ajustou os dados é mostrado na Figura 4.57. Um valor praticamente idêntico, de $5,687 \pm 0,005$ horas, foi obtido por Warner (2015), que utilizou duas noites em abril de 2015.

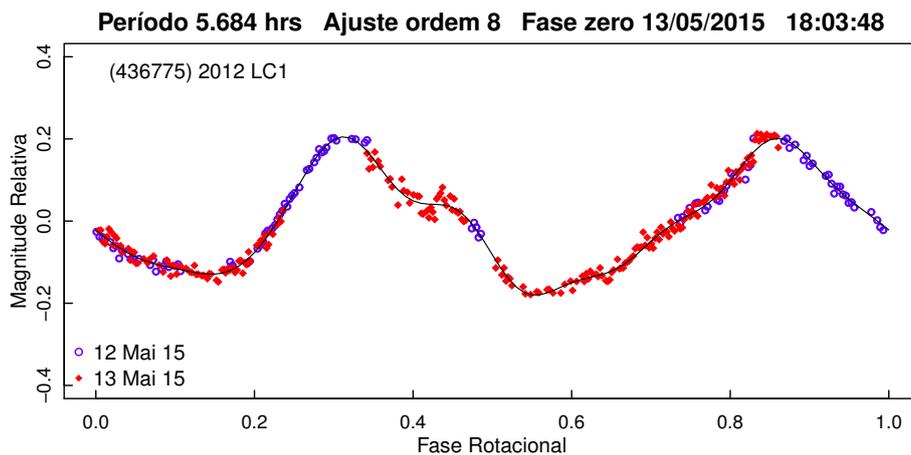


Figura 4.57: *Curva de fase para 337069 (2012 LC1) com os dados de maio/2015. A linha representa o melhor ajuste.*

O nosso resultado apresenta uma curva de luz composta com amplitude de 0,38 mag, obtida com observações em um ângulo de fase próximo de 25° , enquanto que Warner (2015), obteve seus dados em um ângulo de fase de aproximadamente 62° , gerando uma curva de luz com amplitude de 0,41 mag. O mais interessante é que no resultado de Warner (2015), a curva exibe no primeiro máximo uma dupla elevação no formato de sela, enquanto que a nossa curva de fase apresenta uma irregularidade bastante atenuada no segundo máximo. A curva de fase de Warner pode ser vista na Figura 4.58.

Tendo em vista a variação do ângulo de fase nas duas observações, é possível que esta estrutura seja produzida por alguma irregularidade na superfície deste asteroide, que ficou mais pronunciada em um ângulo de fase maior, visto que as mudanças de ângulo de fase modificam as áreas da superfície do objeto iluminadas pelo Sol, alterando também as amplitudes das curvas de luz.

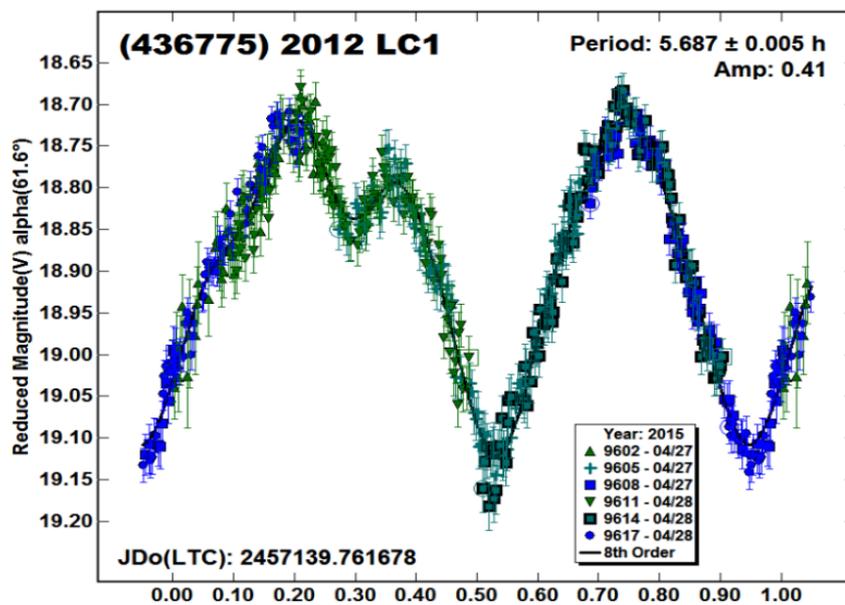


Figura 4.58: Curva de fase para 436724 (2012 LC1) retirada de Warner (2015).

4.2.18 (442243) 2011 MD11

(442243) 2011 MD11 está entre os asteroides do subgrupo Amor e foi observado por apenas duas noites em setembro de 2015, em ângulo de fase de cerca de 22° . As curvas de luz apresentam uma boa cobertura temporal, somando cerca de 6 horas de observação conforme mostrado na Figura 4.59.

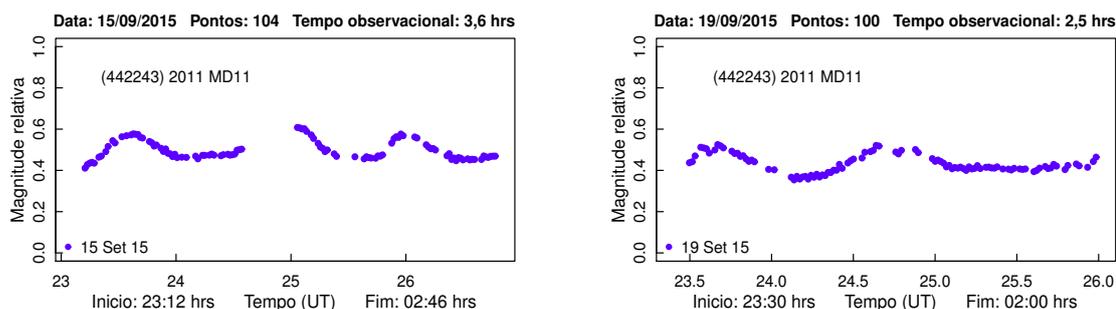


Figura 4.59: *Curvas de luz para (442243) 2011 MD11.*

O melhor resultado da análise de Fourier foi um período rotacional de $2,427 \pm 0,001$ horas com ordem 5 de ajuste e uma dispersão moderada entre as duas noites, sobretudo no segundo máximo, ocasionada provavelmente por variações atmosféricas. A curva de luz apresenta máximos e mínimos bem definidos e uma amplitude muito baixa, de cerca de 0,145 mag, indicando que o objeto tem uma forma esférica ou que foi observado em uma configuração de aspecto particular ($\theta \approx 0$). Assim, assumimos um valor de $2,427 \pm 0,001$ horas com índice de confiança 3. O resultado do ajuste é apresentado na Figura 4.60.

Este NEA também foi observado por Warner (2016b) em outubro de 2015, com $\alpha = 13^\circ$. Ele utilizou dados de três noites para determinar um período de $2,430 \pm 0,002$ horas. Este resultado está em acordo com a nossa determinação dentro dos erros estabelecidos e pode ser visualizado na Figura 4.61. Warner (2016b) argumenta que este objeto é um forte candidato a ser um asteroide binário devido às variações em sua curva de luz que, segundo o pesquisador, podem ser indícios de eventos mútuos. Outro aspecto interessante é a invariabilidade da amplitude da curva de luz, visto que este parâmetro praticamente não variou nos dois resultados apresentados, mesmo havendo variação do ângulo de fase devendo haver também uma possível variação do ângulo de aspecto. Este fato, reforça a possibilidade de que a forma do objeto seja realmente bastante esférica.

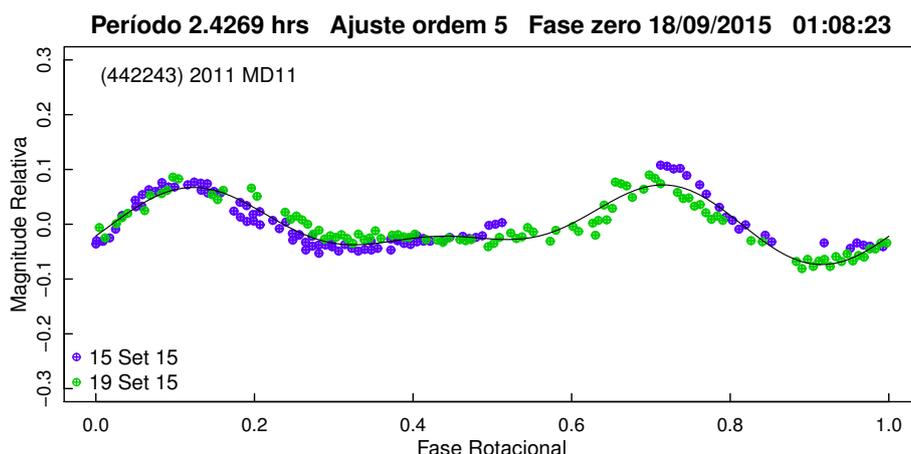


Figura 4.60: Curva de fase para (442243) 2011 MD11 sendo que a linha contínua representa o melhor ajuste.

Tendo em vista todos os aspectos apresentados, consideramos que este asteroide necessita de mais observações, tanto para refinar o seu período como para confirmar se realmente ele compõe um sistema binário. A próxima boa oportunidade para observação deste objeto será em outubro de 2019 quando terá magnitude visual de aproximadamente 17,5 mag.

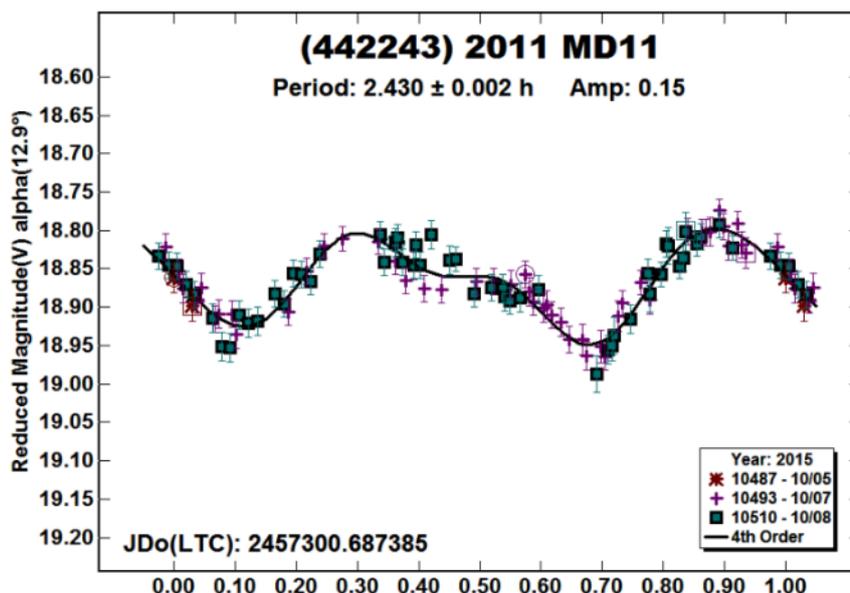


Figura 4.61: Curva de fase para (442243) 2011 MD11 retirada de Warner (2016b).

4.2.19 (450160) 2000 RM12

O asteroide (450160) 2000 RM12, do subgrupo Apollo, possui a órbita mais inclinada, com $i = 57,26^\circ$, e uma das maiores excentricidades, com $e = 0,66$, dentre os objetos da nossa amostra. Adquirimos dados fotométricos deste NEA em quatro noites de observação, num total de aproximadamente 9 horas. As curvas de luz individuais são apresentadas na Figura 4.62. Nestas curvas podemos verificar pequenas variações de brilho irregulares e também lacunas causadas pelas oscilações das condições atmosféricas.

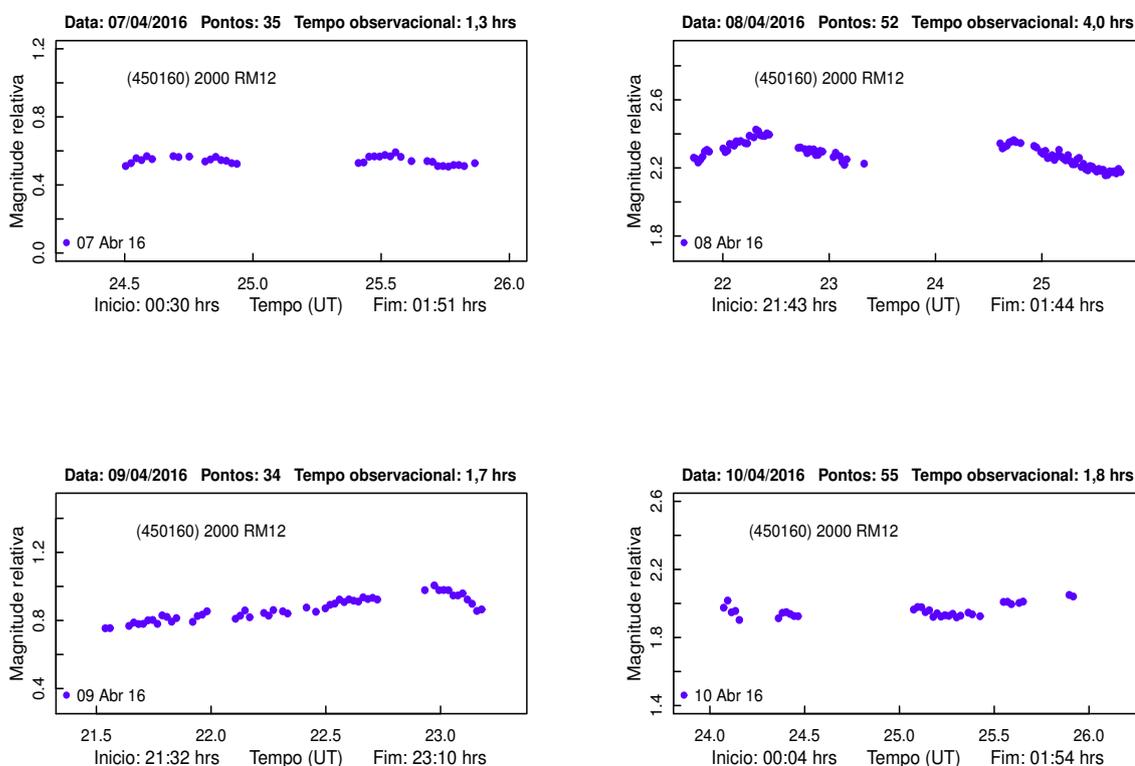


Figura 4.62: *Curvas de luz de (450160) 2000 RM12.*

Ao inspecionar as curvas de luz, notamos facilmente a presença dos máximos e indícios dos mínimos, e a partir destas características, estabelecemos que o período deste objeto estaria em torno de 5 horas. Realizamos a análise de Fourier utilizando todas as noites e determinamos seu período como sendo $4,918 \pm 0,002$ horas. Sua curva de luz composta foi ajustada com um polinômio de grau 6 e tem amplitude de cerca de 0,20 mag. As quatro noites se superpuseram bem e a curva se apresenta bem coberta com exceção do intervalo de 0,4 - 0,6 de fase rotacional, que constitui uma

provável elevação ou mínimo que não aparece totalmente coberto. Portanto, demos um índice 2 de confiança a solução encontrada. Este asteroide não tem nenhum período relatado na literatura, logo, nosso resultado é a sua primeira determinação.

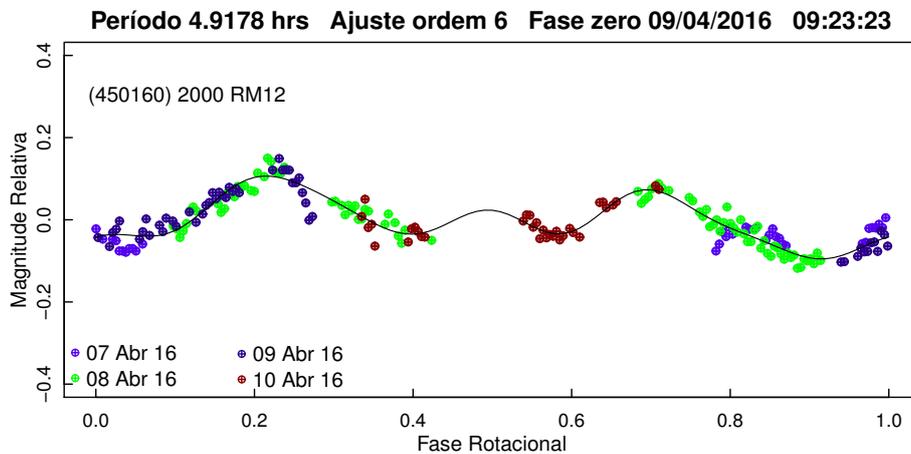


Figura 4.63: Curva de fase para (450160) 2000 RM12 com os dados de abril/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.

4.2.20 (459872) 2014 EK24

Este NEA do subgrupo Apollo, com cerca de 70 metros de diâmetro, é mais um dos objetos da nossa amostra que está na lista de potenciais alvos de missão humana da NASA (<http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/nhats>). Desta forma, pesquisas de suas propriedades físicas são atualmente requeridas. 2014 EK24 foi observado do OASI apenas na noite de 13 de março de 2015, quando ainda não tinha curva de luz nem período publicado. A noite de observação deste asteroide foi bastante nublada, o que ocasionou algumas interrupções, que por conseguinte, causaram mudanças no campo de observação. Devido este fato, não conseguimos ter as mesmas estrelas de comparação durante toda a noite, e o conjunto de imagens obtidas foi dividido em três partes. As curvas de luz individuais são mostradas na Figura 4.64.

Na época desta observação, o asteroide se movimentava muito rápido e a sua magnitude aparente já estava próxima do nosso limite observacional ($V \approx 18$). Para que a imagem do objeto não ficasse alongada, o tempo de integração foi de 80 segundos. Como pode ser notado, os pontos das curvas de luz foram praticamente todos localizados nos máximos e nos mínimos, isto por causa tanto da rotação rápida do objeto quanto dos tempos de integração somado ao de leitura do CCD e

do *download* das imagens.

