

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo

Bruno Eduardo Morgado

**ASTROMETRIA DOS SATÉLITES GALILEANOS
DE JÚPITER**

2015



Bruno Eduardo Morgado

ASTROMETRIA DOS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Orientadores: Prof. Dr. Marcelo Assafin; Prof. Dr. Roberto Vieira Martins.

Rio de Janeiro
2015

Morgado, Bruno Eduardo

Fenômenos Mútuos entre os Satélites Galileanos de Júpiter
/Bruno Eduardo Morgado - Rio de Janeiro: UFRJ/ OV, 2015

xix, 74f.:il; 30 cm

Orientadores: Marcelo Assafin; Roberto Vieira Martins.

Dissertação (mestrado) - UFRJ/ OV/ Programa de Pós-graduação
em Astronomia, 2015.

Referências Bibliográficas: f: 75-77.

1.Satélites Galileanos de Júpiter 2.Astrometria Diferencial
3. Aproximação Mútua 4. Sistema Solar 5. Fenômenos Mútuos

I. Assafin, Marcelo. II. Vieira-Martins, Roberto

III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo,
Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2015 IV. Título.

ASTROMETRIA DOS SATÉLITES GALILEANOS DE JÚPITER

Bruno Eduardo Morgado

Orientadores: Prof. Dr. Marcelo Assafin, Prof. Dr. Roberto Vieira Martins.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Dr. Marcelo Assafin - OV/UFRJ

Prof. Dr. Roberto Vieira Martins - ON/MCTI

Prof. Dr. Bruno Sicardy - LESIA/Observatoire de Paris, França

Prof. Dr. Adrian Rodriguez Colucci - OV/UFRJ

Prof. Dr. Julio I.B. Camargo - ON/MCTI (suplente)

Prof. Dr. Alexandre H. Andrei - OV/UFRJ (suplente)

Rio de Janeiro

2015

"Falta-nos revelar e divulgar aquilo que parece ser o mais importante da presente matéria: quatro PLANETAS nunca vistos desde o princípio do mundo até aos nossos dias[...]. E convoco todos os astrónomos a que se dediquem a investigar e a determinar os seus períodos..."

Galileu Galilei – Sidereus Nuncius

Agradecimentos

A obtenção do título de Mestre em Ciências não é uma tarefa fácil, muitas noites em claro foram necessárias, muito esforço e muita dedicação. Isto seria impossível sem aqueles que me apoiaram durante toda esta estrada. A estas pessoas que sempre estiveram ao meu lado o meu **Muito Obrigado**.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Marcelo Assafin e Prof. Dr. Roberto Vieira Martins, que me ensinaram muito nestes dois anos, me auxiliaram nesta etapa de crescimento profissional e pessoal e me dedicaram tempo e paciência.

Ao grupo de Astrometria do Rio e todos os seus membros, que me ensinaram a importância do trabalho em equipe.

Aos meu pais Arlindo Morgado e Maria Cleide Ferreira Morgado, que sempre falaram que eu poderia me tornar tudo aquilo que sonhasse. Eles me ensinaram a humildade, o sacrifício e o respeito e, a eles, devo a minha vida.

Aos meus amigos da pós-graduação do Observatório do Valongo e do Observatório Nacional, em especial, ao Me. Altair Júnior, que fizeram de dias comuns dias de grande aprendizado e divertimento.

Aos meus colaboradores, que, com toda dedicação e empenho, enriqueceram este trabalho.

Ao Observatório do Valongo e toda a equipe desta instituição que proveu a infraestrutura necessária durante este trabalho.

Ao Observatório Pico dos Dias e toda a equipe desta instituição que proveu o apoio necessário durante todas as 82 noites de observação ao longo deste projeto.

Ao Prof. Dr. Vitorvani Soares que me guiou em meus primeiros passos desta carreira profissional, durante a graduação, e me ensinou o amor à pesquisa científica. Hoje um colaborador e amigo que guardo imensa estima e respeito.

Resumo

A obtenção de posições precisas para os satélites Galileanos de Júpiter - *Io*, *Europa*, *Ganymede* e *Callisto* - nos permite testar modelos refinados de órbitas para estes corpos em torno de Júpiter. Com isso podemos estudar forças perturbadoras de baixíssima intensidade, tal qual o *efeito de maré*, e assim estudar algumas características físicas do interior desses corpos. Entretanto, por causa do forte brilho dos satélites e, principalmente, de Júpiter, a precisão das posições obtidas por astrometria CCD comum é tipicamente da ordem de 150 *mas* (mili segundo de arco), dificultando essa tarefa. Essa relativamente baixa precisão tem que ser compensada com um grande número de observações distribuídas ao longo de muitos anos. A única vantagem deste método é que as posições podem ser determinadas sempre que os satélites estejam visíveis. Os fenômenos mútuos - ocultações e eclipses entre satélites -, por outro, fornecem posições relativas com incertezas típicas de poucos *mas*, contudo só ocorrem durante os equinócios do planeta, no caso de Júpiter de 6 em 6 anos, quando a linha de visada do observador fica contida no plano equatorial de Júpiter, no qual orbitam seus satélites principais.

Desenvolvemos, nesta dissertação, uma metodologia que proporciona posições relativas com incertezas próximas às obtidas pela fotometria diferencial aplicada aos fenômenos mútuos, e que pode ser aplicada sempre que dois satélites se aproximam a menos de 60" no plano do céu, o que ocorre com frequência durante toda a órbita de Júpiter ao redor do Sol, mesmo longe dos equinócios de Júpiter. Denominamos esta nova metodologia de *aproximações mútuas*. Com esta nova metodologia nós observamos a aproximação, no plano do céu, entre dois satélites e obtemos a distância mínima entre estes satélites, o instante central em que isso acontece e a velocidade relativa desta aproximação. Estas medidas permitem o refinamento das órbitas destes corpos e, por consequência, suas efemérides. Note que o método desenvolvido não necessita de estrelas de referência, como

no caso da astrometria CCD usual. Para diminuir a luz difusa de Júpiter nas imagens utilizamos o filtro Metano durante as observações, centrado em 889 *nm* e com largura de 15 *nm*.

Reunimos neste trabalho 41 observações destas aproximações mútuas. Cinco destas foram observadas durante os fenômenos mútuos de 2009 e servem como teste do método. As 36 restantes foram observadas em 2014 e 2015. Em ambos os casos o telescópio principal utilizado foi o telescópio ZEISS de 60 *cm* de diâmetro localizado no Observatório Pico dos Dias - LNA. Das reduções destas imagens caracterizamos os instantes centrais de máxima aproximação entre os satélites com uma incerteza típica de 3,6 segundos para os eventos de 2009 e de 1 segundo para os de 2014-2015 e as velocidades relativas destas aproximações mútuas foram obtidas com incertezas da ordem de 0,01 *mas por segundo*. Levando em consideração as velocidades relativas destas aproximações, as incertezas no tempo se traduzem em erros de posição relativa de 25 *mas* para os eventos de 2009 e 10 *mas* para os eventos de 2014 e 2015, podendo chegar a valores inferiores a 3 *mas*.

Palavras-chave: Satélites Galileanos de Júpiter (Io, Europa, Ganymede, Calisto); Astrometria Diferencial; Aproximação Mútua; Fenômenos Mútuos; Campanha Observacional.

Abstract

Acquiring precise positions for the Galilean satellites - *Io, Europa, Ganymede e Callisto* - allow us to test refined models for their orbits around Jupiter. We can study very weak disturbing forces, such as the *Tidal effect*, allowing for the study of some internal physical characteristics of these bodies. However, because of the strong apparent brightness of the satellites and, mostly, of Jupiter, the precision of the obtained positions through usual CCD astrometry is typically of the order of 150 *mas* (milliarcsecond), making this task difficult. The only advantage of this method is that the positions of the satellites can be determined as long as they are visible. The relative positions derived from mutual events, on the other hand, have typical uncertainties of a few *mas*, however they only happen during the equinoxes of the planet, in the case of Jupiter at every six years, when the line of sight of the observer lies in the equatorial plane of Jupiter, which is the orbital plane of the main satellites.

Here we developed a new methodology that provides relative position with uncertainties near to those obtained by the differential photometry applied to mutual events, and which can be applied whenever two satellites approach each other in the sky plane, which happens frequently, during all the orbit of Jupiter around the Sun, even far away from Jupiter equinoxes. We call this new methodology *mutual approximations*. We observe the approximation, in the sky plane, between two satellites and we obtain the minimum distance between them, the central instant when it happens and the relative velocity of the approach. These measurements allow the refinement of the orbits of these bodies and their ephemeris. Note that this method does not require reference stars. In order to attenuate the diffused light of Jupiter in the images we used the Methane filter during the observations, centred in 889 *nm* and with width of 15 *nm*.

We gathered here 41 observations of these events. Five of them were observed during the mutual events in 2009 and they were used to test the method. The 36 remaining approximations were observed in 2014 and 2015. In both cases the main telescope used was the ZEISS telescope of 60 *cm* of diameter located at Pico dos Dias Observatory - LNA. From the reductions of these images we characterize the central instants of maximum approach between the satellites with typical uncertainties of 3.6 seconds to the events of 2009 and of 1 second to the ones of 2014-2015. The relative velocities of these mutual approximations were obtained with uncertainties of the order of 0.01 *mas per second*. Taking into account the relative velocities of these approaches, the uncertainties in time are translated to relative position errors of 25 *mas* for the events of 2009 e 10 *mas* for the events of 2014 and 2015, sometimes reaching values smaller than 3 *mas*.

Keywords: Galilean satellites of Jupiter (Io, Europa, Ganymede, Callisto); Diferencial Astrometry; Mutual Aproximations; Mutual Phenomena; Observational Campaign.

Sumário

1	Introdução	19
2	Modelo Teórico das aproximações mútuas	25
2.1	Variação da Distância	26
2.2	O instante central	28
2.3	Velocidades Relativas	29
2.4	Comparação com as efemérides	30
3	Campanha Observacional	34
3.1	Previsão e seleção dos eventos	34
3.2	Telescópio	39
3.3	Câmera CCD	40
3.4	Filtro	40
3.5	Calibração do registro de tempo nas observações	42
4	Tratamento de dados	44
4.1	Calibrações fotométricas	44
4.1.1	Bias	45
4.1.2	Flat	46
4.2	Redução dos dados	47
4.2.1	Astrometria diferencial de curtíssimo campo	47
4.2.2	Fase solar	49
4.2.3	Refração	51
4.2.4	Escala de Placa	52

4.2.5	Orientação do CCD	54
5	Resultados	56
5.1	Resultados são independentes das efemérides	57
5.2	Aproximações de 2014-1	58
5.3	Aproximações de 2014-2 e 2015-1	61
5.4	Aproximações de baixa precisão	62
5.5	Comparações com as ocultações de 2009	69
6	Conclusão	73
A	Curvas Analisadas	78
A.1	Aproximações de 2014-1	79
A.2	Aproximações de 2014-2 e 2015-1	88
A.3	Aproximações de baixa precisão	110
A.4	Comparações com as ocultações de 2009	115

Lista de Figuras

1.1	Os satélites Galileanos observado pela câmera CCD a bordo da sonda espacial Galileu.	20
1.2	Imagem de Júpiter, Io e Europa, indicado por suas iniciais, obtida pelo telescópio ZEISS de 0,6 metros de diâmetro, equipado com a câmera CCD Ikon-L e o filtro Metano de banda estreita. Devido o filtro centrado em $\lambda = 889 \text{ nm}$ com largura de 15 nm a luz difusa de Júpiter é minimizada. O planeta e os satélites apresentam o mesmo brilho aparente.	22
1.3	Aproximação entre Io e Europa que ocorreu em 03 de Fevereiro de 2014. As setas indicam o sentido do movimento dos satélites e a orientação do campo.	24
2.1	Representação de uma aproximação mútua entre dois satélites, descritos na ilustração como Sat_1 e Sat_2 , onde d representa distância entre eles. Note que a figura central ilustra o instante de máxima aproximação.	25
2.2	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de segundo grau.	31
2.3	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de quarto grau.	32
2.4	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de sexto grau.	33
3.1	Variação da distância aparente para as seis combinações possíveis entre os satélites Galileanos para um mês a contar de 01 de Janeiro de 2014, onde I representa Io, E Europa, G Ganymede e C Callisto.	35

3.2	Variação da distância aparente para as seis combinações possíveis entre os satélites Galileanos para uma semana a contar de 01 de Janeiro de 2014.	35
3.3	Aproximações mútuas	36
3.4	Ilustração da configuração geométrica de uma aproximação de maior velocidade relativa.	37
3.5	Ilustração da configuração geométrica de uma aproximação de menor velocidade relativa.	38
3.6	Telescópio ZEISS de 0,60 metros de abertura do OPD/LNA.	39
3.7	Na esquerda, imagem de Júpiter feito com o CCD Andor Ikon-L utilizando o Filtro I do sistema Johnson, na direita uma imagem feita com o mesmo detector porém utilizando o filtro Metano centrado em 889 <i>nm</i> , com banda de 15 <i>nm</i>	41
3.8	Curva de transmissão do filtro Metano.	41
3.9	Variação do albedo de Júpiter e dos demais planetas gigantes pelo comprimento de onda (Karkoschka, 1994; Karkoschka, 1998)	42
3.10	Curva de correção temporal utilizando o Dimension ⁴	43
4.1	Imagem de Bias para correção da contagem mínima observada nos detectores na ausência total de luz.	45
4.2	Imagem de Flat para correção da não homogeneidade da sensibilidade dos diferentes pixels do CCD	46
4.3	Determinação dos fotocentros para uma das imagens da aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.	48
4.4	Na esquerda: O ângulo de fase, i , é o ângulo entre a direção da luz incidente do Sol no alvo e a direção do observador. Na direita esta representado a aplicação do efeito de fase no objeto observado, onde a parte hachurada representa a região não iluminada do objeto.	49

4.5	Influência da fase solar em um satélite. N denomina o Norte, e L o Leste, o ponto F representa o fotocentro do objeto e C o centro geométrico. O ângulo Q é o ângulo sub-solar que determina a direção da fase no plano tangente à esfera celeste	50
4.6	Ajuste da escala de placa, P_s , para a aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.	53
4.7	A orientação dos eixos do CCD em relação aos eixos alfa e delta do plano do céu.	54
4.8	Ajuste da orientação do CCD, θ , para a aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.	55
5.1	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014.	59
5.2	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 15 de Outubro de 2014.	62
5.3	Aproximação entre Europa e Callisto em 19 de Novembro de 2014.	66
5.4	Aproximação entre Io e Europa em 25 de Março de 2015.	67
5.5	Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.	70
5.6	Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.	71
A.1	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014.	79
A.2	Aproximação entre Europa e Ganymede em 05 de Fevereiro de 2014.	80
A.3	Aproximação entre Io e Ganymede em 19 de Fevereiro de 2014.	81
A.4	Aproximação entre Io e Europa em 27 de Fevereiro de 2014.	82
A.5	Aproximação entre Io e Europa em 18 de Março de 2014.	83
A.6	Aproximação entre Io e Europa em 07 de Abril de 2014.	84
A.7	Aproximação entre Europa e Ganymede em 20 de Abril de 2014.	85
A.8	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 21 de Abril de 2014.	86
A.9	Aproximação entre Io e Ganymede em 21 de Abril de 2014.	87
A.10	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 15 de Outubro de 2014.	88
A.11	Aproximação entre Io e Europa em 15 de Outubro de 2014.	89
A.12	Aproximação entre Io e Ganymede em 29 de Outubro de 2014.	90