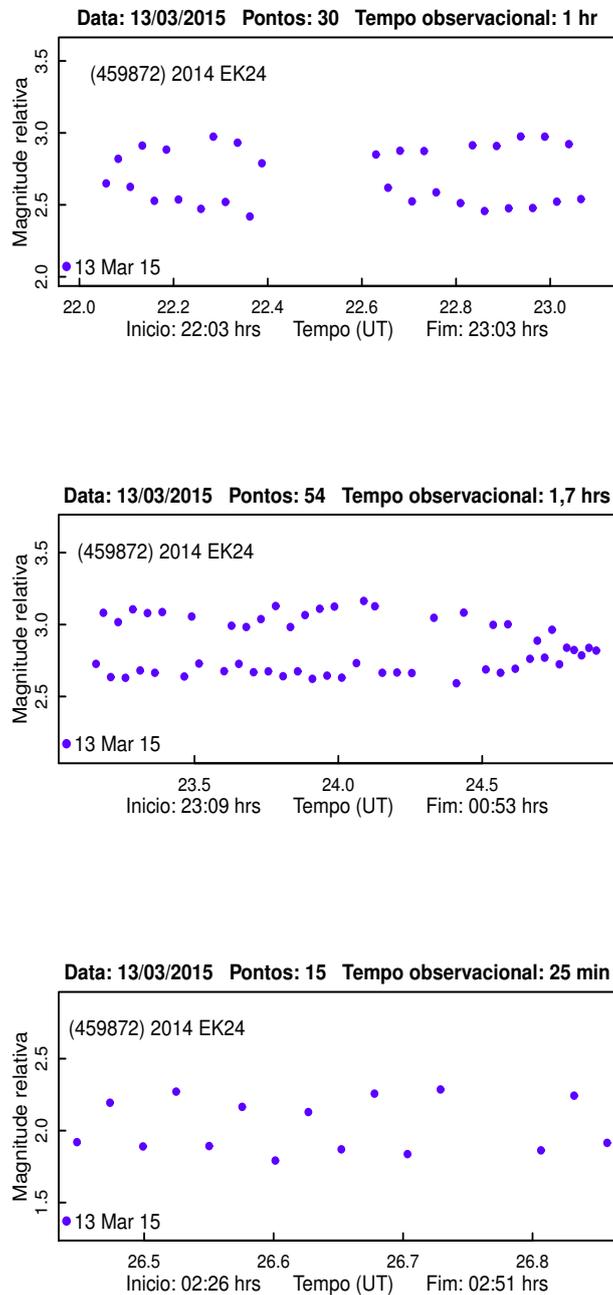


Figura 4.64: *Curvas de luz de (337069) 2014 EK24.*

Os pontos obtidos forneceram uma boa curva de luz composta, ajudada por um polinômio de grau 5, com período rotacional de $0,0998 \pm 0,0005$ horas, isto é, 6 minutos. A curva de luz composta tem uma boa cobertura, amplitude de

0,45 mag e dispersão razoável. O índice de confiança dado a este resultado foi 3. Quanto a forma da curva de luz, esta indica que se trata de um asteroide alongado e simétrico. O resultado do ajuste é mostrado na Figura 4.65. Este é o período mais curto encontrado em nossa amostra.

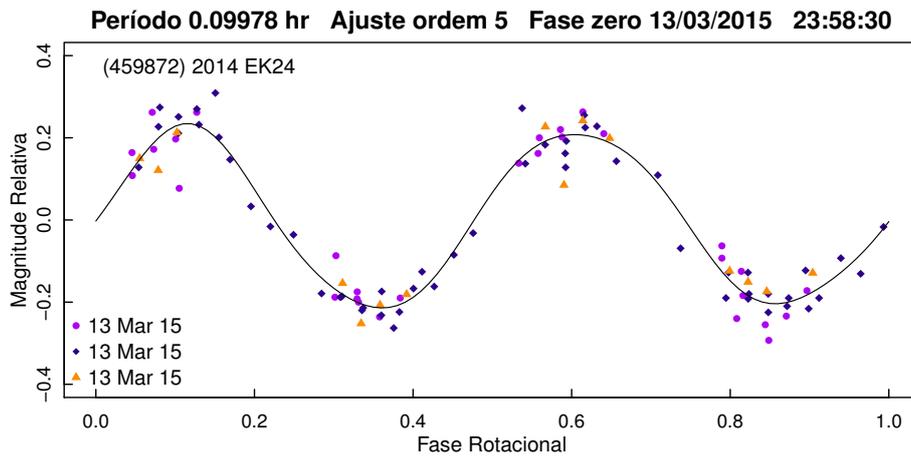


Figura 4.65: Curva de fase para (337069) 2014 EK24 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.

O período de rotação que determinamos está de acordo com o valor obtido por Godunova et al. (2016), que teve uma melhor cobertura, visto que seus dados foram coletados em 23 de fevereiro de 2015, quando o NEA teve sua máxima aproximação da Terra (cerca de 10 distâncias lunares ou 0,040 UA), permitindo usarem um tempo de exposição menor. O período rotacional determinado por Godunova et al. (2016) foi de $0,0998 \pm 0,0001$ horas e sua curva de fase é mostrada na Figura 4.66.

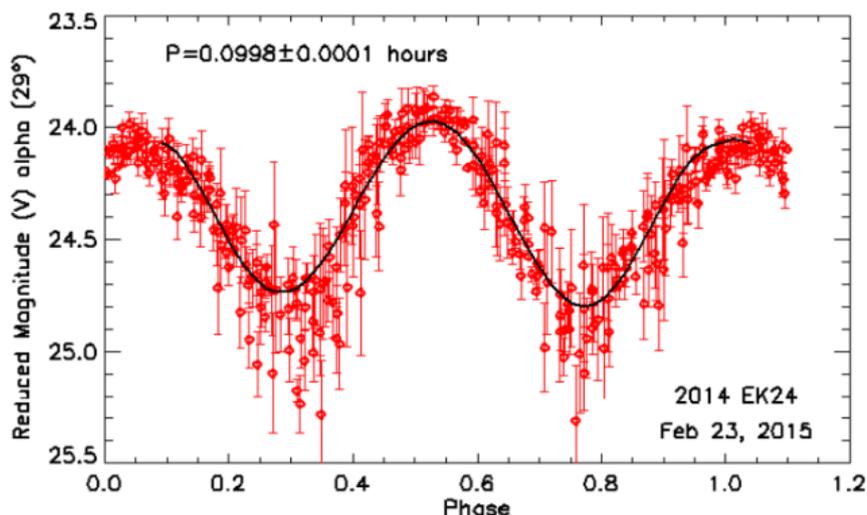


Figura 4.66: Curva de fase para (337069) 2014 EK24 reproduzida de Godunova et al. (2016).

4.2.21 1998 GL10

Integrante do subgrupo Amor, 1998 GL10 possui entre 477 m e 1,067 km de diâmetro e uma órbita altamente excêntrica ($e = 0,66$). Este NEA foi observado nos meses de janeiro e março de 2015, totalizando onze noites de observação. As curvas de luz individuais são apresentadas nas Figuras 4.67 e 4.68. As curvas de luz contém bastante ruído, visto que algumas noites tiveram nuvens, o que também reduziu a cobertura temporal. Em março, algumas noites nublavam em certos momentos, o que provocou algumas interrupções que, por conseguinte, causaram mudanças no campo de observação. Devido este fato, não conseguimos ter as mesmas estrelas de referência durante duas noites, e por isso, os conjuntos de imagens obtidas nos dias 13 e 14 foram divididas em duas partes cada um.

Realizamos a análise de série de Fourier utilizando as curvas de luz dos dias 13, 14, 19, 24 e 25 de março de 2015, as quais somam cerca de 22 horas de observação. O resultado foi um período de rotação de $5,930 \pm 0,001$ horas. A curva de luz composta foi ajustada por um polinômio de grau 5 e pode ser visualizada na Figura 4.69. Esta curva apresenta alta dispersão e amplitude muito pequena, com cerca de 0,1 mag, porém o resultado obtido apresenta máximos e mínimos relativamente bem definidos. Esta é a primeira estimativa do período para este asteroide ao que atribuímos um índice de confiança 2.

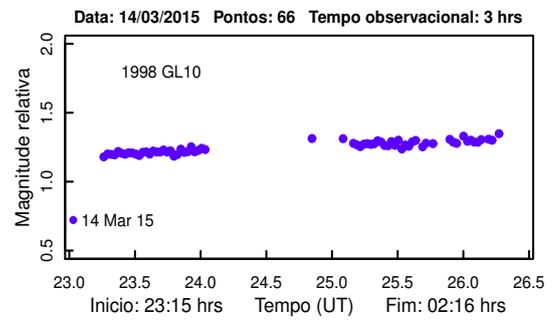
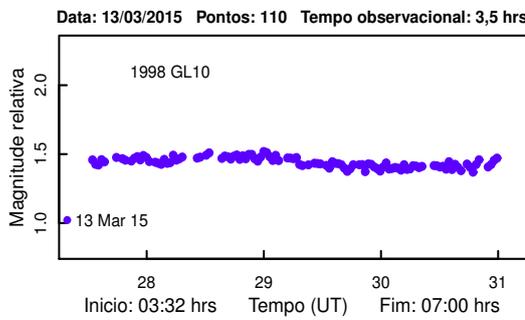
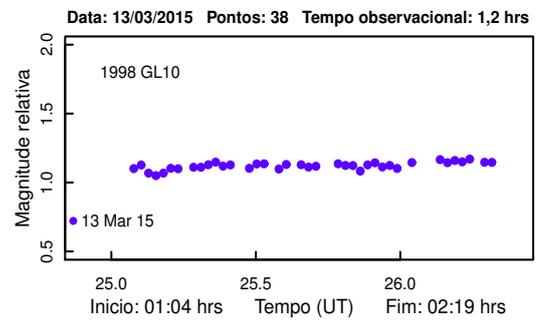
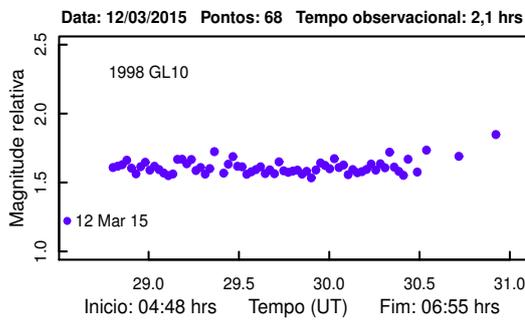
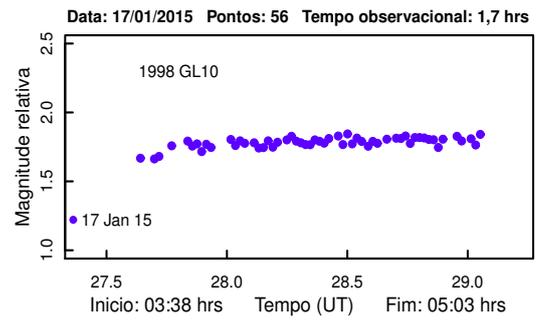
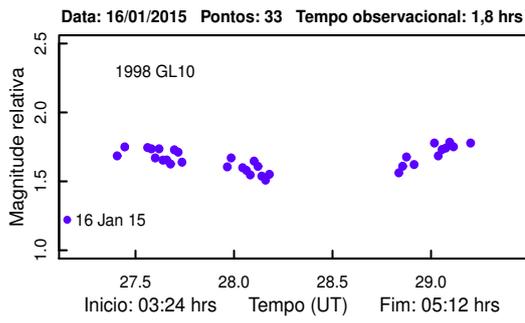


Figura 4.67: *Curvas de luz de 1998 GL10 obtidas utilizando as observações de janeiro e março/2015.*

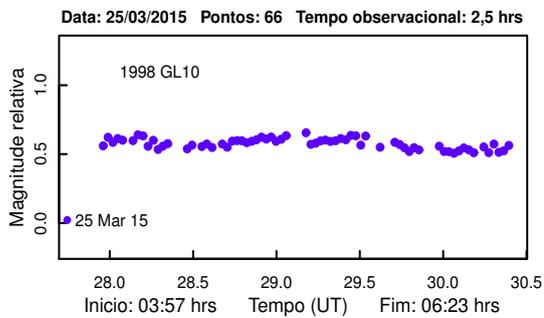
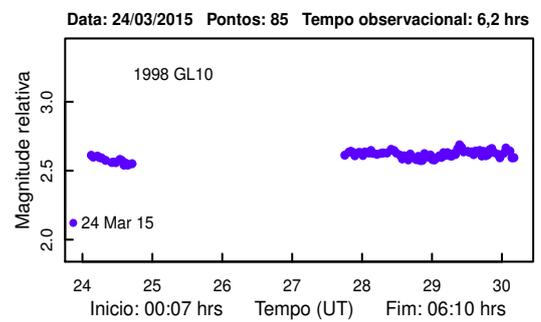
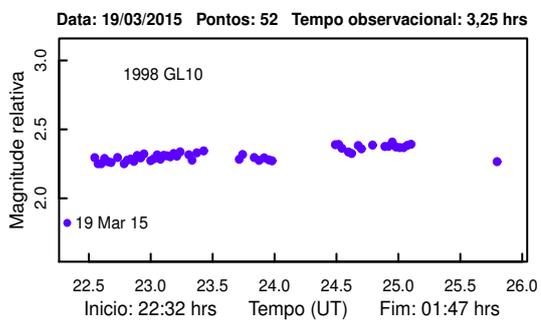
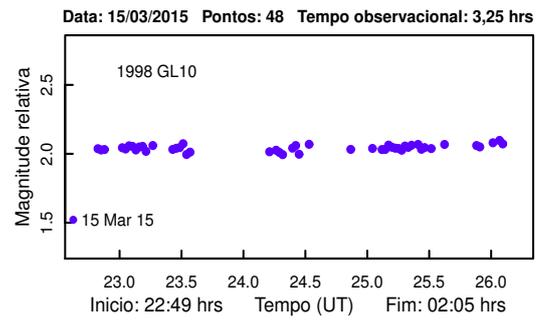
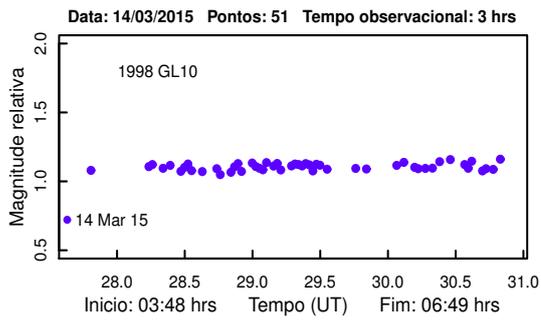


Figura 4.68: *Curvas de luz de 1998 GL10 obtidas utilizando as observações de março/2015*

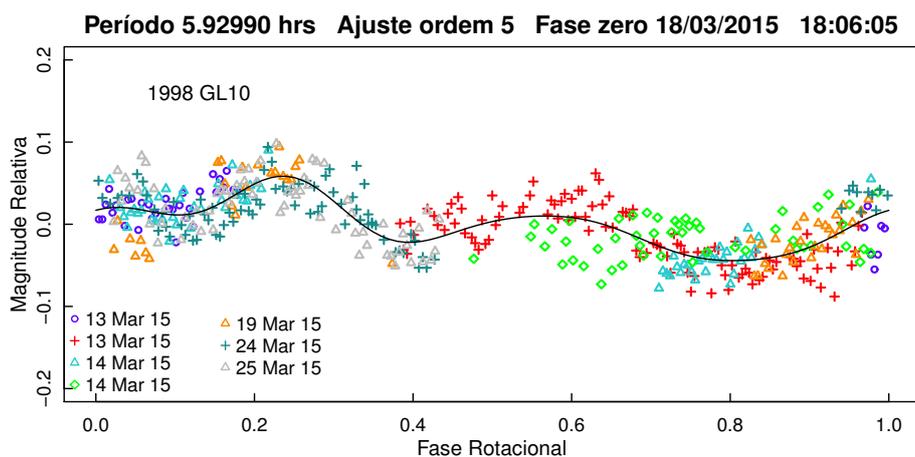


Figura 4.69: Curva de fase para 1998 GL10 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.

4.2.22 2015 CA1

Este NEA do subgrupo Amor, descoberto em 9 de fevereiro de 2015, é um dos objetos mais excêntricos da nossa amostra. 2015 CA1 tem diâmetro estimado entre 228 - 511 metros e foi observado por cinco noites durante a temporada observacional de março de 2015. As noites de observação dos dias 12 e 15 de março foram interrompidas em alguns momentos devido à passagem de nuvens, e por isso não conseguimos ter as mesmas estrelas de comparação durante todo o intervalo de observação. Assim, o conjunto de imagens obtidas nestas noites foi dividido em duas partes. Foi possível ter uma melhor cobertura temporal contínua na noite do dia 19 de março, enquanto que as duas noites seguintes não foram aproveitadas em razão da má qualidade das imagens. As curvas de luz individuais são apresentadas na Figura 4.70.

Realizamos a análise de Fourier utilizando todas as curvas de luz obtidas, com exceção da segunda curva do dia 15. Determinamos um período de rotação de $2,949 \pm 0,002$ horas com ajuste de grau 5. Os pontos obtidos forneceram uma boa curva de luz composta, que apresenta máximos e mínimos bem definidos e baixa dispersão. Esta curva tem amplitude de aproximadamente 0,49 mag, e sua forma indica um objeto oblato com uma de suas faces mais plana do que sua face oposta, visto que um dos máximos apresenta menor brilho e maior duração, como pode ser notado pelo resultado representado na Figura 4.71. Este resultado é a primeira determinação do período rotacional deste asteroide. Atribuimos ao valor

determinado um índice de confiança 3.