A.13	Aproximação entre Io e Callisto em 02 de Novembro de 2014.	91
A.14	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 02 de Fevereiro de 2015.	92
A.15	Aproximação entre Io e Europa em 22 de Fevereiro de 2015.	93
A.16	Aproximação entre Io e Europa em 26 de Fevereiro de 2015.	94
A.17	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 27 de Fevereiro de 2015.	95
A.18	Aproximação entre Io e Ganymede em 27 de Fevereiro de 2015.	96
A.19	Aproximação entre Io e Ganymede em 03 de Março de 2015.	97
A.20	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 24 de Março de 2015.	98
A.21	Aproximação entre Io e Europa em 02 de Abril de 2015.	99
A.22	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 11 de Abril de 2015.	100
A.23	Aproximação entre Io e Europa em 13 de Abril de 2015.	101
A.24	Aproximação entre Io e Callisto em 17 de Abril de 2015.	102
A.25	Aproximação entre Ganymede e Callisto em 18 de Abril de 2015.	103
A.26	Aproximação entre Io e Ganymede em 18 de Abril de 2015.	104
A.27	Aproximação entre Europa e Ganymede em 19 de Abril de 2015.	105
A.28	Aproximação entre Io e Europa em 21 de Abril de 2015.	106
A.29	Aproximação entre Io e Ganymede em 25 de Abril de 2015.	107
A.30	Aproximação entre Io e Ganymede em 29 de Abril de 2015.	108
A.31	Aproximação entre Io e Europa em 03 de Maio de 2015.	109
A.32	Aproximação entre Io e Europa em 07 de Fevereiro de 2014.	110
A.33	Aproximação entre Europa e Callisto em 19 de Novembro de 2014.	111
A.34	Aproximação entre Io e Ganymede em 24 de Fevereiro de 2015.	112
A.35	Aproximação entre Io e Europa em 25 de Março de 2015.	113
A.36	Aproximação entre Io e Europa em 26 de Abril de 2015.	114
A.37	Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.	115
A.38	Aproximação entre Io e Europa em 28 de Maio de 2009.	116
A.39	Aproximação entre Io e Europa em 22 de Junho de 2009.	117
A.40	Aproximação entre Io e Europa em 06 de Julho de 2009.	118
A.41	Aproximação entre Io e Europa em 07 de Agosto de 2009.	119

Lista de Tabelas

1.1	Características básicas dos satélites Galileanos	21
2.1	Comparação dos parâmetros obtidos com os diferentes ajustes	33
3.1	Exemplificação das aproximações mútuas previstas	38
5.1	Comparação entre os resultados obtidos e as efemérides do jup310 e a NOE-5-2010-GAL para o instante central.	58
5.2	Características das observações das aproximações de 2014-1	60
5.3	Resultados das observações das aproximações de 2014-1	60
5.4	Comparação dos resultados das aproximações de 2014-1 com as efemérides	61
5.5	Características das observações das aproximações de 2014-2 e 2015-1	63
5.6	Resultados das observações das aproximações de 2014-2 e 2015-1	64
5.7	Comparação dos resultados das aproximações de 2014-2 e 2015-1 com as efemérides	65
5.8	Características das observações das aproximações de baixa precisão	68
5.9	Resultados das observações das aproximações de baixa qualidade	68
5.10	Comparação dos resultados das aproximações de baixa qualidade com as efemérides	68
5.11	Comparação entre os instantes centrais determinados pelo método das aproximações mútuas [1], com aqueles obtidos por Arlot <i>et al.</i> (2014) [2], Dias-Oliveira <i>et al.</i> (2013) [3] e a efeméride NOE-5-2010-GAL [4].	69

72table.caption.51

5.13 Resultados das observações das aproximações de 2009 comparadas com as ocultações	72
5.14 Comparação dos resultados das aproximações de 2009 com os dados de Arlot <i>et al.</i> (2014).	72

Capítulo 1

Introdução

O estudo orbital dos planetas gigantes e de seus sistemas de satélites e anéis contribui de maneira significativa para o estudo dos aspectos físicos e dinâmicos da evolução e formação do nosso sistema solar (Arlot & Stavinschi 2007). A evolução das órbitas dos satélites regulares em torno dos planetas gigantes acontece de forma similar a evolução dos planetas em torno de uma estrela, porém em uma escala de tempo consideravelmente menor.

Para o estudo orbital destes satélites é necessário a integração de modelos numéricos dinâmicos ajustados às posições destes corpos espalhadas em um grande número de observações distribuídas ao longo de muitos anos, e obtidas através de uma astrometria de alta precisão (Lainey *et al.*, 2009; De Sitter, 1928; Lieske, 1987). Os satélites Galileanos se destacam nesse contexto por serem os primeiros satélites a serem descobertos em torno de um planeta gigante e por possuírem uma grande gama de observações ao longo de séculos, como, por exemplo, o banco de dados NSDB (Arlot & Emelyanov, 2009) ¹.

Os satélites Galileanos (Figuras 1.1) foram primeiramente observados por Galileu Galilei em 1610 com a utilização de uma luneta. Os relatos de sua descoberta se encontram no livro *Sidereus Nuncius – O Mensageiro das Estrelas* onde o autor revela as condições da descoberta destes satélites, que, na época, foram de grande valia na consolidação do Heliocentrismo.

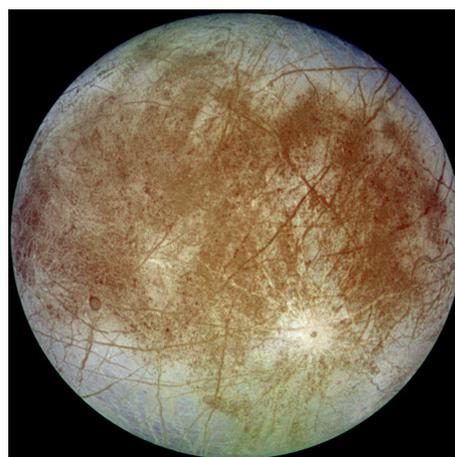
Ao longo dos anos diversas sondas espaciais já observaram estes satélites *in situ*. As sondas Pioneer 10 e 11 seguidas pelas Voyager 1 e 2 e pela Sonda Ulysses e, mais recentemente, a sonda New Horizons passaram pelo sistema de Júpiter e a sonda Galileu ² orbitou este sistema por catorze anos.

¹Website: <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides.html>

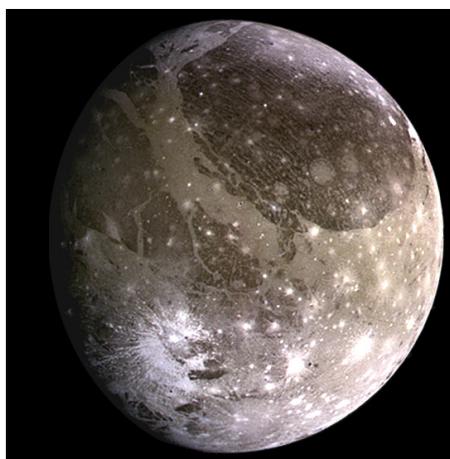
²Website: <http://solarsystem.nasa.gov/galileo/>



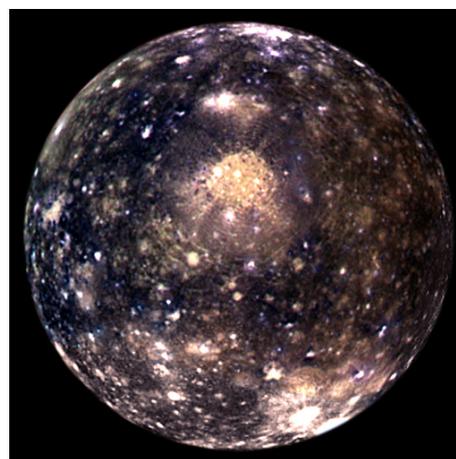
(a) Io



(b) Europa



(c) Ganymede



(d) Callisto

Figura 1.1: Os satélites Galileanos observado pela câmera CCD a bordo da sonda espacial Galileu.

Na Tabela 1.1 listamos alguns dados básicos destes satélites como suas massas, raios, semi-eixos maiores, períodos orbitais e excentricidades (Faure & Mensing, 2007; Pater & Lissauer, 2001).

Tabela 1.1: Características básicas dos satélites Galileanos

	Massa (10^{20} kg)	Raio (km)	Semi-eixo Maior(10^3 km)	Período Orbital(dias)	Excentricidade
Io	893,2	1821,6	421,6	1,77	0,004
Europa	480,0	1560,8	670,9	3,55	0,010
Ganymede	1481,9	2631,2	1070,4	7,15	0,002
Callisto	1075,9	2410,3	1882,7	16,7	0,007

Io (JI) é o mais interno dos Satélites Galileanos, e o quinto mais interno no sistema de Júpiter. É o corpo de maior atividade vulcânica conhecida em todo o Sistema Solar e esta forte atividade vulcânica é alimentada pela maré de Júpiter em Io.