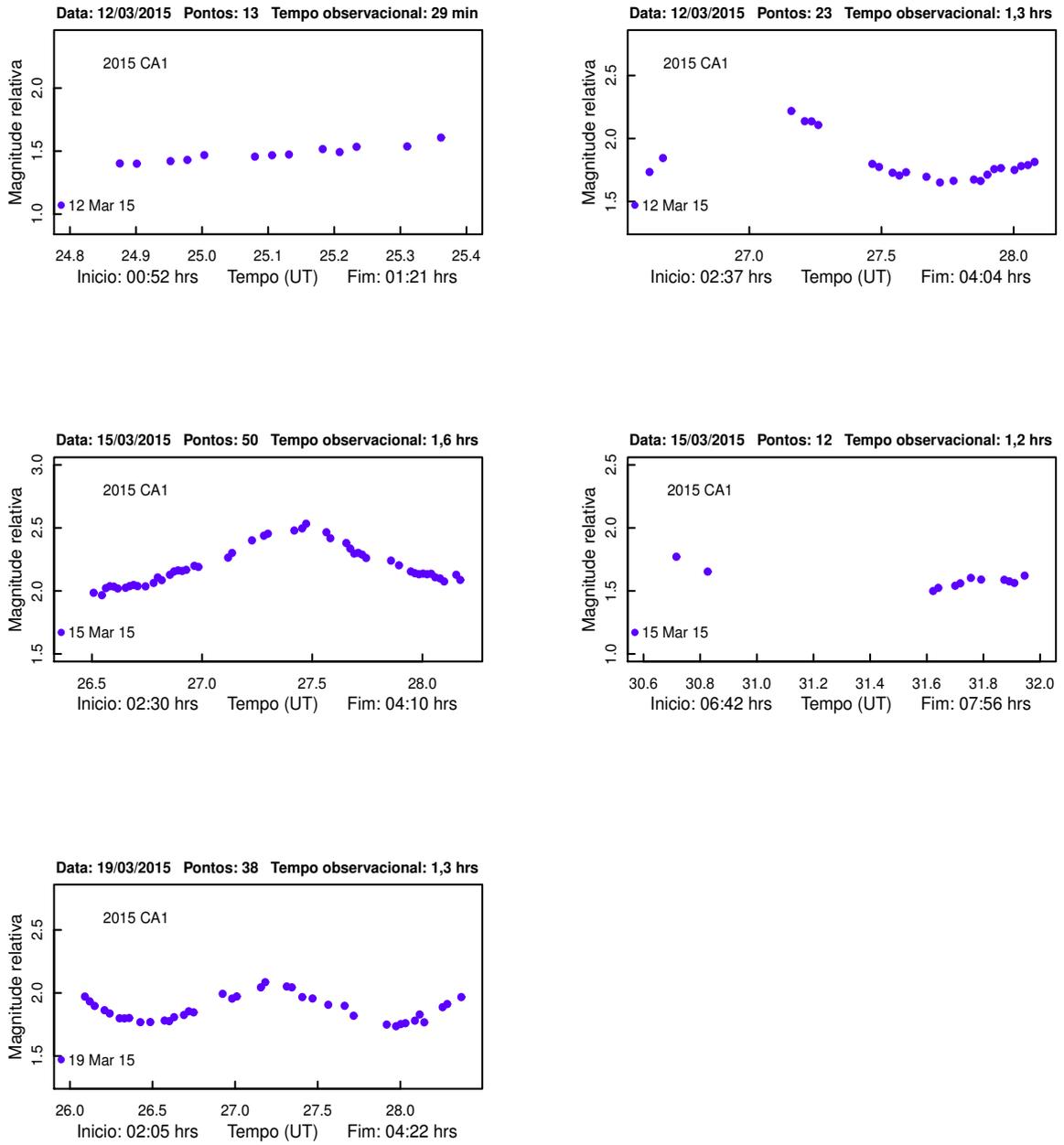


Figura 4.70: *Curvas de luz de 2015 CA1.*

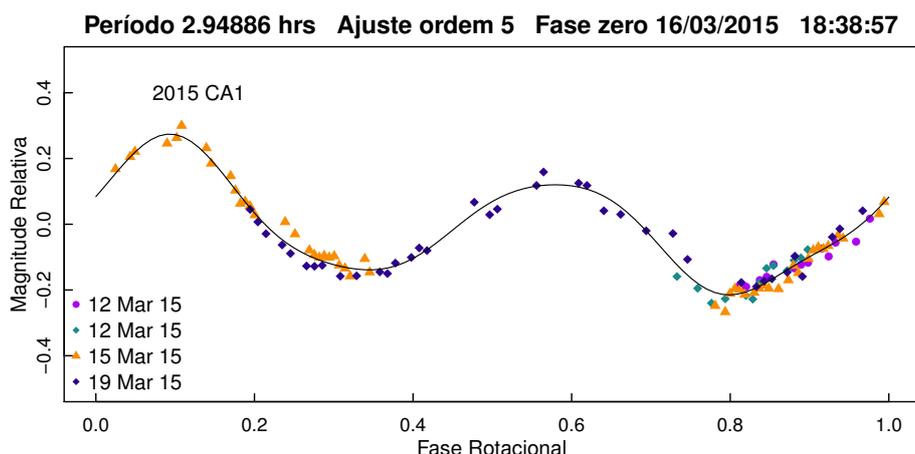


Figura 4.71: Curva de fase para 2015 CA1 com os dados de março/2015. A linha representa o melhor ajuste.

4.2.23 2015 FS332

Descoberto no dia 29 de março de 2015, o asteroide 2015 FS332 do subgrupo Apollo, também classificado como um PHA, possui entre 600 - 1400 metros de diâmetro e uma das órbitas mais inclinadas da nossa amostra, com $i = 35,12^\circ$. As observações fotométricas deste objeto ocorreram durante a temporada de observação do mês de outubro de 2015, quando foram coletados dados por quatro noites, com α de aproximadamente 45° . Ao verificar visualmente as curvas de luz individuais, mostradas na Figura 4.72, percebe-se que em duas noites foi possível ter a cobertura completa do período de rotação, enquanto que nas outras duas tivemos momentos de interrupção da observação devido à passagem de nuvens.

Utilizamos todos os dados obtidos para realizar a análise de série de Fourier. O melhor ajuste encontrado resultou um período de $2,401 \pm 0,002$ horas com índice de confiança 3. As noites utilizadas para a realização desta análise se superpõem bem para formar a curva de luz composta, com dispersão moderada e amplitude de aproximadamente 0,49 mag. Esta curva foi ajustada por um polinômio de ordem 6, sendo esta solução representada na Figura 4.73. O ângulo de fase durante a temporada de observação variou muito pouco, cerca de 4° , porém esta pequena mudança pode ser um dos fatores que influenciaram a dispersão notada na curva de luz composta.

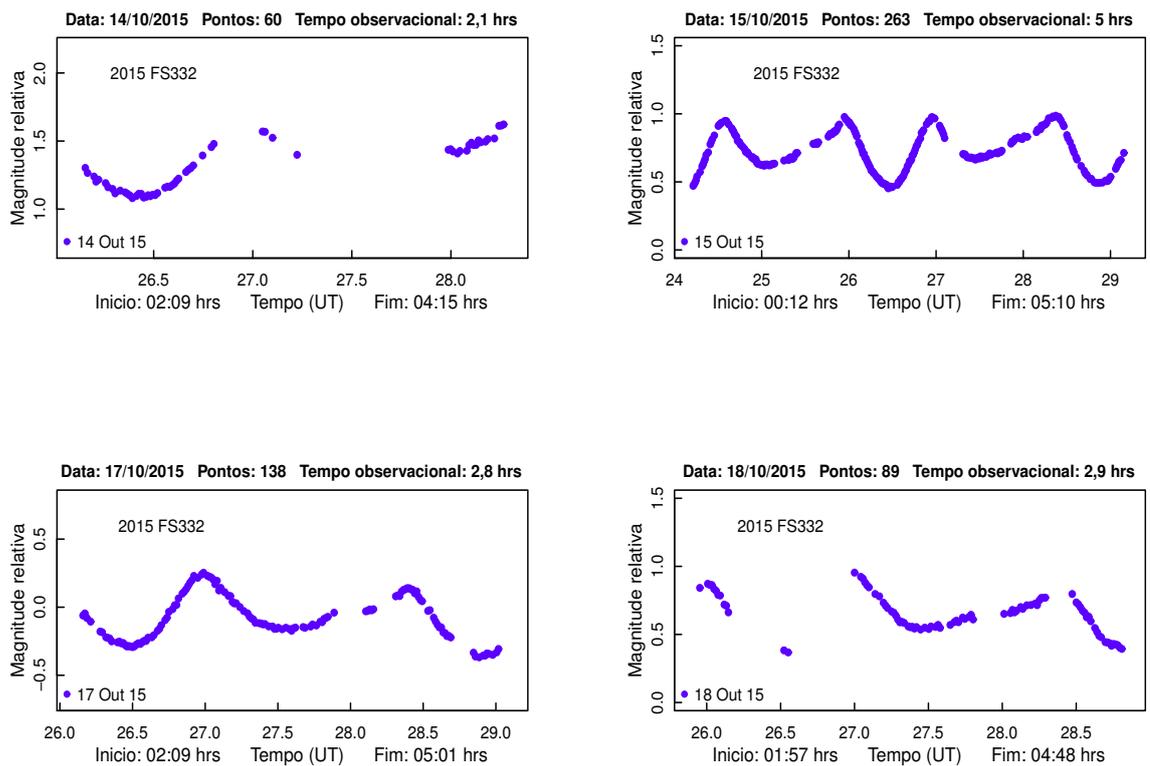


Figura 4.72: *Curvas de luz de 2015 FS332.*

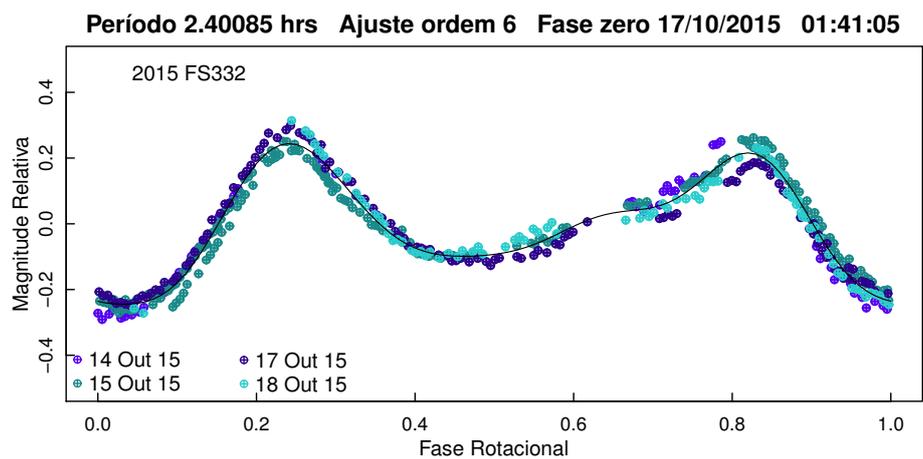


Figura 4.73: *Curva de fase para 2015 FS332 utilizando as observações de outubro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

Dois valores de período de rotação aparecem publicados para este objeto. Godunova et al. (2016) determinou um valor de $2,401 \pm 0,003$ horas utilizando dados de uma única noite de setembro de 2015, quando o objeto estava perto de sua máxima aproximação com a Terra, a qual ocorreu no dia 4 de outubro de 2015 alcançando uma distância de 0,047 UA do nosso planeta. Um valor semelhante, de $2,406 \pm 0,001$ horas, foi obtido por Warner (2016a), a partir de dados obtidos no dia 02 de outubro de 2015. Embora todos resultados sejam similares, o nosso resultado é apenas consistente com o valor obtido por Godunova et al. (2016), dentro da barra de erros. Ao inspecionar as curvas de luz dos trabalhos citados, as quais são mostradas nas Figuras 4.75 e 4.74, notamos diferenças significativas nas suas formas provocadas provavelmente por mudanças no ângulo de fase.

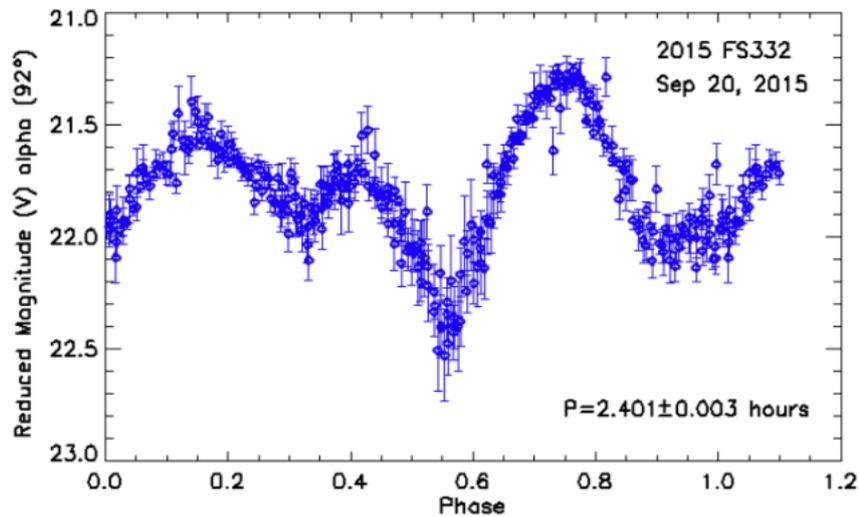


Figura 4.74: *Curva de fase para 2015 FS332 retirada de Godunova et al. (2016).*

Nossos dados foram obtidos com ângulo de fase de aproximadamente 45° , os de Warner (2016a) com 65° e os de Godunova et al. (2016) com 92° , o que produziu curvas de luz com amplitudes de 0,49, 0,65 e 0,83 mag, respectivamente. Sendo assim, é notável que a variação do ângulo de fase proporcionou variações significativas nas amplitudes das curvas apresentadas. Além disto, as amplitudes das curvas de luz relatadas por estes trabalhos indicam que este é um dos objetos mais alongados da nossa amostra, sendo possível também verificar uma provável irregularidade da superfície deste asteroide, observada na curva de fase de Godunova et al. (2016) entre a fase 0,3 e 0,5, visível provavelmente em razão da geometria da observação.

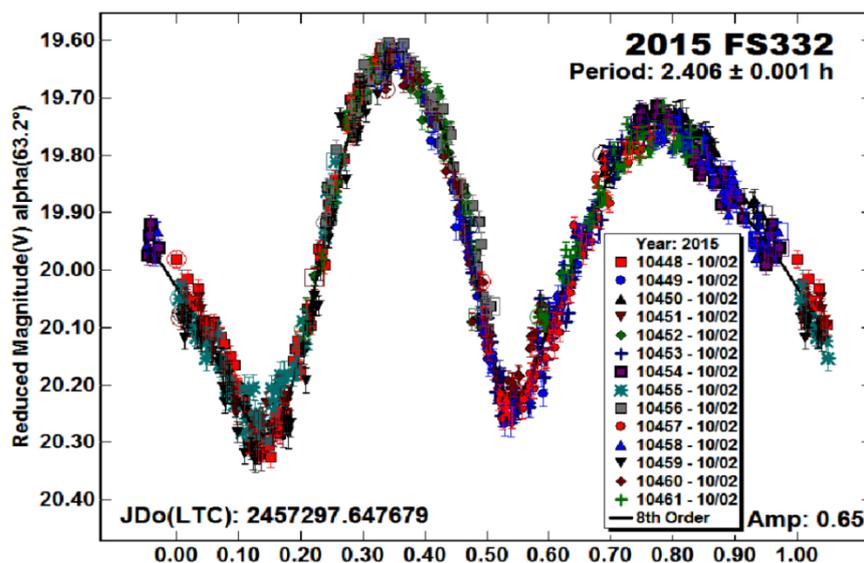


Figura 4.75: Curva de fase para 2015 FS332 retirada de Warner (2016a).

4.2.24 2016 HL

Este objeto foi descoberto no dia 19 de abril de 2016 e faz parte dos Apollo. 2016 HL também é classificado como um PHA em razão do seu tamanho e da aproximação da sua órbita com a da Terra, tendo alcançado uma distância mínima de intersecção da órbita da Terra de 0,05 UA no dia 12 de abril de 2016. Este NEA foi observado por três noites na temporada de observação de maio de 2016, somando cerca de 8,5 horas. As curvas de luz individuais estão apresentadas na Figura 4.76.

Ao examinar visualmente as curvas de luz, percebemos regiões carentes de pontos devido às interrupções causadas pelas mudanças nas condições atmosféricas. Entretanto, a curva do dia 8 de maio revela uma cobertura próxima de um ciclo de rotação completa, e por isso, realizamos a busca pelo período num intervalo de 2 a 4 horas utilizando as três noites observadas.

O valor do período fornecido por nossa análise foi de $2,930 \pm 0,002$ horas com um ajuste de ordem 4, apresentado na Figura 4.77. Obtivemos uma boa curva de luz composta com amplitude pequena de cerca de 0,15 mag. Ela tem dispersão razoável e uma pequena região, um possível mínimo, não coberta pelos pontos. A pequena amplitude da curva de luz sugere que o objeto tem uma forma bastante esférica ou que foi observado em uma configuração de aspecto muito particular. Dessa forma, foi atribuído um índice de confiança 2 ao período determinado. Não encontramos nenhum valor de período publicado para este objeto, sendo o nosso resultado a sua

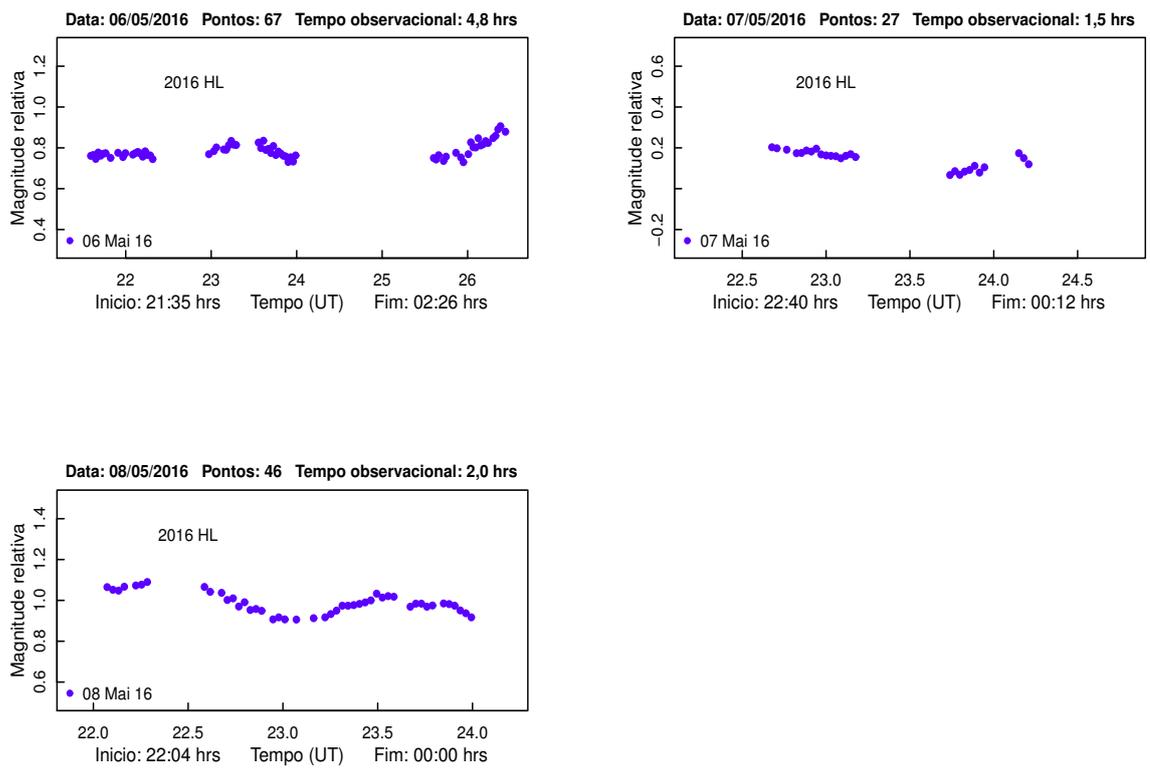


Figura 4.76: *Curvas de luz de 2016 HL.*

primeira estimativa.

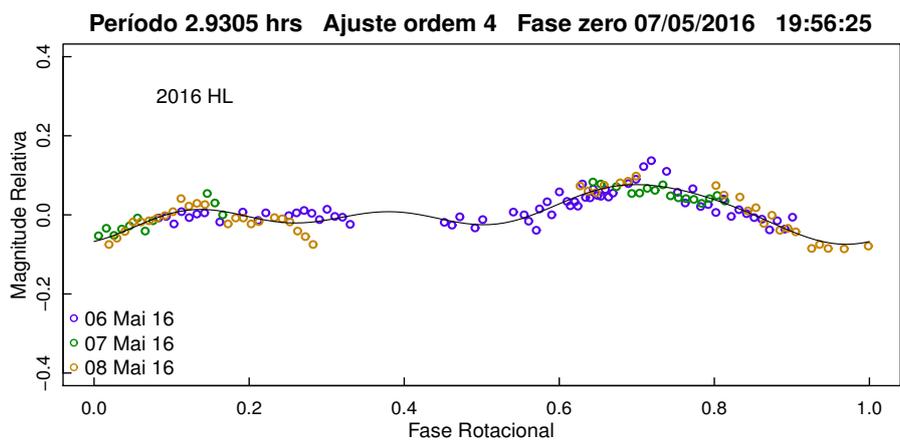


Figura 4.77: *Curva de fase para 2016 HL utilizando as observações de maio/2016. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

4.3 Curvas de luz incompletas

Para alguns dos NEA estudados os dados obtidos não foram suficientes para a obtenção de uma boa curva de luz composta. Para alguns destes objetos, realizamos análises de Fourier e apresentamos aqui valores de períodos rotacionais tentativos. Para outros, temos apenas curvas de luz individuais com alguma variação, às vezes nos permitindo fazer uma estimativa do período de rotação do asteroide. Na maioria dos casos, os objetos possuem curvas de luz incompletas porque devem possuir períodos rotacionais longos. Ressaltamos a necessidade de mais observações dos objetos apresentados a seguir a fim de serem determinados os seus períodos rotacionais com maior grau de confiabilidade. Para os asteroides apresentados nesta seção, demos o índice de confiança 1.

4.3.1 (9400) 1994 TW1

Este asteroide foi observado durante a temporada de observação de setembro de 2015 por quatro noites consecutivas. Este NEA faz parte dos objetos do subgrupo Amor e possui um dos maiores diâmetros da nossa amostra. Mesmo tendo cerca de 20 horas totais de acompanhamento deste asteroide, não foi possível determinar um período satisfatório para ele. As curvas de luz individuais apresentam pouca variação e não nos permitem a visualização de máximos e mínimos que nos forneça uma melhor indicação do valor do período de rotação. As curvas de luz estão expostas na Figura 4.78. Assim, podemos apenas concluir que este asteroide deve possuir um período longo, provavelmente superior a 20 horas.

Um valor para o período de rotação deste asteroide foi estimado por Warner (2016a), o qual obteve um valor de $82,8 \pm 0,5$ horas utilizando dados coletados durante doze noites em agosto e setembro de 2015. Este resultado está representado na Figura 4.79. Warner (2016a) argumenta que provavelmente este asteroide tem a direção do seu eixo de rotação precessando (*tumbling*), devido ao fato de que as inclinações das noites individuais não seguem a mesma inclinação do modelo de curva do ajuste de Fourier.

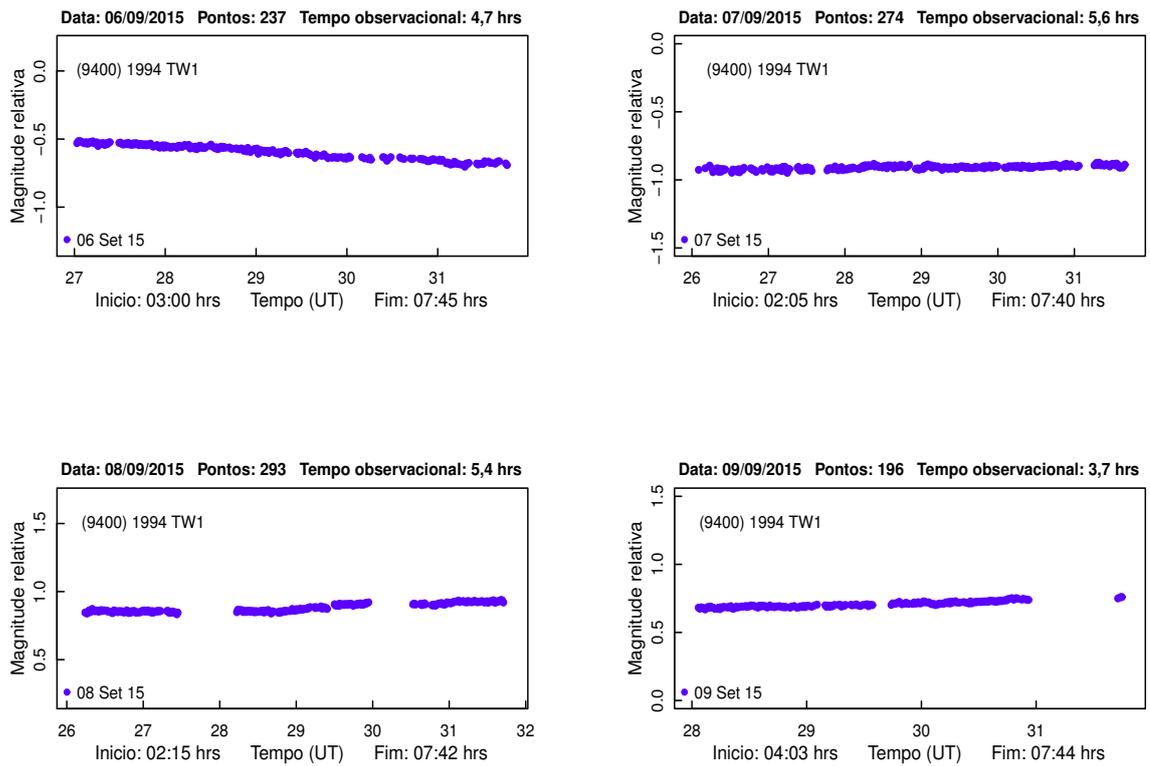


Figura 4.78: *Curvas de luz de (9400) 1994 TW1 utilizando as noites de setembro/2015.*

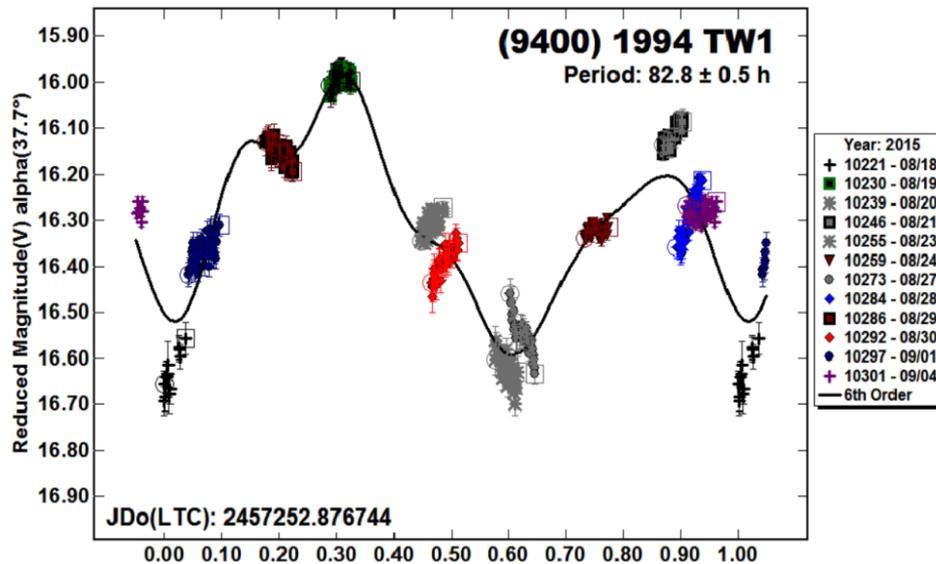


Figura 4.79: *Curva de fase para (9400) 1994 TW1 retirada de Warner (2016a).*

4.3.2 (86666) 2000 FL10

Este NEA, que faz parte dos Apollos, é um dos objetos da nossa amostra cuja órbita tem altas excentricidade e inclinação. As observações de (86666) 2000 FL10 foram realizadas durante cinco noites nas temporadas observacionais de setembro e outubro de 2015. As curvas de luz obtidas a partir destas observações são dadas na Figura 4.80.

As duas curvas de luz de setembro apresentam variações de cerca de 0,1 mag numa configuração bastante retilínea, não nos permitindo qualquer indicação sobre o período do asteroide. Em outubro, obtivemos três curvas de luz que cobriram um total de cerca de 15 horas de observação, porém, novamente não foi possível determinar o período, pois apesar de duas delas apresentarem aparentemente um máximo, falta alguma indicação dos mínimos para termos um indicativo do período de rotação. Dessa forma, a partir do nosso conjunto de dados, concluímos que o período deste asteroide deve ser maior do que 15 horas.

Uma estimativa do período deste asteroide foi publicado por Warner (2016a), o qual relata um valor muito longo de 206 ± 5 horas a partir de dados obtidos em agosto e setembro de 2015. Ele menciona que várias soluções são possíveis dentro de um intervalo de 35 a 250 horas e que este asteroide é também provavelmente um *tumbling*.

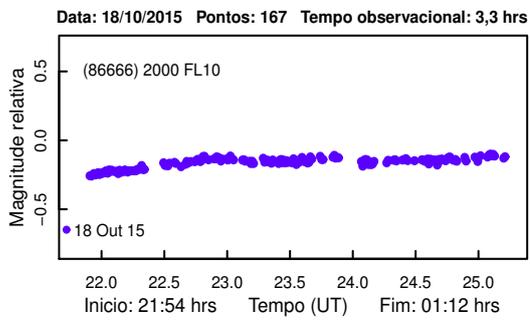
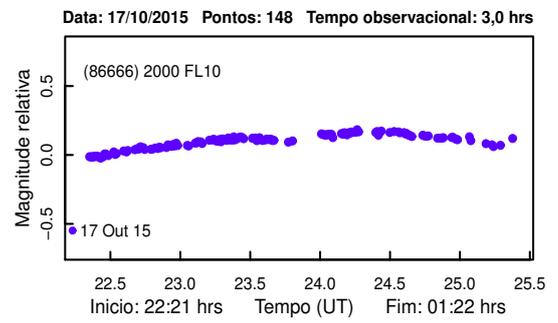
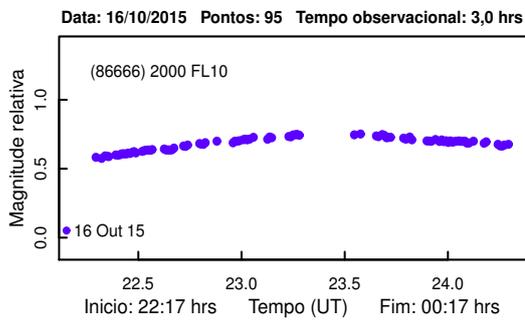
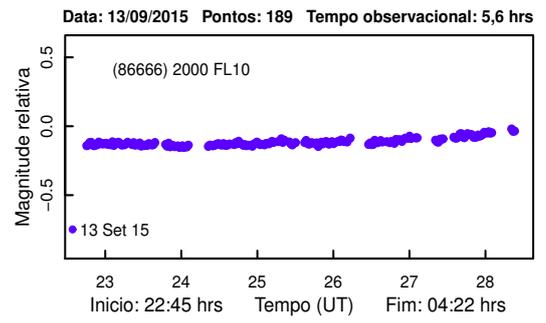
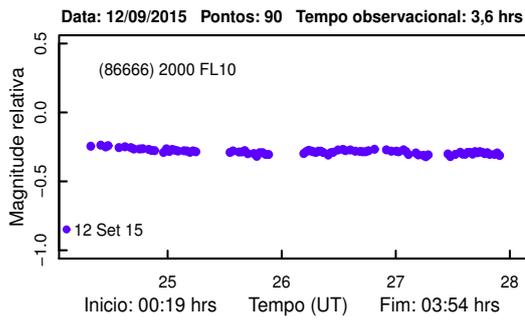


Figura 4.80: *Curvas de luz de (86666) 2000 FL10 utilizando as noites de setembro e outubro/2015.*

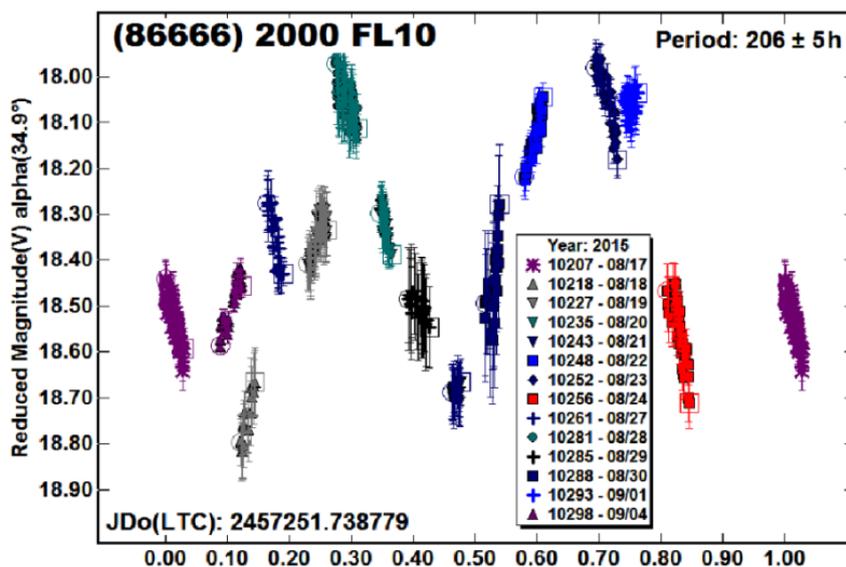


Figura 4.81: Curva de fase para (86666) 2000 FL10 retirada de Warner (2016a).

4.3.3 (152679) 1998 KU2

Este NEA do subgrupo Apollo é um dos maiores objetos da nossa amostra, com diâmetro de 4,7 km (Mainzer et al., 2011). As observações deste objeto ocorreram nos meses de junho, julho e setembro de 2015, somando sete noites de observação, sendo uma no mês de junho, duas em julho, e quatro noites consecutivas em setembro. Nos dois primeiros meses, tivemos o intervalo de observação reduzido por causa de problemas com a cúpula e de condições atmosféricas desfavoráveis. As curvas de luz das noites de junho e julho são mostradas na Figura 4.82 e as de setembro são na Figura 4.83.

Realizamos uma análise de série de Fourier utilizando o conjunto de curvas de luz de setembro, que somam um total de aproximadamente 9 horas de observação. Os pontos obtidos forneceram uma curva de luz composta, ajustada por um polinômio de grau 4, com período de $19,190 \pm 0,001$ horas. A curva de luz composta aparece com pontos bastante espaçados, mostrando que a cobertura foi bastante deficiente.