Europa (JII) é o segundo dos satélites Galileanos, e a primeira das luas de gelo (do inglês *icy moons*) de Júpiter. Há fortes indícios da presença de oceanos de água líquida e salina coberto por uma camada de gelo. Este oceano não congelaria devido ao aquecimento gerado também pelo efeito de maré.

Ganymede (JIII) é o maior de todos os satélites de Júpiter e, também, de todo o Sistema Solar, e é o único, até então conhecido, que possui uma magnetosfera própria. Recentemente, indícios de que Ganymede também possuiria um oceano de água líquida e salina foram publicados pela NASA ³.

Callisto (JIV) é o mais distante dos satélites Galileanos e é o único a não participar da ressonância laplaciana, na qual os três anteriores se encontram. Acredita-se, que a força de Maré não afetou a sua evolução tanto quanto a dos demais.

Devido a complexas interações dinâmicas deste sistema, tais quais a força de maré, a ressonância laplaciana, achatamento de Júpiter, interações com os tênues anéis jovianos, etc, os satélites Galileanos são ótimos laboratórios para estudos dinâmicos de teorias de perturbações, por exemplo Ferraz-Mello (1977).

Entretanto, mesmo que estes satélites sejam relativamente bem conhecidos em contraste com outros corpos do Sistema Solar, muitas questões ainda estão abertas, como, por exemplo, quantificar o calor causado pela fricção interna gerada pelo efeito de Maré (Lainey *et al.*, 2009). Mesmo havendo um grande número de teorias que modelam a influência do efeito de maré na dinâmica (Correia *et al.*, 2014; Ferraz-Mello, 2013; Efroimsky & Lainey, 2007) a carência de posições observacionais não permite determinar o melhor modelo. Principalmente, a obtenção, com precisão, do valor destas interações nos permitirá determinar parâmetros físicos dos interiores destes corpos a partir de modelos geofísicos (Hussmann & Spohn, 2004). Desta forma poderemos explicar e entender as características

³Website: <http://www.nasa.gov/press/2015/march/nasa-s-hubble-observations-suggest-underground-ocean-on-jupiters-largest-moon>

únicas destas luas.

A carência de posições precisas observadas de solo para os satélites Galileanos é causada, principalmente, pelo forte brilho de Júpiter (magnitude entre -2 e -3) e de seus satélites (magnitudes em torno de 5) em comparação com o brilho típico de $R = 15$ de estrelas de referência de catálogos astrométricos como o UCAC4 (Zacharias *et al.*, 2013). Nas observações deste sistema com detetores CCD modernos, para evitar saturar as imagens, é necessário utilizar um tempo de exposição muito pequeno, o que pode estar limitado pela instrumentação, ou filtros específicos de banda estreita. Aqui, normalmente o campo de céu observado é muito pequeno (tipicamente menor que $10' \times 10'$). Nesses dois casos as estrelas de referências dos catálogos astrométricos não estarão presentes nas imagens, em número e em qualidade adequadas, como pode ser observado pela Figura 1.2. Com isso a incerteza nas posições obtidas alcançada com a astrometria CCD usual é superior a 100 mas (Kisileva *et al.*, 2008; Stone, 2001) ou de 65 mas se obtida a partir de placas fotográficas onde pelo menos se pode contar com um número um pouco maior de estrelas de referência, devido o maior campo. (Robert *et al.*, 2011).



Figura 1.2: Imagem de Júpiter, Io e Europa, indicado por suas iniciais, obtida pelo telescópio ZEISS de 0,6 metros de diâmetro, equipado com a câmera CCD Ikon-L e o filtro Metano de banda estreita. Devido o filtro centrado em $\lambda = 889 \text{ nm}$ com largura de 15 nm a luz difusa de Júpiter é minimizada. O planeta e os satélites apresentam o mesmo brilho aparente.

Devido a esta limitação buscou-se o desenvolvimento de métodos alternativos de determinação destas posições. Um exemplo é a astrometria através da fotometria diferencial

feita a partir da análise das quedas dos fluxos de luz dos fenômenos mútuos. Estes fenômenos ocorrem quando um satélite passa na frente do outro (ocultação) ou quando a sombra de um satélite eclipsa outro (eclipse). Isso faz com que estes eventos dependam de uma geometria Terra-Júpiter-Sol específica que ocorre somente próximo aos equinócios do planeta, no caso de Júpiter, de 6 em 6 anos e possuem duração menor que 1 ano. Com esta técnica é possível obter precisões bem melhores para posições relativas, da ordem de poucos *mas*, e devido a sua raridade campanhas internacionais são organizadas para a observação destes fenômenos (Arlot, 2008). Para os fenômenos mútuos de 2002-2003 a precisão obtida foi de 20-30 *mas* (Emelyanov, 2009). Já a campanha de 2009 resultou em precisões melhores que 5 *mas* (Arlot *et al.*, 2014; Dias-Oliveira *et al.*, 2013).

A limitação sazonal dos fenômenos mútuos motiva que o desenvolvimento de outras técnicas astrométricas sejam necessárias para se obter posições precisas fora dos períodos dos fenômenos mútuos. Peng *et al.* (2012) utilizam-se da qualidade das efemérides para se obter posições relativas entre pares de satélites próximos com precisão da ordem de 30 *mas*. Eles usam o que chamam de *Precision Premium* - precisão premiada - para obter os parâmetros instrumentais, como escala de placa e orientação do CCD em relação ao plano do céu utilizando as efemérides (Peng *et al.*, 2008).

Neste trabalho desenvolvemos uma nova metodologia de determinação de posições relativas entre os satélites Galileanos a qual chamamos de Aproximações Mútuas. Esta nova técnica se beneficia da astrometria de curtíssimo campo nas aproximações mútuas entre os satélites Galileanos. Nesta nova técnica analisamos a variação da distância aparente no céu entre dois satélites em uma situação máxima aproximação, Figura 1.3.

Utilizando desta técnica determinamos: (i) o instante central dos eventos que é o instante de maior aproximação; (ii) O parâmetro de impacto que é a menor distância entre os satélites; e (iii) a velocidade relativa central dos satélites no plano de observação. Estas medidas podem ser usadas como vínculos em integrações numéricas na determinação das órbitas destes satélites de forma similar ao uso de dados de fenômenos mútuos.

Estas aproximações mútuas ocorrem em momentos bem determinados, podendo ser previstas com bastante antecedência e precisão, da ordem de segundos. Isto permite organizar campanhas para se observar estes eventos na qual até mesmo pequenos telescópios de 25 cm de diâmetro podem estar inseridos. Para este projeto utilizamos o telescópio ZEISS de 60 cm do Observatório Pico dos Dias, vinculado ao Laboratório Nacional de Astrofísica.

No capítulo 2 desta dissertação detalho o modelo teórico desenvolvido para a redução e análise destas aproximações a fim de se obter os três parâmetros principais, o instante central, a distância mínima e a velocidade relativa. O capítulo 3 contém os detalhes da campanha organizada para observação destes eventos, incluindo a previsão e o detalhamento técnico da instrumentação utilizada.