Alguns resultados recentes são encontrados para o período rotacional de (152679) 1998 KU2. Um resultado não definitivo foi relatado por Clark (2016), que estimou um período rotacional de $4,48 \pm 0,01$ horas, derivado a partir de dados observacionais adquiridos em junho de 2015. Porém, nossos dados obtidos neste mesmo mês, mostram apenas uma diminuição no brilho por cerca de 4,2 horas, o que mostra que o período determinado por Clark (2016) deve estar errado. A curva de luz que obtivemos para a noite de junho é mostrada na Figura 4.82 e a

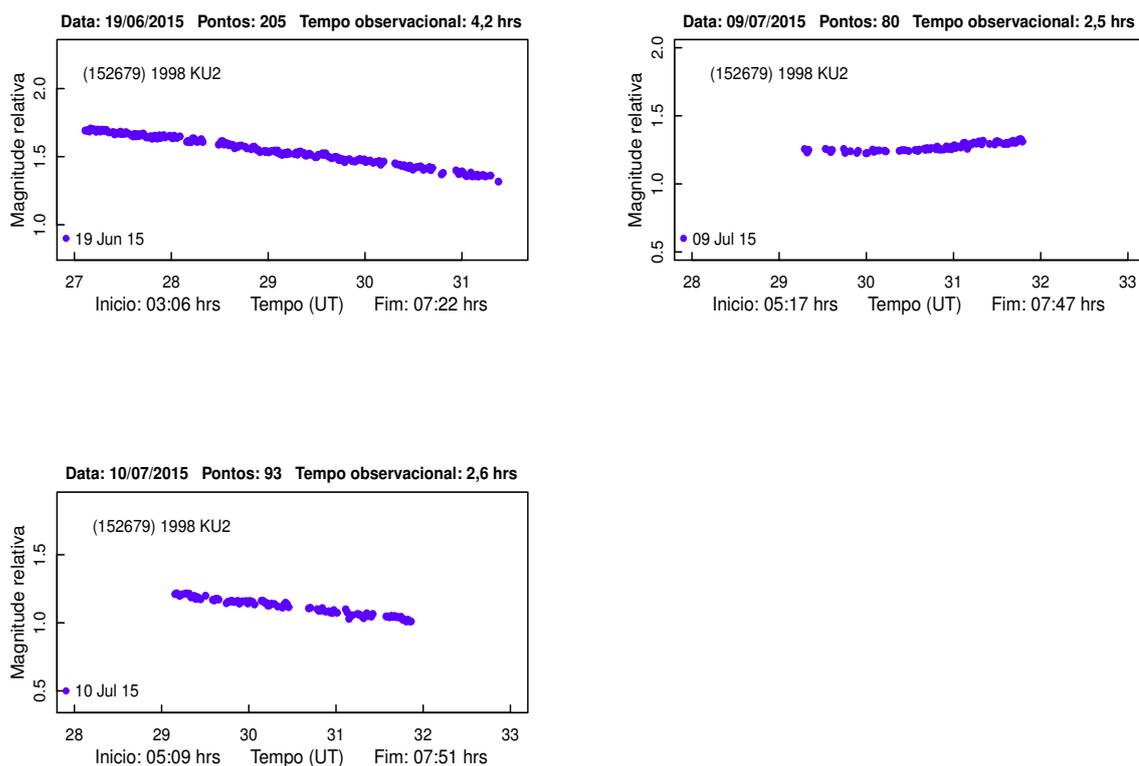


Figura 4.82: *Curvas de luz de (152679) 1998 KU2 de junho e julho/2015.*

curva de fase de Clark (2016) é dada na Figura 4.85. Como pode ser verificado, a curva de luz apresentada por Clark (2016) apresenta alta dispersão, o que pode ter provocado o ajuste incorreto.

Outro resultado não conclusivo é dado por Warner (2016b), que estima um período longo de 125 ± 5 horas. Esta solução é mostrada na Figura 4.86. Além disso, o pesquisador argumenta que este asteroide é um forte candidato a ter a direção do eixo de rotação precessante, visto que alguns conjuntos de dados apresentam inclinações contrárias à curva do modelo de Fourier. Salientamos que, uma das características de um asteroide com a direção do seu eixo de spin precessando, ou *tumbling*, é a mudança no valor do período dado por variações em suas curvas de luz. Porém, até o momento existem apenas duas publicações de estimativas do período de rotação deste objeto, portanto, novas observações são necessárias para se confirmar a possível precessão.

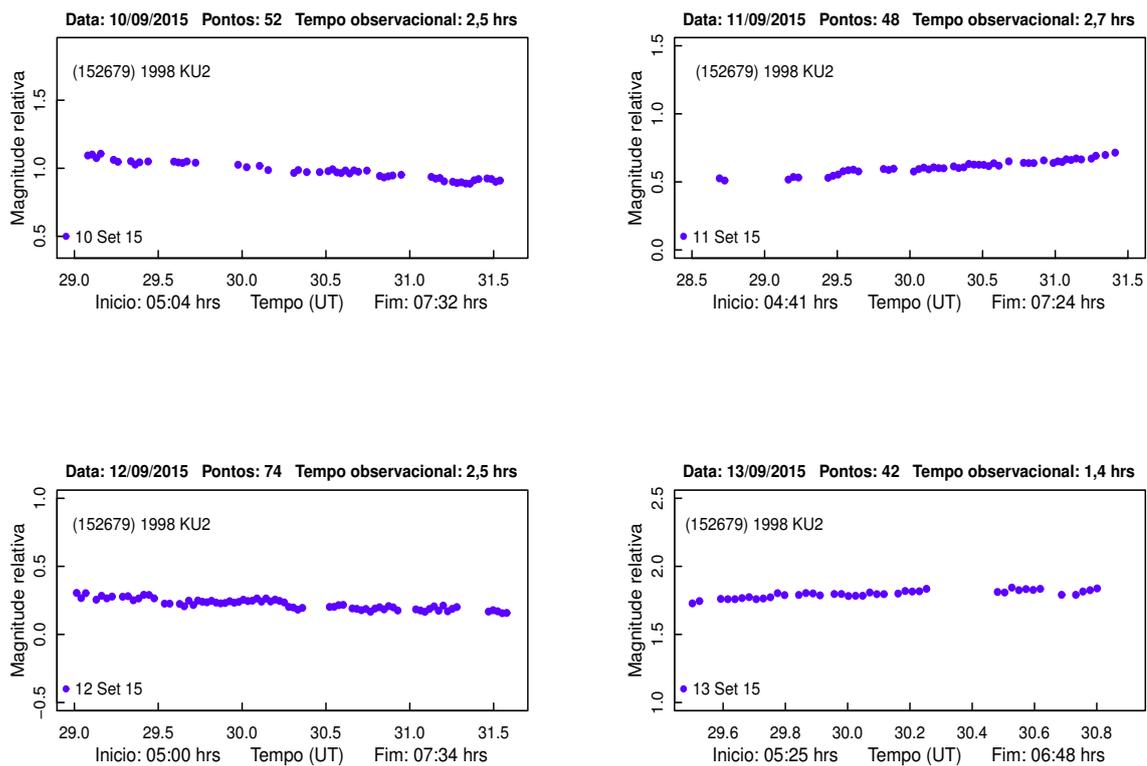


Figura 4.83: *Curvas de luz de (152679) 1998 KU2 de setembro/2015.*

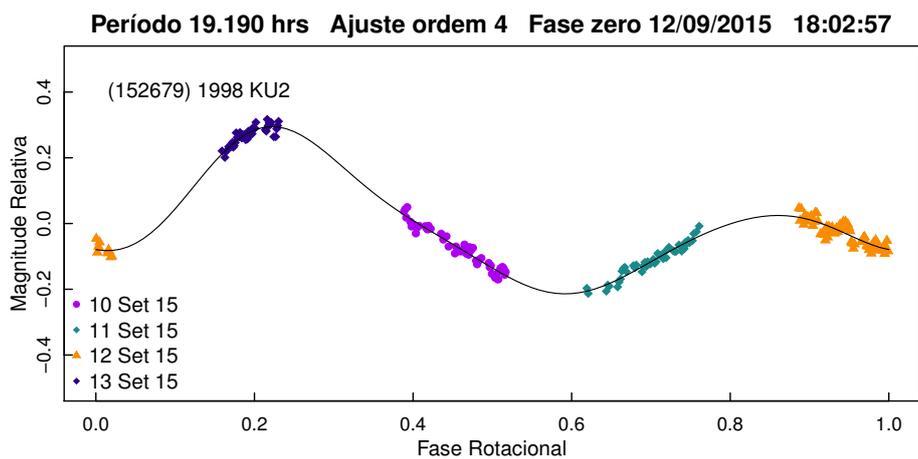


Figura 4.84: *Curva de fase para (152679) 1998 KU2 utilizando observações de setembro/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

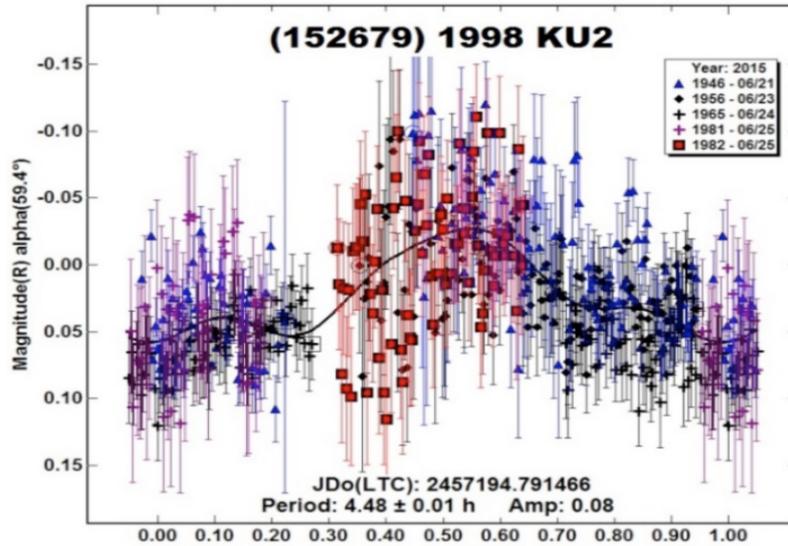


Figura 4.85: Curva de fase para (152679) 1998 KU2 retirada de Clark (2016).

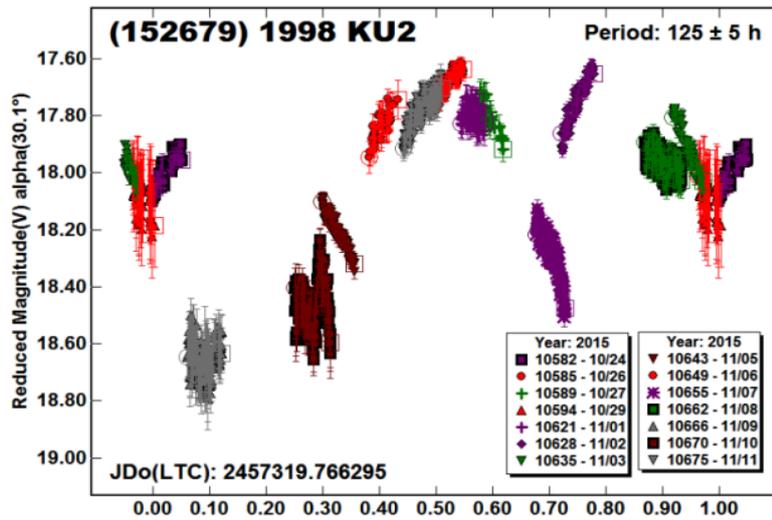


Figura 4.86: Curva de fase para (152679) 1998 KU2 retirada de Warner (2016b).

4.3.4 (154807) 2004 PP97

O asteroide (154807) 2004 PP97, integrante do subgrupo Apollo, foi observado durante três noites em outubro de 2015, num total de cerca de 7 horas de acompanhamento. As curvas de luz são mostradas na Figura 4.87. A primeira curva de luz apresenta um possível máximo e início de um mínimo, e as outras duas, apresentam apenas uma fraca diminuição de brilho. Portanto, com estes dados podemos apenas afirmar que possivelmente o asteroide tem um período maior do que 4 horas.

Warner (2016a) estima um período bastante longo de 164 ± 2 horas a partir de 13 noites de observações em setembro de 2015. O resultado é mostrado na Figura

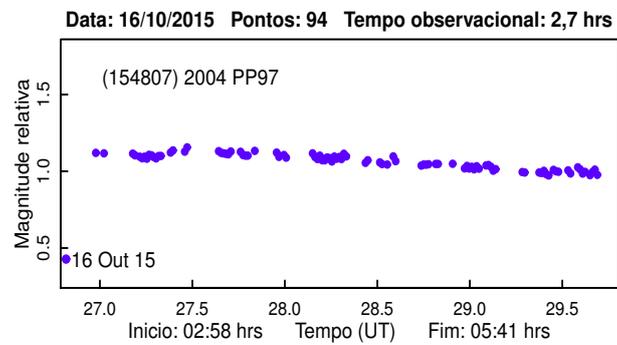
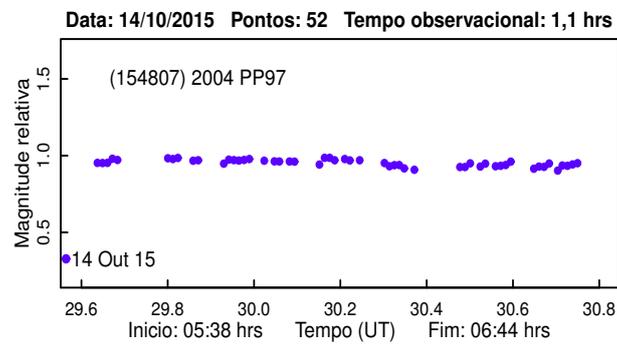
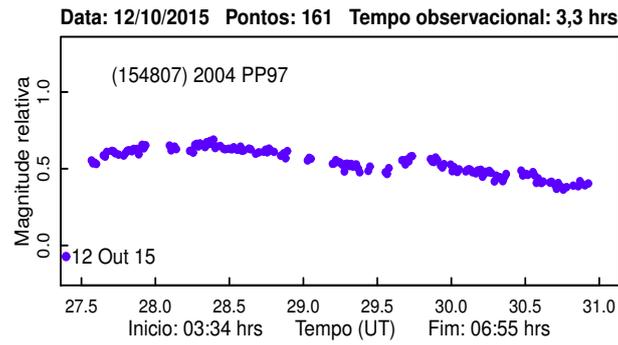


Figura 4.87: *Curvas de luz para (154807) 2004 PP97.*

4.88. Para Warner (2016a), este NEA também apresenta indícios de *tumbling* em sua curva de luz, especificamente no conjunto de pontos de 21 e 24 de setembro, os quais mostram inclinações contrárias à curva do modelo de Fourier.

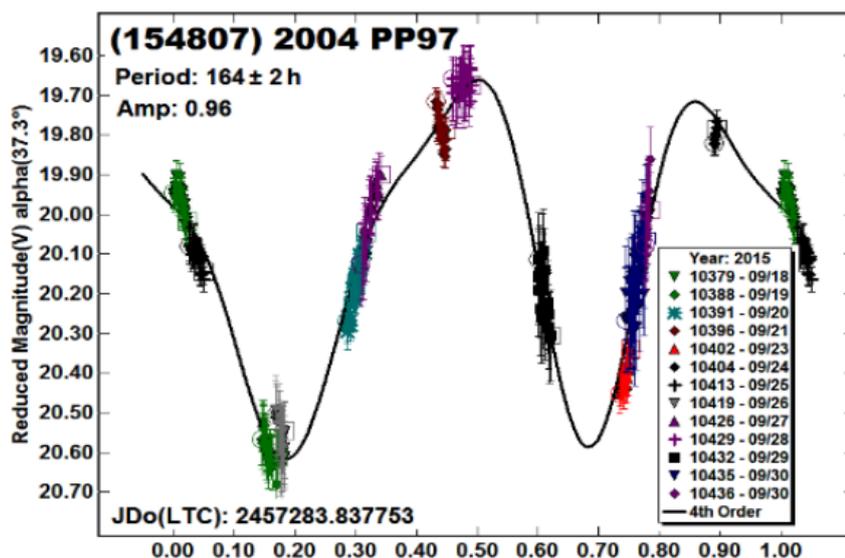


Figura 4.88: Curva de fase para (154807) 2004 PP97 retirada de Warner (2016a).

4.3.5 (189008) 1996 FR3

Este asteroide, que é um integrante do subgrupo Apollo, possui a órbita mais excêntrica da nossa amostra, com $e = 0,80$. (189008) 1996 FR3 foi observado por apenas uma noite, em 21 de abril de 2015, durante cerca de 4 horas. A curva de luz mostrada na Figura 4.89, revela um ciclo quase completo de rotação do asteroide.

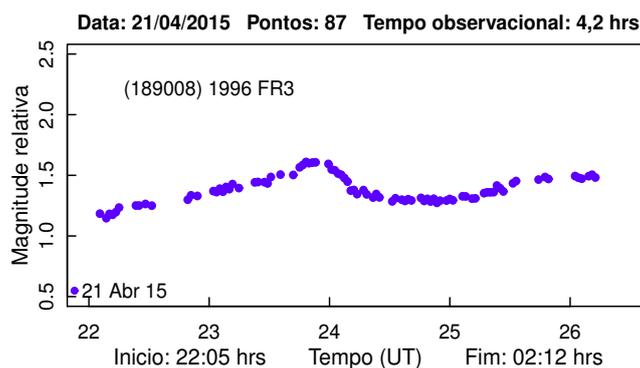


Figura 4.89: Curva de luz de (189008) 1996 FR3 de uma noite de abril/2015.

A partir desta única observação foi possível determinar um período de rotação tentativo de $4,770 \pm 0,003$ horas. A curva de luz foi ajustada por um polinômio de grau 6 e tem amplitude de 0,43 mag. O ajuste dado aos pontos pode ser verificado

através da Figura 4.90. Esta curva de luz apresenta apenas um máximo e um mínimo bem definidos, o que torna este resultado bastante impreciso.

Para este NEA, existe apenas uma curva de luz publicada até o momento. Warner (2015) obteve um resultado de $5,36 \pm 0,02$ horas para período rotacional deste asteroide, utilizando dados observacionais de março de 2015. A amplitude da curva de luz é de 0,57 mag, indicando um objeto bastante alongado. A solução de Warner está representada pela Figura 4.91. Esta curva de fase apresenta uma dispersão relativamente alta, porém, tem uma cobertura bastante confiável em razão da grande quantidade de pontos observados.

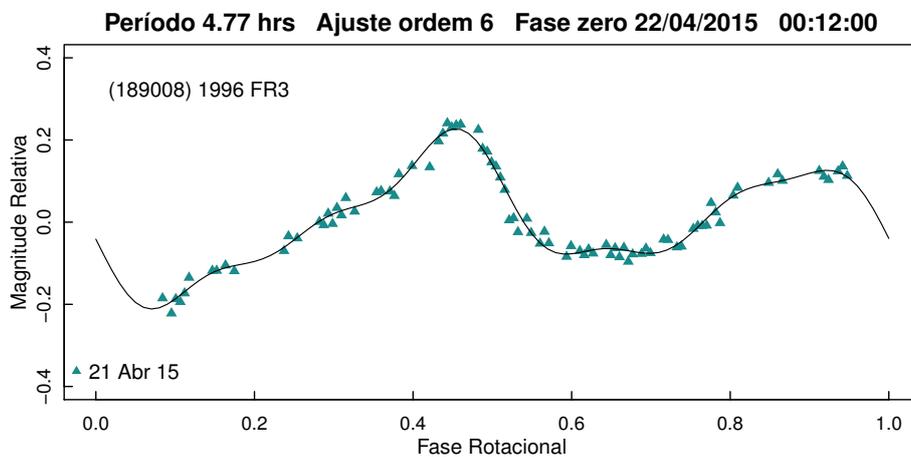


Figura 4.90: Curva de fase para (189008) 1996 FR3 utilizando a observação de abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

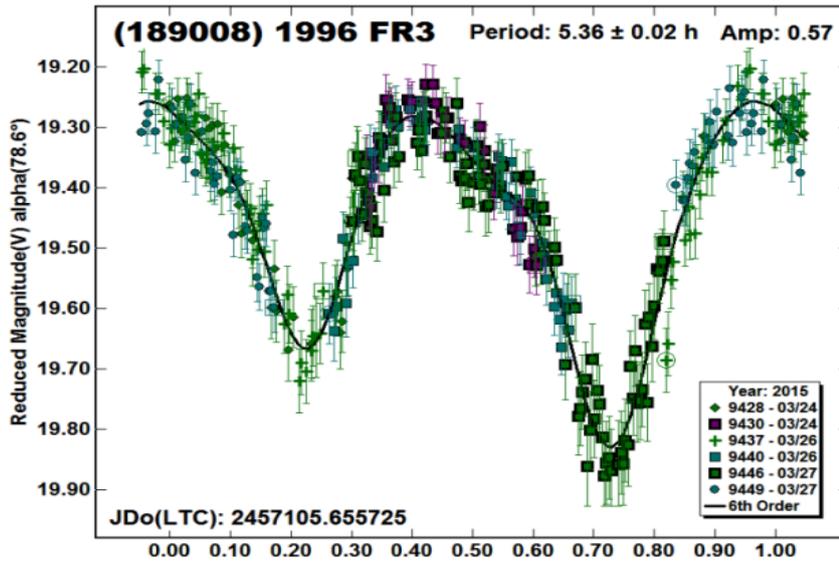


Figura 4.91: Curva de fase para (189008) 1996 FR3 retirada de Warner (2015).

4.3.6 (235756) 2004 VC

O asteroide (235756) 2004 VC faz parte dos objetos do subgrupo Apollo e tem uma das maiores inclinações da nossa amostra, com $i = 39,1^\circ$. Ele também foi classificado como um PHA, em razão do seu diâmetro, de 1,136 km, e da sua aproximação com a Terra com $\text{MOID} \leq 0,05 \text{ UA}$. Este NEA foi observado por apenas uma noite em abril de 2015. A curva de luz obtida para este objeto é mostrada na Figura 4.92. Ao verificar a curva de luz, percebemos que a mesma apresenta pouca cobertura temporal, o que impossibilita a determinação de um valor confiável para o período de rotação.

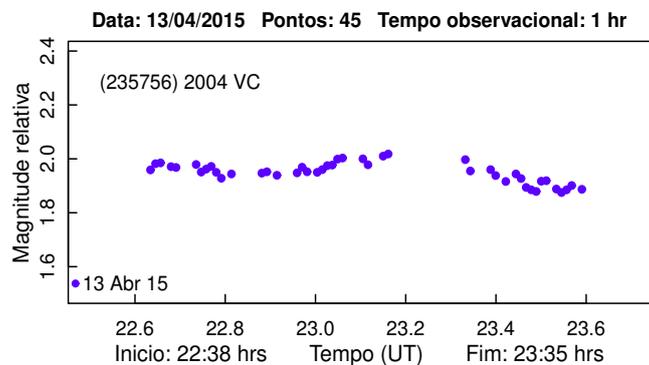


Figura 4.92: Curva de luz de (235756) 2004 VC.

Esta curva de luz apresenta indícios de um máximo e da metade de dois mínimos, e por isso, resolvemos realizar uma análise de séries de Fourier para ajustar uma curva sobre os poucos pontos obtidos. Determinamos um valor para o período de rotação de $1,170 \pm 0,002$ horas, sendo o melhor ajuste com uma ordem 3. O resultado é dado na Figura 4.94. Devemos ressaltar que este período é meramente tentativo, pois não é totalmente coberto.

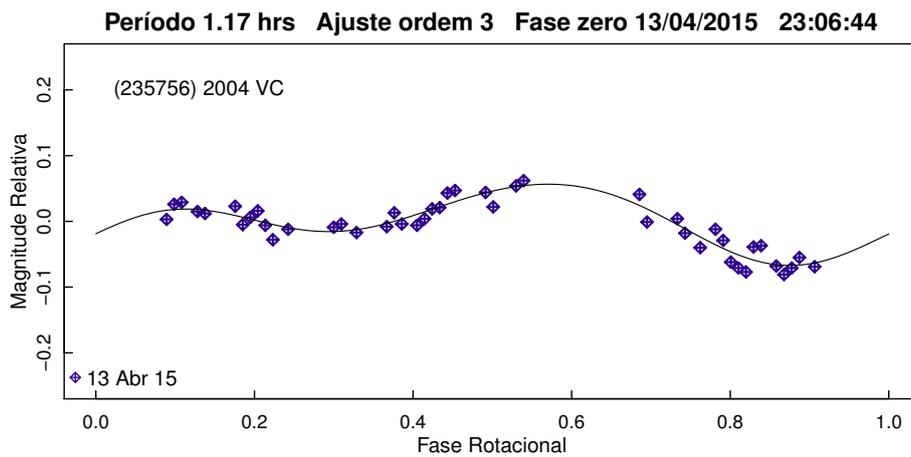


Figura 4.93: Curva de fase para (235756) 2004 VC utilizando a observação de abril/2015. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Um valor de $7,18 \pm 0,02$ horas foi determinado por Warner (2015) utilizando dados obtidos durante três noites em abril de 2015. A curva de luz composta mostrada na Figura 4.94 apresenta uma dispersão relativamente alta, amplitude de 0,12 mag e uma boa cobertura. Dessa forma, o valor estimado por Warner (2015) apresenta maior confiabilidade, sendo considerado atualmente como o mais correto.

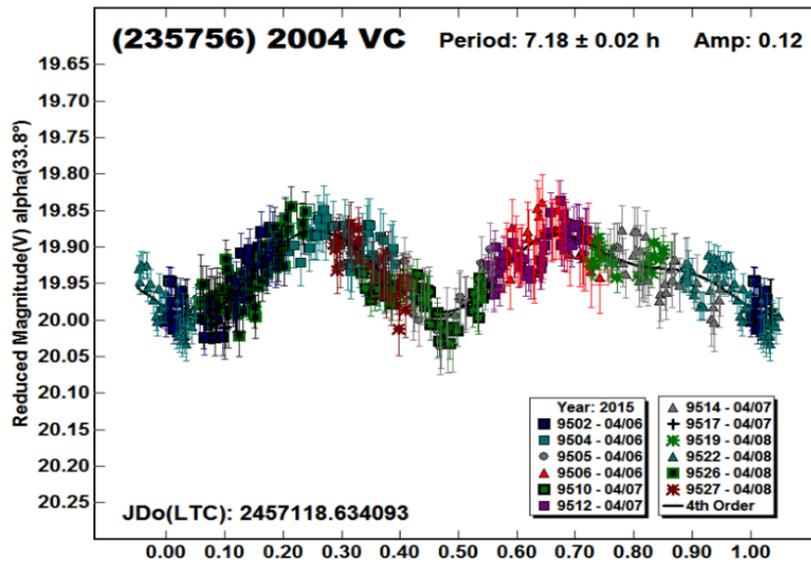


Figura 4.94: Curva de fase para (235756) 2004 VC retirada de Warner (2015).

4.3.7 (423747) 2006 CX

Asteroide do subgrupo Amor, (423747) 2006 CX foi observado por apenas uma noite na temporada de observação de abril de 2015, somando apenas uma hora de seguimento. A curva de luz obtida, apresentada na Figura 4.95, indica uma leve ascensão de brilho. Os poucos pontos obtidos não permitem qualquer estimativa sobre o período de rotação deste asteroide, para o qual também não se tem nenhum período publicado até o momento.

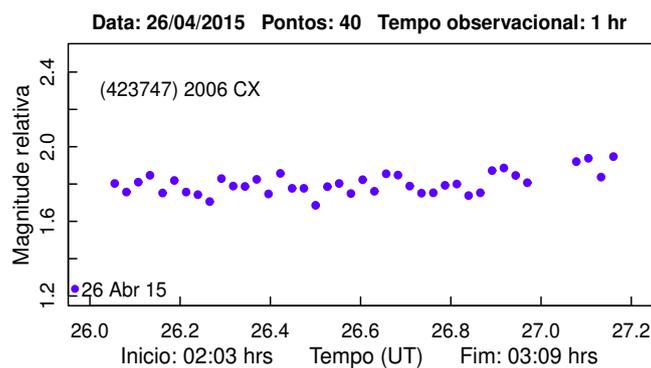


Figura 4.95: Curva de luz para (423747) 2006 CX.

4.4 Curvas de luz com pouca variação ou com grande dispersão

Nesta seção, apresentaremos os asteroides observados para os quais não foi possível determinarmos um período rotacional conclusivo porque sua curva de luz não apresentava variação ou estava com uma dispersão muito alta. Aos casos de invariabilidade, atribuímos a um destes aspectos: ou o asteroide tem uma forma aproximadamente esférica e um albedo constante, o que implica em mínimos e máximos com valores próximos, pois correspondem a faces muito parecidas, ou este objeto tinha seu eixo principal de rotação em uma configuração tal que apontava um dos pólos para a Terra, como ilustrado na Figura 2.2.

4.4.1 (413192) 2002 VY94

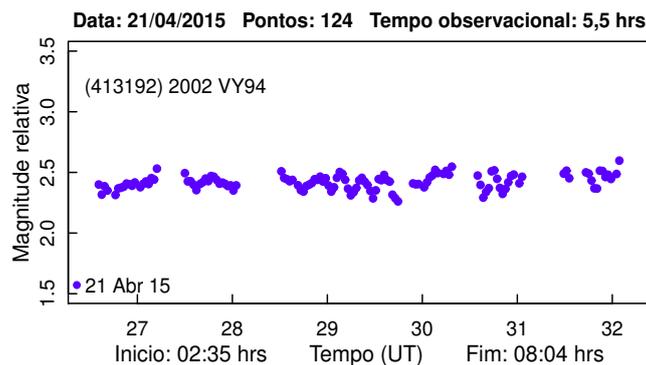


Figura 4.96: Curva de luz de (436724) 2002 VY94.

Para este NEA do subgrupo Amor, de aproximadamente 4 km de diâmetro e de órbita muito excêntrica ($e = 0,65$), não foi possível determinar um período. Este objeto foi observado por apenas uma noite de abril de 2015 num total de aproximadamente cinco horas de observação. No entanto, a curva de luz obtida apresenta pontos muito dispersos, atingindo uma amplitude de 0,33 mag, como pode ser examinado na Figura 4.96. A noite de observação foi parcialmente nublada e o campo de observação era bastante estrelado, sendo estas as prováveis causas da dispersão.

4.4.2 2012 TM139

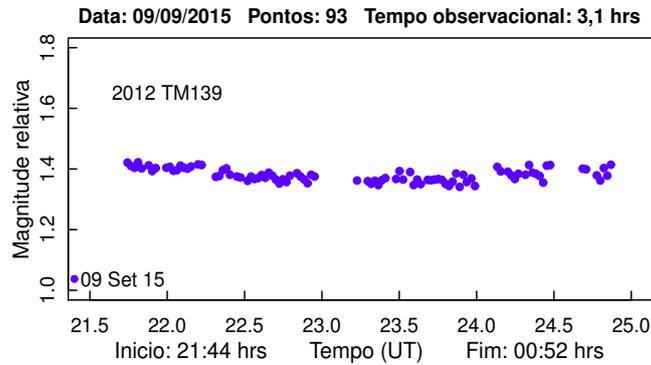


Figura 4.97: *Curva de luz de 2012 TM139.*

O NEA 2012 TM139 do subgrupo Amor, foi observado por apenas uma noite em setembro de 2015. O objetivo desta observação foi tentar comprovar se o período deste objeto era de aproximadamente três horas, como havia sido divulgado por Warner (2016a). Para isto, observamos este asteroide por cerca de três horas e a curva de luz obtida está representada na Figura 4.97. Como podemos verificar, esta curva de luz apresenta dispersão relativamente baixa e uma configuração bastante retilínea, com amplitude de cerca de 0,08 mag, apresentando as extremidades um pouco mais brilhantes. Portanto, acreditamos que o período deste asteroide seja acima de três horas, diferentemente do que foi proposto por Warner (2016a).

Warner (2016a) utilizou dados fotométricos de cinco noites de julho de 2015 para determinar dois valores tentativos. Estes valores foram de $2,68 \pm 0,02$ horas e $5,37 \pm 0,02$ horas, sendo o primeiro resultado, mostrado na Figura 4.98, considerado por ele o mais correto. A curva de luz composta apresenta pequenas variações irregulares e regiões sem pontos. Portanto, os valores aqui apresentados devem servir para guiar futuras observações e ajudar a determinar com maior precisão o valor do período rotacional deste asteroide.

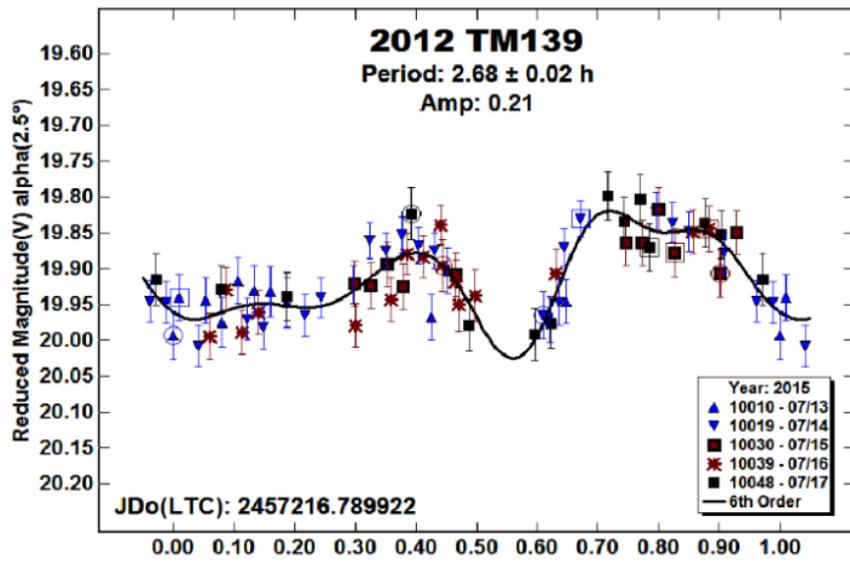


Figura 4.98: Curva de fase para 2012 TM139 retirada de Warner (2016a) representando o primeiro ajuste.

4.5 Discussão

Conforme detalhado nas sessões anteriores, da observação de 35 NEA foi obtido o período de rotação para 24 objetos e a direção do polo e modelo de forma para 2 deles. Para outros 7 foi determinado apenas um valor indicativo do período e para 2 não conseguimos qualquer indicação sobre o período. A partir da amplitude das curvas de luz foi possível identificar que há asteroides em nossa amostra com a forma bastante alongada, e outros, com a forma relativamente esférica. Os períodos foram obtidos por meio da análise de série de Fourier e/ou pelo método de inversão de curva de luz (ICL) que também foi utilizado para determinar a direção do polo e o modelo de forma.

Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 4.1 onde, após o nome do asteroide, é dado o período determinado através de série de Fourier, a amplitude da curva de fase, o período determinado por inversão de curvas de luz (ICL), a direção do eixo de rotação (λ e β), e por último, o código de confiabilidade do resultado.

Alguns asteroides da nossa amostra foram observados ao longo de vários meses consecutivos, porém para alguns deles, como os asteroides (141354) 2002 AJ29, (138847) 2000 VE62, (337866) 2001 WL15, (315098) 2007 EX, (142040) 2002 QE15, não tivemos bons resultados devido à má qualidade das noites em algumas das missões de observação. No caso dos NEAS (141354) 2002 AJ29 e (138847) 2000 VE62, além de variações nas condições atmosféricas, os campos repletos de estrelas destes dificultaram a obtenção de curvas de luz aproveitáveis. Para os objetos (152679) 1998 KU2, (88263) 2001 KQ1 e 2015 CA1, não tivemos mais observações por causa de problemas técnicos ou meteorológicos.

Na tabela 4.5, podemos verificar que obtivemos períodos entre 6 minutos e 11 horas, valores compatíveis com os períodos calculados por Pravec and Harris (2000), Pravec et al. (2000a) e Silva (2015). É de notar que foram encontrados 3 asteroides, (436724) 2011 UW158, (337069) 2014 EK24 e (142040) 2002 QE15, com período muito rápido e, em sua maioria, com valor abaixo de 7 horas. Isso é devido ao fato de utilizarmos fotometria diferencial e de que o tempo de visibilidade de um asteroide durante uma noite é de, no máximo, 8 horas.