O capítulo 4 possui as informações referentes a redução das imagens FITS obtidas

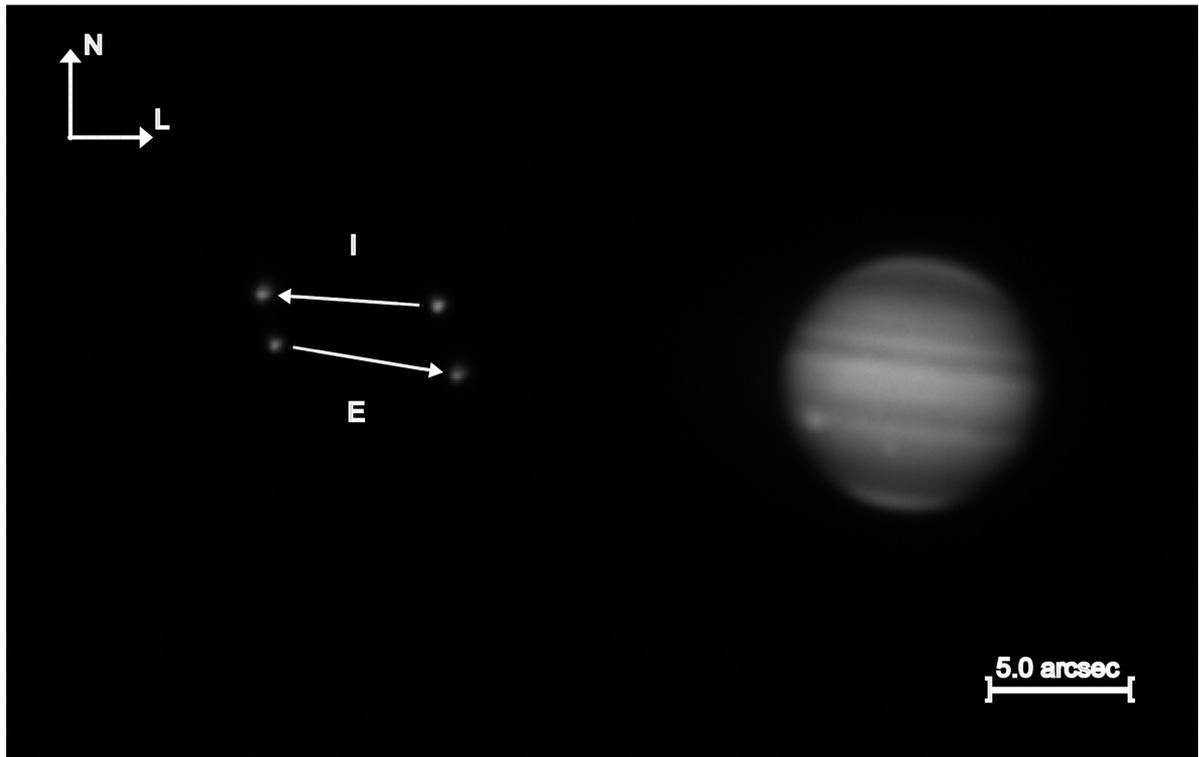


Figura 1.3: Aproximação entre Io e Europa que ocorreu em 03 de Fevereiro de 2014. As setas indicam o sentido do movimento dos satélites e a orientação do campo.

utilizando o pacote IRAF (do inglês *Images Reduction and Analyses Facility* - Butcher & Stevens (1981)), o PRAIA (*Plataforma de Redução Automática de Imagens Astronômicas* - Assafin *et al.* (2006)) e um programa desenvolvido em Python especialmente para tratar estas aproximações mútuas, e que inclui as correções de fase Solar (Stone, 1999 ;Lindegren, 1977) e de refração atmosférica (De Almeida, 2014; Stone, 1996; Green, 1985).

No capítulo 5 estão organizados os resultados das 36 aproximações mútuas observadas neste projeto, divididas em: (i) Aproximações de 2014-1; (ii) Aproximações de 2014-2 e 2015-1; (iii) Aproximações de baixa qualidade; e (iv) Comparação com as ocultações de 2009. No ultimo capítulo (Cap. 6) estão as considerações finais e perspectivas.

No Anexo A encontram-se os ajustes feitos caso a caso, para os 36 eventos a partir das observações.

Capítulo 2

Modelo Teórico das aproximações mútuas

Os fenômenos mútuos são eventos únicos que ocorrem sempre que a linha de visada entre o observador e o planeta pertence ao plano orbital dos satélites deste planeta em particular. Para Júpiter estes eventos acontecem a cada seis anos e duram, em média, poucos meses. Estes períodos únicos possibilitam a medição de uma astrometria dos satélites Galileanos de altíssima qualidade, através da fotometria diferencial. Entretanto, a repetibilidade deste método é comprometida uma vez que necessita desta geometria particular, que só acontece duas vezes por período orbital do planeta em questão. Com isto em mente, durante os demais períodos as trajetórias aparentes dos satélites no céu não se cruzam, mas se aproximam. A figura 2.1 representa uma aproximação entre dois satélites, onde d é a distância entre eles e as setas indicam a direção do movimento de cada satélite.

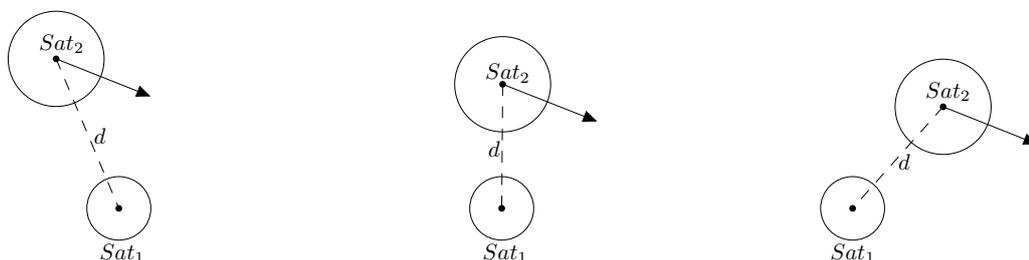


Figura 2.1: Representação de uma aproximação mútua entre dois satélites, descritos na ilustração como Sat_1 e Sat_2 , onde d representa distância entre eles. Note que a figura central ilustra o instante de máxima aproximação.

Estudando estas aproximações mútuas podemos caracterizar as distâncias relativas entre os dois satélites que se aproximam, suas velocidades relativas, e, principalmente,

o momento em que esta máxima aproximação acontece. De maneira similar ao caso de observações de fenômenos mútuos, as medidas das aproximações mútuas também podem ser utilizadas como condições de constrição, junto a outras observações, no ajuste das órbitas desses satélites em torno de Júpiter. Isto em muito contribui na melhoria da precisão dos elementos orbitais obtidos.

Neste capítulo apresentamos o modelo que construímos e utilizamos para descrever as aproximações mútuas entre os satélites Galileanos. Antes de explicar este modelo é necessário assumir duas hipóteses como válidas: (i) como o período orbital destes satélites são superiores a um dia (Tabela 1.1) e observamos a projeção de um pequeno arco da órbita de cada um desses satélites, por poucas horas, podemos aproximar o movimento aparente dos satélites no plano do céu ao de pontos com acelerações constantes; (ii) como a distância aparente entre os dois satélites no plano do céu é pequena, menor que 60 segundos de arco, as variações atmosféricas e instrumentais atuam de maneira igual nas imagens observadas de ambos os satélites (Pascu 1994, Peng *et al.* 2008, Peng *et al.* 2012).

2.1 Variação da Distância

Em um movimento uniformemente acelerado em duas dimensões podemos dizer que:

$$x_1(t) = x_{01} + v_{x01}t + \frac{a_{x1}}{2}t^2 \quad (2.1)$$

$$y_1(t) = y_{01} + v_{y01}t + \frac{a_{y1}}{2}t^2 \quad (2.2)$$

$$x_2(t) = x_{02} + v_{x02}t + \frac{a_{x2}}{2}t^2 \quad (2.3)$$

$$y_2(t) = y_{02} + v_{y02}t + \frac{a_{y2}}{2}t^2 \quad (2.4)$$

A distância entre dois corpos, em um determinado momento, é descrita como:

$$d(t)^2 = (x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2 \quad (2.5)$$

Substituindo as equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 na equação 2.5, temos que:

$$\begin{aligned} d(t)^2 &= \left(x_{01} + v_{x01}t + \frac{a_{x1}}{2}t^2 - x_{02} - v_{x02}t - \frac{a_{x2}}{2}t^2 \right)^2 \\ &+ \left(y_{01} + v_{y01}t + \frac{a_{y1}}{2}t^2 - y_{02} - v_{y02}t - \frac{a_{y2}}{2}t^2 \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Simplificamos nossas equações escrevendo que:

$$\Delta x_0 = x_{01} - x_{02} \quad (2.7)$$

$$\Delta y_0 = y_{01} - y_{02} \quad (2.8)$$

$$\Delta v_{0x} = v_{0x1} - v_{0x2} \quad (2.9)$$

$$\Delta v_{0y} = v_{0y1} - v_{0y2} \quad (2.10)$$

$$\Delta a_x = a_{x1} - a_{x2} \quad (2.11)$$

$$\Delta a_y = a_{y1} - a_{y2} \quad (2.12)$$

Substituindo 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 em 2.6, temos:

$$\begin{aligned} d(t)^2 &= \left(\Delta x_0 + \Delta v_{0x} + \frac{\Delta a_x}{2} t^2 \right)^2 \\ &+ \left(\Delta y_0 + \Delta v_{0y} + \frac{\Delta a_y}{2} t^2 \right)^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

A equação 2.13, pode ser rearrumada e descrita como:

$$\begin{aligned} d(t)^2 &= \Delta x_0^2 + \Delta y_0^2 \\ &+ 2(\Delta x_0 \Delta v_{0x} + \Delta y_0 \Delta v_{0y})t \\ &+ (\Delta x_0 \Delta a_x + \Delta y_0 \Delta a_y + \Delta v_{0x}^2 + \Delta v_{0y}^2)t^2 \\ &+ (\Delta v_{0x} \Delta a_x + \Delta v_{0y} \Delta a_y)t^3 \\ &+ \left(\frac{\Delta a_x^2 + \Delta a_y^2}{4} \right) t^4 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Por fim podemos escrever que:

$$\Delta d_0^2 = \Delta x_0^2 + \Delta y_0^2 \quad (2.15)$$

$$\Delta d_{0v} = \Delta x_0 \Delta v_{0x} + \Delta y_0 \Delta v_{0y} \quad (2.16)$$

$$\Delta d_{0a} = \Delta x_0 \Delta a_x + \Delta y_0 \Delta a_y \quad (2.17)$$

$$\Delta v_0^2 = \Delta v_{0x}^2 + \Delta v_{0y}^2 \quad (2.18)$$

$$\Delta v_{0a} = \Delta v_{0x} \Delta a_x + \Delta v_{0y} \Delta a_y \quad (2.19)$$

$$\Delta a^2 = \Delta a_x^2 + \Delta a_y^2 \quad (2.20)$$

Dessa forma temos que a distancia ao quadrado pode ser descrita como um função polinomial do quarto grau em função do tempo como descrita na equação 2.21

$$d(t)^2 = \Delta d_0^2 + 2\Delta d_{0v}t + (\Delta d_{0a} + \Delta v_0^2)t^2 + \Delta v_{0a}t^3 + \left(\frac{\Delta a^2}{4} \right) t^4 \quad (2.21)$$

Que pode ser genericamente escrita como:

$$d(t)^2 = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad (2.22)$$

Para calcular a incerteza desta distância no ponto mínimo, podemos fazer que:

$$2d\delta d = \delta a_0 + \delta a_1t + \delta a_2t^2 + \delta a_3t^3 + \delta a_4t^4 + \dot{d}^2\delta t \quad (2.23)$$

Onde os δa_n representam as incertezas do ajuste e \dot{d}^2 é a derivada no tempo da função $d^2(t)$. Uma vez que estamos interessados na distância mínima este valor será igual a zero, dessa forma temos que:

$$\delta d = \frac{\delta a_0 + \delta a_1t + \delta a_2t^2 + \delta a_3t^3 + \delta a_4t^4}{2d} \quad (2.24)$$

Optando por utilizar o tempo de referência igual ao instante de mínimo, isto é, $t_0 = 0$, podemos simplificar a equação 2.24 para:

$$\delta d = \frac{\delta a_0}{2d} = \frac{\delta \Delta d_0^2}{2d} \quad (2.25)$$

2.2 O instante central

O instante central é quando a distância aparente no plano do céu entre os satélites é mínima e acontecerá quando a primeira derivada da equação 2.21 for zero. Dessa forma:

$$d^2(t) = f(t) \quad (2.26)$$

$$f'(t) = 0 = a_1 + 2a_2t_0 + 3a_3t_0^2 + 4a_4t_0^3 \quad (2.27)$$

Para calcular a incerteza do instante central aplicamos a diferencial em torno do zero, obtendo:

$$0 = (\delta a_1 + 2\delta a_2t_0 + 3\delta a_3t_0^2 + 4\delta a_4t_0^3) + (2a_2 + 6a_3t_0 + 12a_4t_0^2)\delta t \quad (2.28)$$

$$(2a_2 + 6a_3t_0 + 12a_4t_0^2)\delta t_0 = -(\delta a_1 + 2\delta a_2t_0 + 3\delta a_3t_0^2 + 4\delta a_4t_0^3) \quad (2.29)$$

$$\delta t_0 = -\frac{\delta a_1 + 2\delta a_2t_0 + 3\delta a_3t_0^2 + 4\delta a_4t_0^3}{2a_2 + 6a_3t_0 + 12a_4t_0^2} \quad (2.30)$$

Como o instante de referência adotado é o instante central, podemos reduzir a equação 2.30 para:

$$\delta t_0 = -\frac{\delta a_1}{2a_2} = -\frac{\delta \Delta d_{0v}}{\Delta d_{0a} + \Delta v_0^2} \quad (2.31)$$

É importante ressaltar que o numerador desta razão esta relacionado com as incertezas do ajuste, isto é, com o ruído nas imagens. O denominador, por sua vez, é a concavidade da curva, dominada pela velocidade relativa entre os satélites. Quanto maior esta velocidade relativa menor é a incerteza do ajuste.

2.3 Velocidades Relativas

A velocidade relativa entre dois objetos é descrita como:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad (2.32)$$

onde:

$$|\vec{v}_r|^2 = v_r^2 = (v_{x1} - v_{x2})^2 + (v_{y1} - v_{y2})^2 \quad (2.33)$$

Como as velocidades dos objetos podem ser escritas como funções lineares no tempo, podemos escrever que:

$$v_{x1} = v_{0x1} + a_{x1}t \quad (2.34)$$

$$v_{y1} = v_{0y1} + a_{y1}t \quad (2.35)$$

$$v_{x2} = v_{0x2} + a_{x2}t \quad (2.36)$$

$$v_{y2} = v_{0y2} + a_{y2}t \quad (2.37)$$

Substituindo as equações 2.34, 2.35, 2.36 e 2.37 em 2.33, obtemos:

$$v_r^2 = (v_{0x1} + a_{x1}t - v_{0x2} - a_{x2}t)^2 + (v_{0y1} + a_{y1}t - v_{0y2} - a_{y2}t)^2 \quad (2.38)$$

Ao utilizarmos as definições 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 em 2.38, temos:

$$v_r^2 = (\Delta v_{0x} + \Delta a_x t)^2 + (\Delta v_{0y} + \Delta a_y t)^2 \quad (2.39)$$

Re-arrumando a equação 2.39, obtemos:

$$v_r^2 = (\Delta v_{0x}^2 + \Delta v_{0y}^2) + 2(\Delta v_{0x} \Delta a_x + \Delta v_{0y} \Delta a_y)t + (\Delta a_x^2 + \Delta a_y^2)t^2 \quad (2.40)$$

Substituindo as definições 2.22, 2.19 e 2.20 em 2.41, obtemos que o quadrado da velocidade relativa pode ser descrito como uma função polinomial de segunda ordem:

$$v_r^2 = \Delta v_0^2 + 2\Delta v_{0a}t + \Delta a^2 t^2 \quad (2.41)$$

que pode ser genericamente escrita como:

$$v_r^2 = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \quad (2.42)$$

A incerteza deste ajuste poderá ser obtida utilizando:

$$\delta v_r = \frac{\delta c_0 + \delta c_1 t + \delta c_2 t^2 + (2c_2 t + c_1)\delta t}{2v_r} \quad (2.43)$$

Novamente optando por utilizar o instante central como referencial, podemos simplificar esta equação na forma:

$$\delta v_r = \frac{\delta c_0 + c_1 \delta t}{2v_r} = \frac{\delta \Delta v_0^2 + 2\Delta v_{0a} \delta t}{2v_r} \quad (2.44)$$

2.4 Comparação com as efemérides

Uma vez que a modelagem esteja construída é importante analisarmos, testando-a de diferentes formas possíveis. O primeiro teste a ser feito está relacionado com a precisão do modelo estimada comparando as distâncias obtidas com aquelas fornecidas pelas efemérides dos dois corpos. Esta comparação nos revela se o modelo adotado é adequado e qual é o seu limite de precisão.