A partir de um estudo estatístico, Warner and Harris (2010) mostram que períodos rotacionais são determinados com melhor precisão para objetos com período ≤ 8 horas e uma amplitude maior que $A \geq 0,3$ mag. De fato, em nossa amostra todos os 16 objetos para os quais foi determinado um período com índice

Tabela 4.1: *Resumo dos resultados obtidos, seguindo a ordem de sua análise no texto.*

Asteroide	Período Fourier (h)	Amplitude (mag)	Período ICL (h)	λ ($^{\circ}$)	β ($^{\circ}$)	Cód.
(348400) 2005 JF21	$2,4181 \pm 0,0005$	0,11 - 0,15	$2,415713 \pm 0,000001$	276	-9	4
(436724) 2011 UW158	$0,6107 \pm 0,0006$	0,41 - 1,17	$0,610752 \pm 0,000001$	290	-19,6	4
(31221) 1998 BP26	$2,444 \pm 0,002$	0,14	-	-	-	3
(52381) 1993 HA	$4,107 \pm 0,002$	0,58	-	-	-	3
(68278) 2001 FC7	$4,230 \pm 0,002$	0,22	-	-	-	2
(88263) 2001 KQ1	$10,344 \pm 0,001$	0,71	-	-	-	2
(138847) 2000 VE62	$6,469 \pm 0,002$	0,36	-	-	-	3
(141354) 2002 AJ29	$10,7880 \pm 0,0005$	0,31	-	-	-	3
(142040) 2002 QE15	$1,661 \pm 0,001$	0,11	-	-	-	2
(155110) 2005 TB	$3,479 \pm 0,002$	0,55	-	-	-	3
(163243) 2002 FB3	$6,231 \pm 0,001$	0,19	-	-	-	2
(194268) 2001 UY4	$6,8020 \pm 0,0008$	0,16	-	-	-	2
(250706) 2005 RR6	$7,000 \pm 0,002$	0,28	-	-	-	2
(315098) 2007 EX	$2,447 \pm 0,003$	0,20	-	-	-	3
(337069) 1998 FX134	$7,487 \pm 0,001$	0,46	-	-	-	3
(337866) 2001 WL15	$8,957 \pm 0,002$	0,25	-	-	-	3
(425713) 2011 BK24	$6,010 \pm 0,002$	0,24	-	-	-	3
(430544) 2002 GM2	$2,635 \pm 0,005$	0,34	-	-	-	2
(436775) 2012 LC1	$5,684 \pm 0,004$	0,38	-	-	-	3
(442243) 2011 MD11	$2,427 \pm 0,001$	0,145	-	-	-	3
(450160) 2000 RM12	$4,918 \pm 0,002$	0,20	-	-	-	2
(337069) 2014 EK24	$0,0998 \pm 0,0005$	0,45	-	-	-	3
1998 GL10	$5,930 \pm 0,001$	0,1	-	-	-	2
2015 CA1	$2,949 \pm 0,002$	0,49	-	-	-	3
2015 FS332	$2,401 \pm 0,002$	0,49	-	-	-	3
2016 HL	$2,930 \pm 0,002$	0,15	-	-	-	2
(9400) 1994 TW1	> 20	-	-	-	-	1
(86666) 2000 FL10	> 15	-	-	-	-	1
(152679) 1998 KU2	> 12	0,51	-	-	-	1
(154807) 2004 PP97	> 4	-	-	-	-	1
(189008) 1996 FR3	$5,360 \pm 0,002$	0,57	-	-	-	1
(235756) 2004 VC	$1,170 \pm 0,002$	0,15	-	-	-	1
2012 TM139	> 3	-	-	-	-	1

de confiabilidade 3 ou 4, tem período menor do que 8 horas. Se incluirmos os objetos com período de confiabilidade 2, num total de 26 objetos, apenas 2 tem período de rotação superior a 10 horas. Neste conjunto (índice 2, 3 e 4) a média é de 4,67 horas e a mediana de 4,16 horas.

Com relação à amplitude da curva de fase, 10 entre os períodos com maior confiabilidade (3 e 4) apresentam curva de fase com amplitude maior do que 0,3 mag e apenas 6 uma amplitude menor. Um fato bastante intrigante, e neste momento sem explicação, é de que entre estes últimos, com exceção de um único objeto, todos tem período de rotação de 2,4 horas. Como seria de se esperar, quando se considera um menor índice de confiabilidade (2) a maioria das curvas de fase apresenta pequena amplitude, entre 0,1 e 0,2 mag, indicando que uma maior confiabilidade é obtida para objetos mais alongados.

O NEA (436724) 2011 UW158 tem entre 300 e 600 metros de tamanho, dependendo do albedo assumido, e possui uma rotação rápida de 0,6107 horas ou 37 minutos. Este valor está no limite da barreira de rotação (ou *spin barrier*) definido por Pravec and Harris (2000), indicando que o objeto deve apresentar uma estrutura interna bastante coesa. Esta barreira pode ser explicada pelo modelo de objetos reacumulados ("*rubble-pile*", em inglês) de Pravec and Harris (2000), que analisaram asteroides com tamanhos maiores do que 0,2 km e encontraram uma tendência de que estes não apresentam período de rotação menor do que 2,2 horas. Estes autores concluíram que um período inferior a 2,2 horas pode causar a quebra de objetos reacumulados e sem resistência, com densidades entre 2 e 3 g/cm^3 , e definindo esse período como a barreira entre corpos monolíticos e objetos reacumulados. É importante ressaltar que o valor depende da composição e da forma do objeto. Mas, de forma geral, compreende um período em torno de 2,2 horas para asteroides com diâmetro acima de 150 metros. A barreira pode ser vista no gráfico da Figura 4.99, onde também é indicado o NEA (436724) 2011 UW158 (grande ponto preto, com uma linha horizontal que indica a faixa de diâmetro).

Outro objeto que encontramos acima da barreira de rotação foi (142040) 2002 QE15, o qual tem diâmetro de 1,94 km (Wolters et al., 2005) e período rotacional de 1,66 horas, mas com índice de confiança 2. Até o momento são conhecidos apenas quatro objetos com período de rotação acima da barreira: 2001 OE84, (335433) 2005 UW163, 2011 XA3 e (436724) 2011 UW158. Portanto, caso confirmada a rotação rápida para (142040) 2002 QE15, este seria o quinto desta população com rotação rápida e, possivelmente com estrutura interna rígida. Entretanto, novas observações são necessárias para confirmar se o período que determinamos está correto.

(337069) 2014 EK24 é mais um dos objetos da nossa amostra que apresenta um período super rápido, de $0,09978 \pm 0,004$ horas, isto é, apenas 6 minutos. Porém, diferentemente dos anteriores, este é um pequeno objeto de cerca de 70 metros de

diâmetro cuja magnitude absoluta é 23,3. Objetos menores do que 200 metros de tamanho estão sendo descobertos com períodos rotacionais menores do que 1 hora. Estes pequenos asteroides possuem a rotação tão rápida que não podem ser mantidos inteiros apenas pela própria gravidade, e devem, portanto, serem monolíticos, tal como argumenta Pravec et al. (2000a). O trabalho de Pravec and Harris (2000) sugere que um período de rotação de cerca de 2,2 horas separa os objetos maiores dos menores, como pode ser verificado na Figura 4.99. Segundo Whiteley et al. (2000), a interpretação física para esta segregação de taxas de rotação é que objetos menores do que algumas centenas de metros de diâmetro são corpos monolíticos que mantêm a resistência à tração para girar em taxas tão extremas.

Na amostra de períodos determinados contamos com alguns asteroides que são candidatos a serem visitados por sondas e por naves tripuladas de missões espaciais de algumas das principais agências espaciais do mundo. Os asteroides (436724) 2011 UW158 e (337069) 2014 EK24 se encontram na lista de potenciais alvos de futuras missões tripuladas da NASA, e portanto, estão sendo bastante pesquisados e monitorados pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) por meio do "Estudo de acessíveis asteroides próximos da Terra" para missões tripuladas (NHATS), que prevê avaliar candidatos próximos da Terra que possam estar acessíveis a futuras missões espaciais tripuladas.

Outro NEA da nossa amostra que tem chances de ser visitado por uma sonda é o (52381) 1993 HA, que é um dos principais candidatos de missão MarcoPolo-M5, proposta em 2016 cujo principal objetivo é o retorno de amostra de um asteroide primitivo próximo da Terra. Este asteroide teve seu período determinado pela primeira vez no presente trabalho e está incluído num artigo recentemente submetido para publicação (Perna et al., 2016).

Dentre os objetos observados, 9 são classificados como PHA, sendo que 3 períodos determinados são inéditos. Dos PHAs observados, 7 são do subgrupo Apollo, 1 do Aten e 1 do Amor, sendo que no geral apenas cerca de 10% dos Amor são PHAs. Tais asteroides são classificados desta forma pois eles tem tamanhos superiores a 150 metros e um $\text{MOID} \leq 0,05 \text{ UA}$, ou seja, de distância de mínima intersecção da órbita da Terra.

Em nossa amostra também surgiram candidatos a asteroides binários, como os NEA (430544) 2002 GM2 e (442243) 2011 MD11, e também um asteroide binário, (348400) 2005 JF21, confirmado por meio de observações do radar de Goldstone (Naidu et al., 2016). O NEA (348400) 2005 JF21 foi observado por 4 temporadas, e

por isso, conseguimos determinar sua forma e uma estimativa para a direção do seu eixo de rotação. Vale ressaltar que sua forma esférica é condizente com a amplitude das curvas de luz observadas. Os períodos rotacionais dos NEA (430544) 2002 GM2 e (442243) 2011 MD11 foram determinados, mas não verificamos indícios de eventos mútuos em suas curvas de luz conforme relatado por Warner (2015) e Warner (2016b), para os respectivos asteroides. A maioria dos asteroides binários tem a forma praticamente esférica, e isto é evidenciado através de amplitudes da curva de luz da ordem de 0,1 mag, porém o NEA (430544) 2002 GM2 tem sua amplitude observada para o mês de março da ordem de 0,3 mag, que se comprovado a binaridade, será mais um dos poucos asteroides mais alongado fazendo parte de um sistema múltiplo. Portanto, mais observações desses objetos são importantes, visto que podem revelar sinais de eventos mútuos, necessários para compreender e comprovar tais sistemas. A existência desses sistemas fornece um laboratório para estudar diversos processos físicos que atuam em asteroides e sua dinâmica proporciona provas que só seriam possíveis por meio de sondas espaciais.

A amostra de períodos determinados neste trabalho, é bastante considerável baseado em apenas cerca de um ano de observações, porém ainda é pequena para realizar um estudo estatístico representativo da amostra completa de NEA. Entre os períodos determinados neste trabalho, 16 são para NEA do subgrupo Amor, 15 Apollo e 2 Atens. No caso dos Apollo, diferentemente do que foi observado por Silva (2015), encontramos uma variedade enorme de períodos rotacionais, existindo asteroides com períodos da ordem de poucos minutos até objetos com períodos de 7 horas. Além disso, foi verificado entre os Apollos, objetos com períodos longos, acima de 12 horas, tais objetos foram examinados como possíveis *Tumblings* por outros estudos publicados e, por isto, precisam de mais observações para se ter esta confirmação. Outro fato interessante é que os objetos com menores períodos rotacionais, da ordem de minutos, fazem parte do subgrupo Apollo. Os NEA do subgrupo Amor, os quais correspondem a cerca de 90% de toda a população de NEA, também apresentaram períodos variados, entre 2 e 11 horas, mas demonstrando uma concentração maior entre 4 e 8 horas. No caso dos Atens observados, nada se pode concluir sobre esta população, visto que obtivemos apenas 2 períodos. Contudo, a determinação dos períodos dos Atens é importante tanto para o conhecimento desta subpopulação, visto que é uma das menores e menos conhecidas. A média dos períodos determinados desses subgrupos foram de 3,65, 5,44, 4,33 horas para os Apollos, Amors e Atens, respectivamente.

Nossos resultados para a direção do eixo de rotação, ainda que poucos, estão de acordo com os encontrados por Silva (2015) baseados nos dados do OASI. Desta

forma, continuamos encontrando a mesma tendência de falta de objetos com direção do eixo próximo ao plano da eclíptica, tal como aparece nos estudos publicados por Hanuš et al. (2011) e Silva (2015). Segundo o trabalho de Hanuš et al. (2011), a partir da análise de cerca de 200 asteroides do Cinturão Principal, verifica-se que há uma tendência de falta de objetos com direção do polo próximo do plano da eclíptica, e que as longitudes eclípticas estão distribuídas homoganeamente. Outra característica apresentada no trabalho de Hanuš et al. (2011), é de que a maioria dos asteroides apresentam uma rotação prógrada, diferentemente dos resultados apresentados por Silva (2015), somado aos nossos, para os NEA. Contudo, o conjunto de resultados para direção de polo dos NEA ainda é muito pequeno, dificultando uma análise estatística mais robusta.

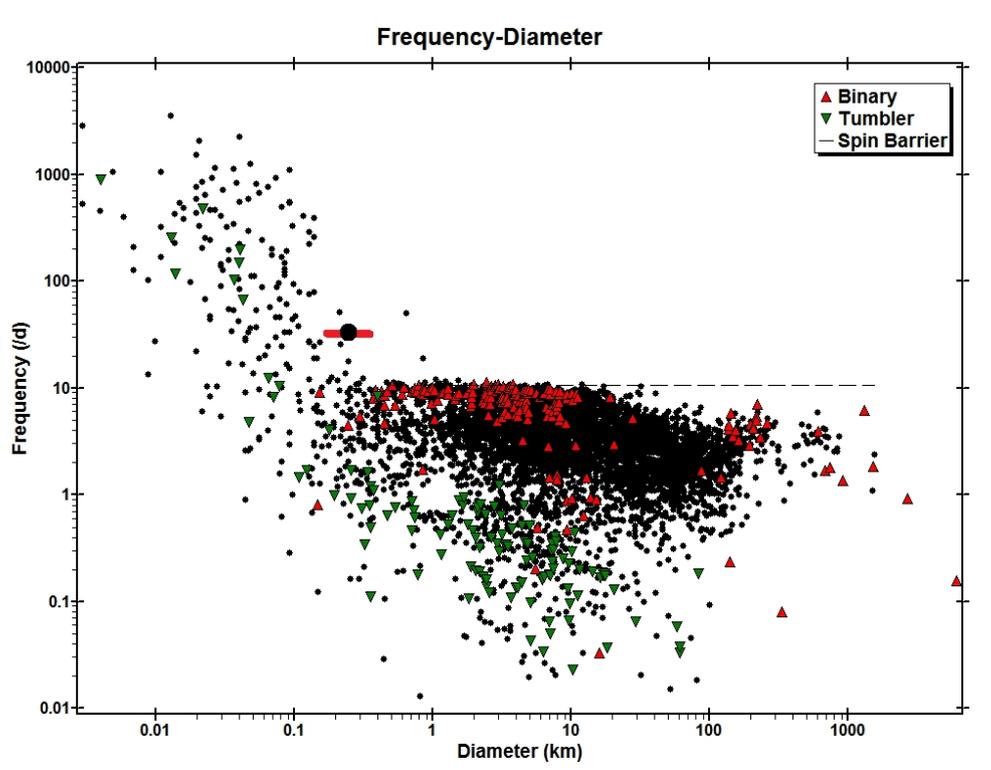


Figura 4.99: Gráfico da frequência de rotação \times diâmetro (*rotation frequency \times diameter*). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação (ou "spin barrier"). O NEA (436724) 2011 UW158 está mostrado como um grande ponto preto, onde a linha vermelha que o corta é a faixa (ou barra de erro) de diâmetro correspondente ao objeto.

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas

Neste trabalho demos continuidade à determinação das propriedades rotacionais dos asteroides próximos da Terra (NEA). Para 33 asteroides foi determinado o período de rotação, sendo que para 2 também foi possível estimar suas direções do eixo de rotação e modelos de forma. Em relação aos 31 NEA com apenas período de rotação determinado, 14 tem índice de confiança 3, o que indica boa qualidade do resultado, 10 períodos tem índice de confiança 2 e 7 receberam índice de confiança 1. Para os que receberam índice de confiança 2, novas observações são necessárias para confirmar se o período está correto e os com índice 1, são valores estimativos e, portanto, podem estar incorretos. Ressaltamos que dentre os períodos determinados, 9 são de PHAs.

As propriedades rotacionais e a forma de NEA estudadas neste trabalho visaram contribuir para um melhor entendimento de sua formação e evolução. Atualmente são conhecidos aproximadamente 14 mil NEA, dos quais apenas cerca de 600 tem período de rotação determinados com índices de confiança maior ou igual a 2. Nosso trabalho contribui com 26 períodos nestas condições de confiança. Dos 33 períodos de rotação determinados, 13 períodos são contribuições inéditas, e dos 2 com direção do eixo de rotação e forma estimados, o asteroide 2005 JF21 não tem tais propriedades publicadas, sendo a nossa a sua primeira estimativa. Além dos períodos inéditos, cabe ressaltarmos que para 5 NEA estudados, os períodos encontrados na literatura são com código de confiança 1 ou 2.

Assim, com os 31 períodos de rotação e 2 direções do eixo de rotação determinados neste trabalho junto com os 19 períodos e 8 formas determinados por Silva (2015), somamos ao todo 52 objetos com período rotacional e 10 com direção de polo e modelo de forma determinados utilizando dados obtidos através do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) do projeto IMPACTON. É importante salientar que os resultados aqui apresentados são consequência de grandes esforços,

coletivos e individuais, para a sustentabilidade e operacionalidade sistemática do OASI e do projeto IMPACTON. A operacionalidade do OASI se deve a uma equipe preocupada em manter toda a infraestrutura do OASI em pleno funcionamento para as observações. Os resultados aqui apresentados são consequência de 13 missões observacionais, na maioria das vezes enfrentando diversos tipos de problemas, os quais contruíram para o conhecimento das técnicas e estratégias de observação ao longo deste trabalho. A experiência adquirida, a quantidade e qualidade dos dados e resultados obtidos não seriam possíveis sem a existência de um telescópio dedicado.

No que se refere às direções do eixo de rotação, nossos resultados continuam a afirmar a ausência de asteroides com latitudes eclípticas próximas ao plano eclíptico e com a maioria dos rotadores retrógrados, como mostrado no trabalho de Silva (2015) para o caso dos NEA. Além disso, a ausência de direções nas cercanias do plano eclíptico também é mostrada nos diversos estudos referentes a asteroides do Cinturão Principal. Essa tendência não tem ainda uma explicação podendo também ser devida apenas ao fato de que o número de polos determinados é muito pequena. Neste sentido será muito importante ter uma amostra estatisticamente significativa para, primeiro verificar se essa tendência é real, e em caso positivo quais os processos dinâmicos que podem ter levado a essa distribuição dos polos.

Por fim, ressaltamos que apesar do grande aumento do número de NEA com período de rotação determinado nos últimos anos, ainda é bastante pequena a fração de objetos próximos da Terra com propriedades rotacionais determinadas comparado ao número de objetos descobertos. Portanto, é importante continuar utilizando ao máximo toda a infraestrutura instalada e aprimorando cada vez mais a estratégia de observação com o objetivo de obter mais informações da população dos NEA. Por isso, pretendemos continuar o estudo para um conjunto maior de objetos, incluindo a determinação de outras propriedades físicas e a análise desses dados em conjunto com os da literatura, visando obter indícios sobre a origem e evolução desses objetos. Além disso, os períodos aqui obtidos, juntamente com os da literatura, devem ser utilizados para realizar análises estatísticas sobre a distribuição de períodos da população dos NEA.