Aqui, exemplificamos com a aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014 utilizando as efemérides NOE-5-2010-GAL do IMCCE¹ (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides) descritas em Lainey *et al.*, 2004a, Lainey *et al.*, 2004b. Para os fenômenos mútuos as modelagens assumem que a velocidade relativa entre os dois satélites é uma constante ao longo do evento (Dias-Oliveira, 2011). Se o mesmo for considerado para a modelagem das aproximações mútuas teríamos que a equação 2.21 seria simplificada para:

$$d(t)^2 = \Delta d_0^2 + 2\Delta d_{0v}t + \Delta v_0^2 t^2 \quad (2.45)$$

Dessa forma, ajustar um polinômio de segunda ordem em um gráfico contendo o quadrado da distância e o tempo seria adequado. A figura 2.2 demonstra o gráfico, onde, em cima, os pontos em preto são as distâncias entre as efemérides dos dois satélites e a linha em azul representa o melhor ajuste para o modelo de um polinômio de segunda ordem ajustado ao quadrado da distância. Embaixo, em vermelho observamos o resíduo

¹Website: <http://www.imcce.fr/langues/en/>

desse ajuste. O instante central é o instante de tempo para o qual a curva polinomial possui menor valor.

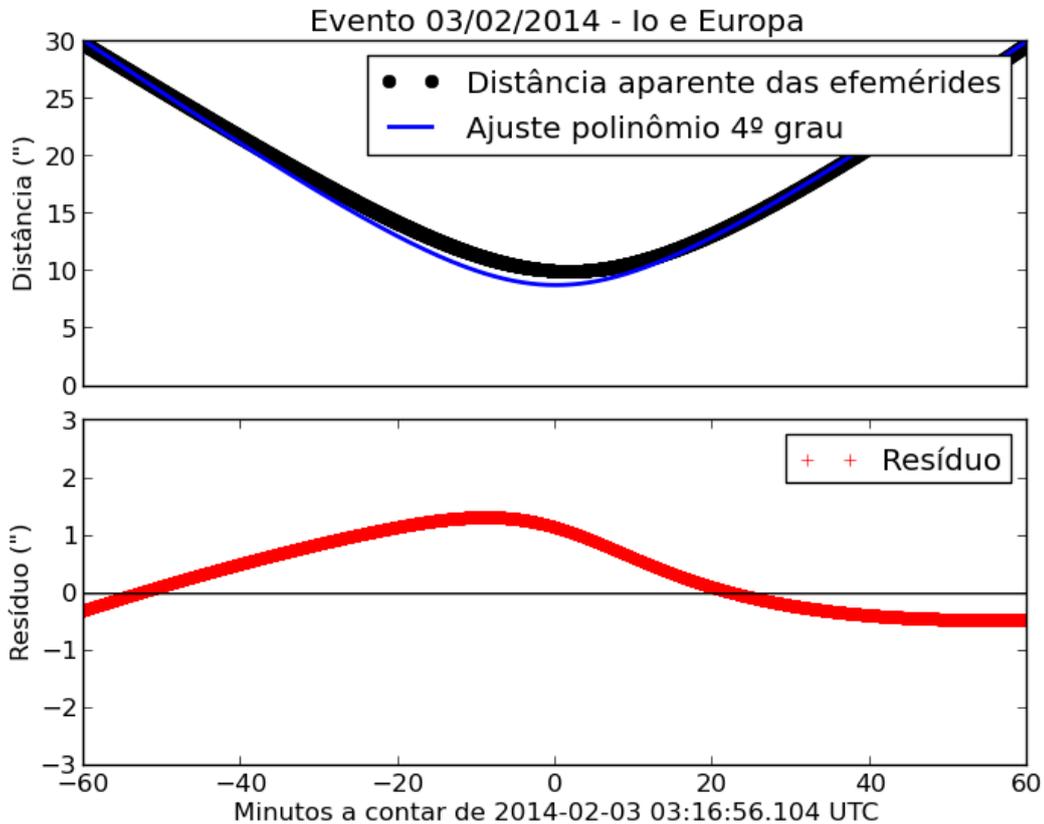


Figura 2.2: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de segundo grau.

Como evidenciado pela figura 2.2, ajustar um polinômio do segundo grau não é o adequado nestas aproximações. Para os fenômenos mútuos, que possuem duração de poucos minutos, muitas vezes não superiores a cinco minutos, esta consideração é válida. Porém, como as aproximações possuem durações de vários minutos até mais de uma hora, a aceleração precisa ser considerada. Dessa forma deve ser ajustado, ao menos, um polinômio de quarta ordem nos dados, como representado pela figura 2.3, onde, em verde, temos a distância modelada para um polinômio do quarto grau ajustado ao quadrado da distância.

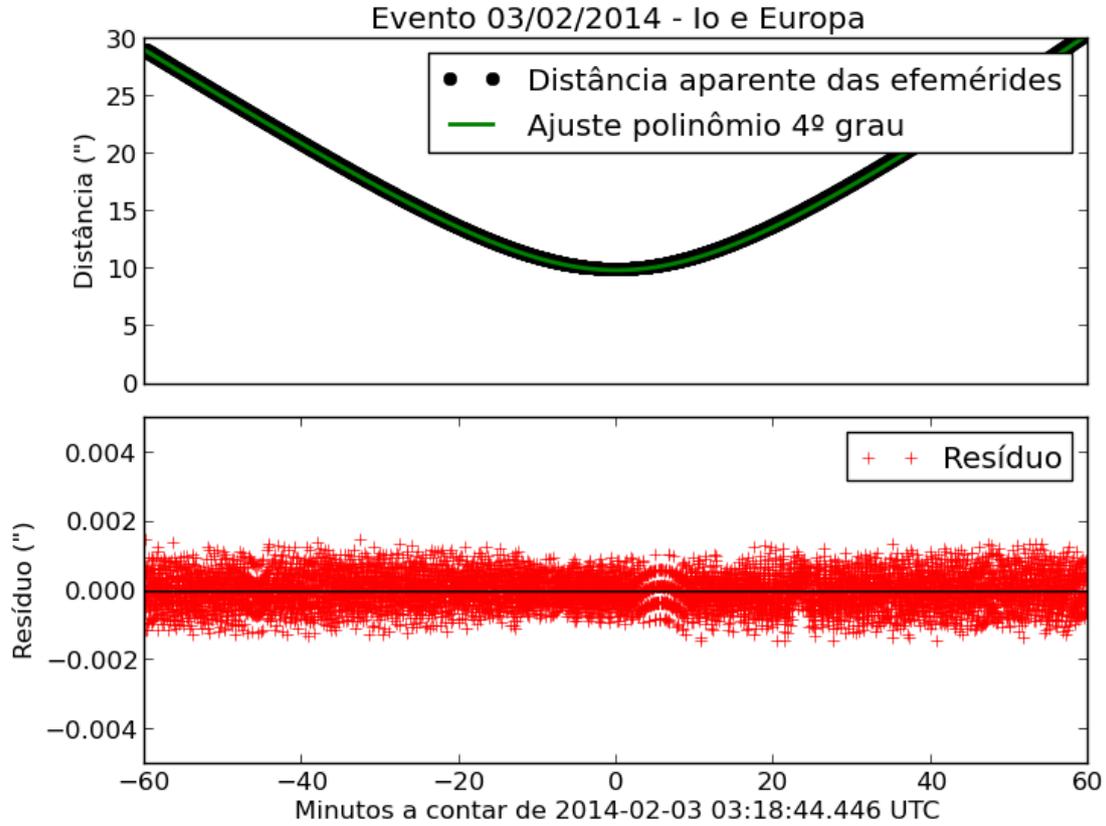


Figura 2.3: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de quarto grau.