Referências Bibliográficas

- Abell, P. A., Barbee, B. W., Chodas, P. W., Kawaguchi, J., Landis, R. R., Mazanek, D. D., and Michel, P. (2015). Human Exploration of Near-Earth Asteroids. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 855–880.
- Almeida, R. (2002). Determinação do Período Rotacional de Pequenos Asteroides. Ph.D. dissertation, ON/MCT - Rua Gal. Jose Cristino 77 - CEP 20921-400 - Rio de Janeiro - Brazil, Rio de Janeiro, Brazil.
- Almeida, R., Angeli, C. A., Duffard, R., and Lazzaro, D. (2004). Rotation periods for small main-belt asteroids. *A&A*, 415:403–406.
- Angeli, C. A., Guimarães, T. A., Lazzaro, D., Duffard, R., Fernández, S., Florczak, M., Mothé-Diniz, T., Carvano, J. M., and Betzler, A. S. (2001). Rotation Periods for Small Main-Belt Asteroids From CCD Photometry. *AJ*, 121:2245–2252.
- Bailey, S. I. and Pickering, E. C. (1913). Observations of Eros and other asteroids. *Annals of Harvard College Observatory*, 72:165–189.
- Barucci, M. A., Capria, M. T., Harris, A. W., and Fulchignoni, M. (1989). On the shape and albedo variegation of asteroids - Results from Fourier analysis of synthetic and observed asteroid lightcurves. *Icarus*, 78:311–322.
- Benner, L. A. M., Busch, M. W., Giorgini, J. D., Taylor, P. A., and Margot, J.-L. (2015). Radar Observations of Near-Earth and Main-Belt Asteroids. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 165–182.
- Binzel, R. P. (1984). The rotation of small asteroids. *Icarus*, 57:294–306.
- Binzel, R. P., Farinella, P., Zappala, V., and Cellino, A. (1989). Asteroid rotation rates - Distributions and statistics. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, pages 416–441.

- Binzel, R. P., Lupishko, D. F., Di Martino, M., Whiteley, R. J., and Hahn, G. J. (2002). Physical properties of near-Earth objects. *Asteroids III*, 255:271.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 243–256.
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S. (2002). Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-earth objects. *Icarus*, 156(2):399–433.
- Bottke, Jr., W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., and Broz, M. (2002). The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, pages 395–408.
- Buchheim, R. K. (2010). Methods and Lessons Learned Determining the H-G Parameters of Asteroid Phase Curves. *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, 29:101–115.
- Burns, J. A. and Tedesco, E. F. (1979). Asteroid lightcurves - Results for rotations and shapes. In Gehrels, T., editor, *Asteroids*, pages 494–527.
- Carbognani, A. and Buzzi, L. (2016). Asteroids Lightcurves Analysis: 2015 October-December. *Minor Planet Bulletin*, 43:160–163.
- Carbognani, A., Gary, B. L., Oey, J., Baj, G., and Bacci, P. (2016). Pole and Shape for the NEA (436724) 2011 UW158. *Minor Planet Bulletin*, 43:38–41.
- Clark, M. (2016). Asteroid Photometry from the Preston Gott Observatory. *Minor Planet Bulletin*, 43:2–5.
- Davis, D. R., Durda, D. D., Marzari, F., Campo Bagatin, A., and Gil-Hutton, R. (2002). Collisional Evolution of Small-Body Populations. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, pages 545–558.
- De Pra, M., Lazzaro, D., Carvano, J., Gonzales, J. A., and Carvano, J. M. (2013). Minor Planet Observations [Y28 OASI, Nova Itacuruba]. *Minor Planet Circulars*, 82716.
- Deeming, T. J. (1975). Fourier Analysis with Unequally-Spaced Data. *Ap&SS*, 36:137–158.

- Donnison, J. R. (2003). Statistical evidence for fast and slow asteroid rotations using Bayesian methods. *MNRAS*, 338:452–456.
- Donnison, J. R. and Wiper, M. P. (1999). Bayesian statistical analysis of asteroid rotation rates. *MNRAS*, 302:75–80.
- Drummond, J. D., Weidenschilling, S. J., Chapman, C. R., and Davis, D. R. (1988). Photometric geodesy of main-belt asteroids. II - Analysis of lightcurves for poles, periods, and shapes. *Icarus*, 76:19–77.
- Durech, J., Carry, B., Delbo, M., Kaasalainen, M., and Viikinkoski, M. (2015). Asteroid Models from Multiple Data Sources. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 183–202.
- Durech, J., Sidorin, V., and Kaasalainen, M. (2010). DAMIT: a database of asteroid models. *A&A*, 513:A46.
- Ferraz-Mello, S. (1981). Estimation of Periods from Unequally Spaced Observations. *AJ*, 86:619.
- Fulchignoni, M., Barucci, M. A., di Martino, M., and Dotto, E. (1995). On the evolution of the asteroid spin. *A&A*, 299:929.
- Gary, B. L. (2016). Unusual Properties for the NEA (436724) 2011 UW158. *Minor Planet Bulletin*, 43:33–38.
- Godunova, V., Reshetnyk, V., and Andreev, S, A. i. V. V. M. (2016). Photometry of Asteroids 2014 EK24 and 2015 FS332 at the Terskol Observatory. *Minor Planet Bulletin*, 43:156–157.
- Hanuš, J., Ďurech, J., Brož, M., Warner, B. D., Pilcher, F., Stephens, R., Oey, J., Bernasconi, L., Casulli, S., Behrend, R., Polishook, D., Henych, T., Lehký, M., Yoshida, F., and Ito, T. (2011). A study of asteroid pole-latitude distribution based on an extended set of shape models derived by the lightcurve inversion method. *A&A*, 530:A134.
- Harris, A. W. and Burns, J. A. (1979). Asteroid rotation. I - Tabulation and analysis of rates, pole positions and shapes. *Icarus*, 40:115–144.
- Harris, A. W. and Young, J. W. (1983). Asteroid rotation. IV. *Icarus*, 54:59–109.
- Harris, A. W., Young, J. W., Bowell, E., Martin, L. J., Millis, R. L., Poutanen, M., Scaltriti, F., Zappala, V., Schober, H. J., Debehogne, H., and Zeigler, K. W. (1989). Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and 863. *Icarus*, 77:171–186.

- Harris, A. W., Young, J. W., Bowell, E., and Tholen, D. J. (1999). Asteroid Lightcurve Observations from 1981 to 1983. *Icarus*, 142.
- Hergenrother, C. W. and Whiteley, Christensen, E. J. R. J. (2009). Photometric Observations of Five Near-Earth Asteroids: (31221) 1998 BP26, (96315) 1997 AP10, (164184) 2004 BF68, 2006 VV2, and 2006 XY. *Minor Planet Bulletin*, 36:16–18.
- Hicks, M., Rhoades, H., and Thackeray, B. (2016). Photometry of Near-Earth Asteroids 337866 (2001 WL15), 2016 FC13, 2016 FE1, and 2016 FY3. *ATel*, 9029:1.
- Kaasalainen, M. and Torppa, J. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determination. *Icarus*, 153:24–36.
- Kaasalainen, M., Torppa, J., and Muinonen, K. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. II. The Complete Inverse Problem. *Icarus*, 153:37–51.
- Lambert, J. V. (1985). *Occultation and lightcurve analysis: The figure of 2 Pallas*. PhD thesis, New Mexico State University, Las Cruces.
- Lazzaro, D. (2010). Photometric and spectroscopic studies of small Solar System bodies and the IMPACTON project. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 53:315–324.
- Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Mothé-Diniz, T., and Impacton Team (2012). The IMPACTON Project: ANew Facility for NEOs Studies in Brazil. In *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, volume 1667 of *LPI Contributions*, page 6148.
- Lazzaro, D., Silva, J. S., Rodrigues, T., Márcio Carvano, J., Roig, F., Souza, R. P. e., and IMPACTON Team (2015). The IMPACTON Project: Pole and Shape of Seven near-Earth Asteroids. *IAU General Assembly*, 22:2256779.
- Lupishko, D. and Di Martino, M. (1998). Physical properties of near-earth asteroids. *Planetary and space science*, 46(1):47–74.
- Magnusson, P. (1986). Distribution of spin axes and senses of rotation for 20 large asteroids. *Icarus*, 68:1–39.
- Magnusson, P. (1990). Spin vectors of 22 large asteroids. *Icarus*, 85:229–240.

- Mainzer, A., Grav, T., Bauer, J., Masiero, J., McMillan, R. S., Cutri, R. M., Walker, R., Wright, E., Eisenhardt, P., Tholen, D. J., Spahr, T., Jedicke, R., Denneau, L., DeBaun, E., Elsbury, D., Gautier, T., Gomillion, S., Hand, E., Mo, W., Watkins, J., Wilkins, A., Bryngelson, G. L., Del Pino Molina, A., Desai, S., Gómez Camus, M., Hidalgo, S. L., Konstantopoulos, I., Larsen, J. A., Maleszewski, C., Malkan, M. A., Mauduit, J.-C., Mullan, B. L., Olszewski, E. W., Pforr, J., Saro, A., Scotti, J. V., and Wasserman, L. H. (2011). NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *ApJ*, 743:156.
- Margot, J.-L., Pravec, P., Taylor, P., Carry, B., and Jacobson, S. (2015). Asteroid Systems: Binaries, Triples, and Pairs. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 355–374.
- Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F. (2015). Asteroids: Recent Advances and New Perspectives. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, pages 3–10.
- Michel, P., Migliorini, F., Morbidelli, A., and Zappalà, V. (2000a). The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution. *Icarus*, 145:332–347.
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., and Tanga, P. (2000b). NOTE: Estimated Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun. *Icarus*, 143:421–424.
- Milani, A., Carpino, M., Hahn, G., and Nobili, A. M. (1989). Dynamics of planet-crossing asteroids - Classes of orbital behavior. *Icarus*, 78:212–269.
- Morbidelli, A., Bottke, W., Froeschlé, C., and Michel, P. (2002). Origin and evolution of near-earth objects. *Asteroids III*, 409.
- Morbidelli, A. and Vokrouhlický, D. (2003). The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids. *Icarus*, 163:120–134.
- Morrison, D., Harris, A. W., Sommer, G., Chapman, C. R., and Carusi, A. (2002). Dealing with the Impact Hazard. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, pages 739–754.
- Mueller, M., Delbo', M., Hora, J. L., Trilling, D. E., Bhattacharya, B., Bottke, W. F., Chesley, S., Emery, J. P., Fazio, G., Harris, A. W., Mainzer, A., Mommert, M., Penprase, B., Smith, H. A., Spahr, T. B., Stansberry, J. A., and Thomas, C. A. (2011). ExploreNEOs. III. Physical Characterization of 65 Potential Spacecraft Target Asteroids. *AJ*, 141:109.

- Naidu, S. P., Benner, L. A. M., Brozovic, M., Giorgini, J. D., Jao, J. S., Busch, M. W., Taylor, P. A., Richardson, J. E., Rivera-Valentin, E. G., Ford, L. A., Ghigo, F. D., and Kobelski, A. (2015). Radar observations of near-Earth asteroid (436724) 2011 UW158 using the Arecibo, Goldstone, and Green Bank Telescopes. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 47, page 204.08.
- Naidu, S. P., Benner, L. A. M., Brozovic, M., Giorgini, J. D., Jao, J. S., Lee, C. G., Snedeker, L. G., and Lawrence, K. J. (2016). (348400) 2005 JF21. *CBET*, 4139:1.
- Nugent, C. R., Mainzer, A., Masiero, J., Bauer, J., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E., Sonnett, S., Stevenson, R., and Wright, E. L. (2015). NEOWISE Reactivation Mission Year One: Preliminary Asteroid Diameters and Albedos. *ApJ*, 814:117.
- Perna, D., Popescu, M., Monteiro, F., Lantz, C., Lazzaro, D., and Merlin, F. (2016). An Investigation of the Low- ΔV Near-Earth Asteroids (341843) 2008 EV5 and (52381) 1993 HA - Two Suitable Targets for the ARM and MarcoPolo-M5 Space Missions. *A&A*.
- Pravec, P. and Harris, A. W. (2000). Fast and Slow Rotation of Asteroids. *Icarus*, 148:12–20.
- Pravec, P., Harris, A. W., Kušnirák, P., Galád, A., and Hornoch, K. (2012). Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations. *Icarus*, 221:365–387.
- Pravec, P., Harris, A. W., and Michalowski, T. (2002). Asteroid Rotations. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, pages 113–122.
- Pravec, P., Harris, A. W., Scheirich, P., Kušnirák, P., Šarounová, L., Hergenrother, C. W., Mottola, S., Hicks, M. D., Masi, G., Krugly, Y. N., Shevchenko, V. G., Nolan, M. C., Howell, E. S., Kaasalainen, M., Galád, A., Brown, P., DeGraff, D. R., Lambert, J. V., Cooney, W. R., and Foglia, S. (2005). Tumbling asteroids. *Icarus*, 173:108–131.
- Pravec, P., Hergenrother, C., Whiteley, R., Šarounová, L., Kušnirák, P., and Wolf, M. (2000a). Fast Rotating Asteroids 1999 TY₂, 1999 SF₁₀, and 1998 WB₂. *Icarus*, 147:477–486.

- Pravec, P., Scheirich, P., Kušnirák, P., Šarounová, L., Mottola, S., Hahn, G., Brown, P., Esquerdo, G., Kaiser, N., Krzeminski, Z., Pray, D. P., Warner, B. D., Harris, A. W., Nolan, M. C., Howell, E. S., Benner, L. A. M., Margot, J.-L., Galád, A., Holliday, W., Hicks, M. D., Krugly, Y. N., Tholen, D., Whiteley, R., Marchis, F., DeGraff, D. R., Grauer, A., Larson, S., Velichko, F. P., Cooney, W. R., Stephens, R., Zhu, J., Kirsch, K., Dyvig, R., Snyder, L., Reddy, V., Moore, S., Gajdoš, Š., Világi, J., Masi, G., Higgins, D., Funkhouser, G., Knight, B., Slivan, S., Behrend, R., Grenon, M., Burki, G., Roy, R., Demeautis, C., Matter, D., Waelchli, N., Revaz, Y., Klotz, A., Rieugné, M., Thierry, P., Cotrez, V., Brunetto, L., and Kober, G. (2006). Photometric survey of binary near-Earth asteroids. *Icarus*, 181:63–93.
- Pravec, P., Šarounová, L., Rabinowitz, D. L., Hicks, M. D., Wolf, M., Krugly, Y. N., Velichko, F. P., Shevchenko, V. G., Chiorny, V. G., Gaftonyuk, N. M., and Genevier, G. (2000b). Two-Period Lightcurves of 1996 FG₃, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One Probable and Two Possible Binary Asteroids. *Icarus*, 146:190–203.
- Schober, H. J. (1975). The minor planet 654 Zelinda - Rotation period and light curve. *A&A*, 44:85–89.
- Schober, H. J. and Dvorak, R. (1975). Rotation period and photoelectric light curve of the minor planet 675 Ludmilla. *A&A*, 44:81–84.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., and Wolfe, R. F. (1979). Earth-crossing asteroids: orbital classes, population, and fluctuation of population in late geologic time. Technical report.
- Silva, J. S. (2015). *Propriedades rotacionais, direção do polo e modelo de forma de asteroide em órbita próxima da terra. Primeiros resultados do projeto IMPACTON*. PhD thesis, ON/MCT - Rua Gal. Jose Cristino 77 - CEP 20921-400 - Rio de Janeiro - Brazil.
- Silva, J. S. and Lazzaro, D. (2015). Pole and shape of (1459) Magnya, the outer main belt basaltic asteroid. *A&A*, 580:A70.
- Silva, J. S., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Souza, R., and Aff001 (2016). The IMPACTON Project: Pole and Shape of Eight Near-Earth Asteroids. In Chesley, S. R., Morbidelli, A., Jedicke, R., and Farnocchia, D., editors, *IAU Symposium*, volume 318 of *IAU Symposium*, pages 181–184.

- Stephens, R. D. and Warner, B. D. (2016). Lightcurve Observations of (348400) 2005 JF21: An NEA Binary. *Minor Planet Bulletin*, 43:22–24.
- Surdej, J., Pospieszalska-Surdej, A., Michalowski, T., and Schober, H. J. (1986). Photoelectric photometry of 22 Kalliope during the 1985 opposition and determination of its pole orientation - The 'magnitude-aspect' relations revisited. *A&A*, 170:167–173.
- Taylor, R. C., Birch, P. V., Pospieszalska-Surdej, A., and Surdej, J. (1988). Asteroid 45 Eugenia - Lightcurves and the pole orientation. *Icarus*, 73:314–323.
- Tholen, D. J. and Whiteley, R. J. (1998). Results From NEO Searches At Small Solar Elongation. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #30*, volume 30 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1041.
- von Oppolzer, E. (1901). Notiz betr. Planet (433) Eros. *Astronomische Nachrichten*, 154:297.
- Warner, B. D. (2006). A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis. In *Springer*.
- Warner, B. D. (2015). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 March-June. *Minor Planet Bulletin*, 42:256–266.
- Warner, B. D. (2016a). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 June-September. *Minor Planet Bulletin*, 43:66–79.
- Warner, B. D. (2016b). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 October-December. *Minor Planet Bulletin*, 43:143–154.
- Warner, B. D. and Harris, A. W. (2010). Potential Biases In Future Asteroid Lightcurve Surveys. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, volume 42 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1051.
- Whiteley, R. J., Tholen, D. J., and Hergenrother, C. W. (2000). Lightcurve Analysis of 4 New Monolithic Fast-Rotating Asteroids. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #32*, volume 32 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1003.
- Wolters, S. D., Green, S. F., McBride, N., and Davies, J. K. (2005). Optical and thermal infrared observations of six near-Earth asteroids in 2002. *Icarus*, 175:92–110.

- Zappala, V. (1981). A semi-analytic method for pole determination of asteroids. *Moon and Planets*, 24:319–325.
- Zappalà, V., di Martino, M., Farinella, P., and Paolicchi, P. (1983). Analytical methods for pole determination of asteroids. *Uppsala Astronomical Observatory Reports*, 25.
- Zappala, V. and Knezevic, Z. (1984). Rotation axes of asteroids - Results for 14 objects. *Icarus*, 59:436–455.