Nesse caso consideramos as acelerações como constantes ao longo de todo o intervalo de tempo contendo a aproximação. Entretanto se as acelerações não forem constantes mas lineares no tempo, verifica-se que a distância ao quadrado deve ser ajustada com um polinômio do sexto grau no tempo. A equação 2.46 mostra este modelo onde \dot{a} representa o termo da aceleração que é linear no tempo. Este teste é exemplificado pela figura 2.4, onde, em amarelo, plota-se o ajuste para um polinômio do sexto grau.

$$\begin{aligned}
 d(t)^2 &= \Delta d_0^2 + 2\Delta d_{0v}t + (\Delta v_0^2 + \Delta d_{0a})t^2 + (\Delta \dot{a} + \Delta v_{0a})t^3 \\
 &+ \left(\frac{\Delta a}{4} + \Delta v_{0\dot{a}}\right)t^4 + \frac{\Delta a_{0\ddot{a}}}{2}t^5 + \frac{\Delta \ddot{a}}{4}t^6
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

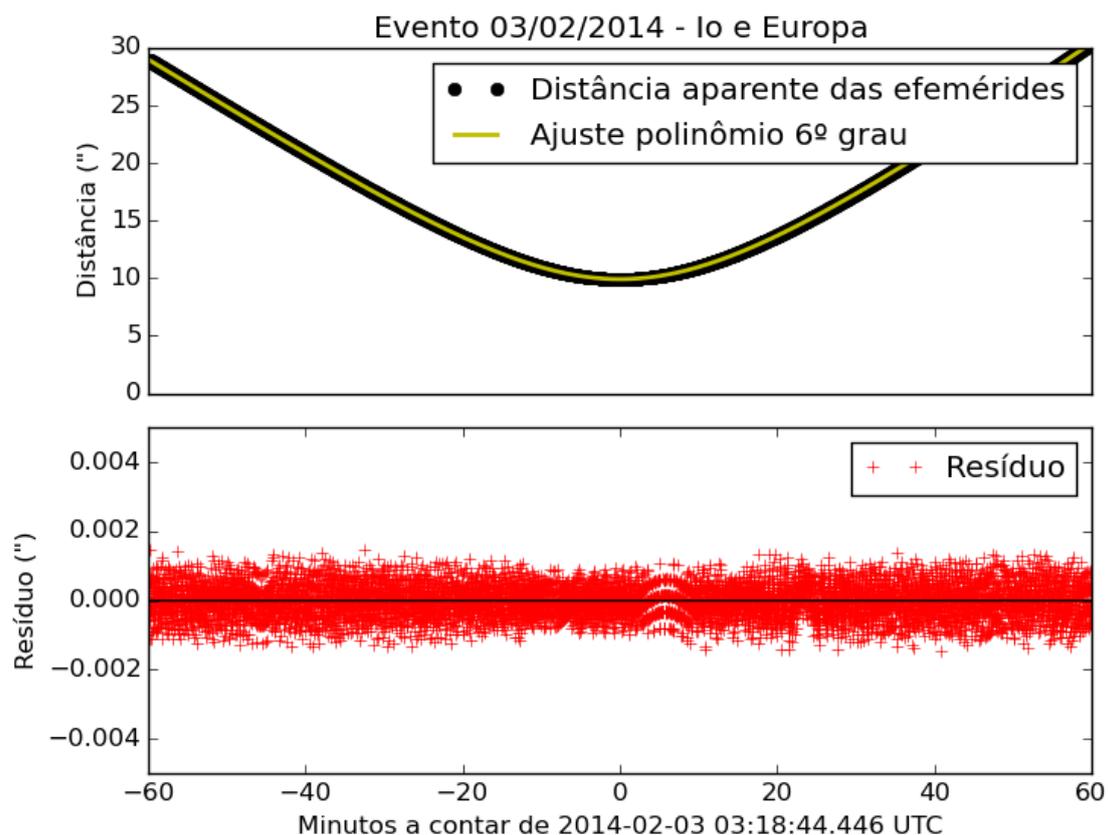


Figura 2.4: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014 ajustada por um polinômio de sexto grau.

Como é observado ao se comparar a figura 2.3 com a figura 2.4 não há melhora significativa em se aumentar o grau do polinômio, o instante central ajustado é o mesmo, até a terceira casa decimal do segundo, e a distância mínima também é similar dada a precisão alcançada. A tabela 2.1 sumariza os parâmetros principais encontrados e as precisões.

Tabela 2.1: Comparação dos parâmetros obtidos com os diferentes ajustes

Parâmetro	Polinômio 2º	Polinômio 4º	Polinômio 6º
Instante central (hh:mm:ss.sss)	03:16:56,104	03:18:44,446	03:18:44,446
σt (segundo)	7,732	0,0016	0,0016
Distância mínima (arcsec)	8,826347	9,920534	9,920531
σd (mas)	18,58	0,072723	0,074403

Não havendo diferença significativa entre os ajustes de quarta e sexta ordem opta-se pelo modelo mais simples.

Capítulo 3

Campanha Observacional

Este projeto teve forte caráter observacional, tentativas de observações foram feitas em mais de 59 noites ao longo do ano de 2014 e primeiro semestre de 2015 no Observatório Pico dos Dias, OPD, vinculado ao Laboratório Nacional de Astrofísica, LNA do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Nesta seção explico os critérios de seleção e previsão destas aproximações mútuas, detalho as características da instrumentação utilizada, telescópio, detector e filtro, e realço a importância da medição precisa do instante de cada imagem e como isso pode ser alcançado.

3.1 Previsão e seleção dos eventos

A primeira tarefa que deve ser realizada antes das observações destas aproximações mútuas entre os satélites Galileanos é a previsão destes eventos uma vez que eles acontecem em momentos bem definidos. Ao analisarmos as efemérides de dois astros próximos no plano do céu, a distância entre estes dois corpos no plano tangente à esfera celeste para um determinado momento é calculada através das posições individuais de cada satélite, ascensão reta (α) e declinação (δ), utilizando a equação 3.1:

$$d = \sqrt{(\alpha_1 \cos \delta_1 - \alpha_2 \cos \delta_2)^2 + (\delta_1 - \delta_2)^2} \quad (3.1)$$

Determinando a distância entre as seis combinações possíveis, dois a dois, dos satélites Galileanos para o mês de janeiro de 2014, com uma resolução temporal de um minuto, o gráfico da Figura 3.1 é gerado, onde I significa Io, E Europa, G Ganymede e C Callisto. O mesmo gráfico para a primeira semana do mesmo mês consta na Figura 3.2, onde cada ponto de mínimo destes gráficos representam uma aproximação mútua e os eventos de interesse deste trabalho são as aproximações que possuam distância mínima inferior a 60 segundos de arco. É importante realçar que estas figuras mostram a recorrência destes eventos.

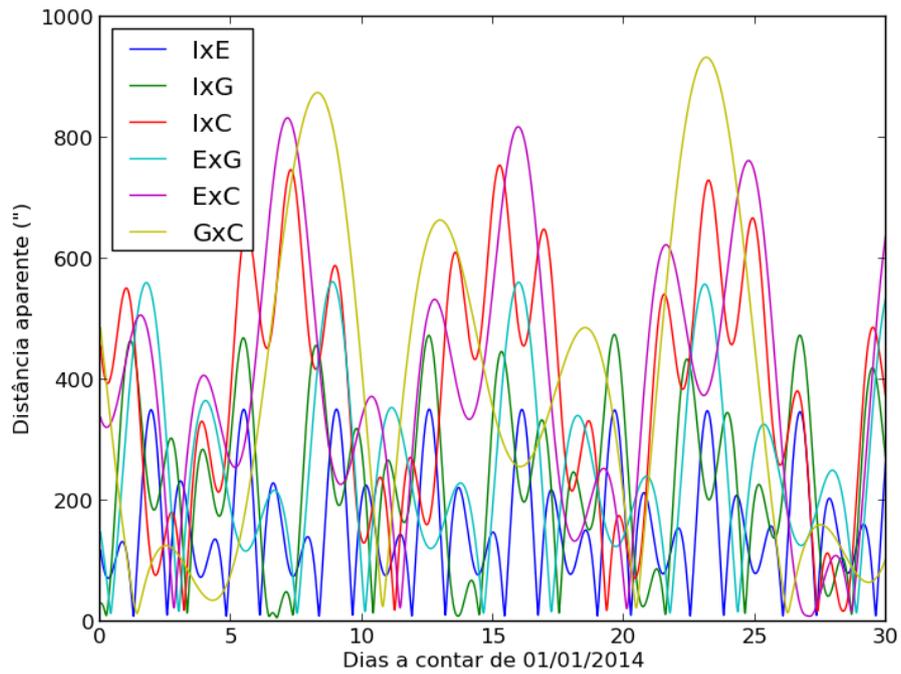


Figura 3.1: Variação da distância aparente para as seis combinações possíveis entre os satélites Galileanos para um mês a contar de 01 de Janeiro de 2014, onde I representa Io, E Europa, G Ganymede e C Callisto.

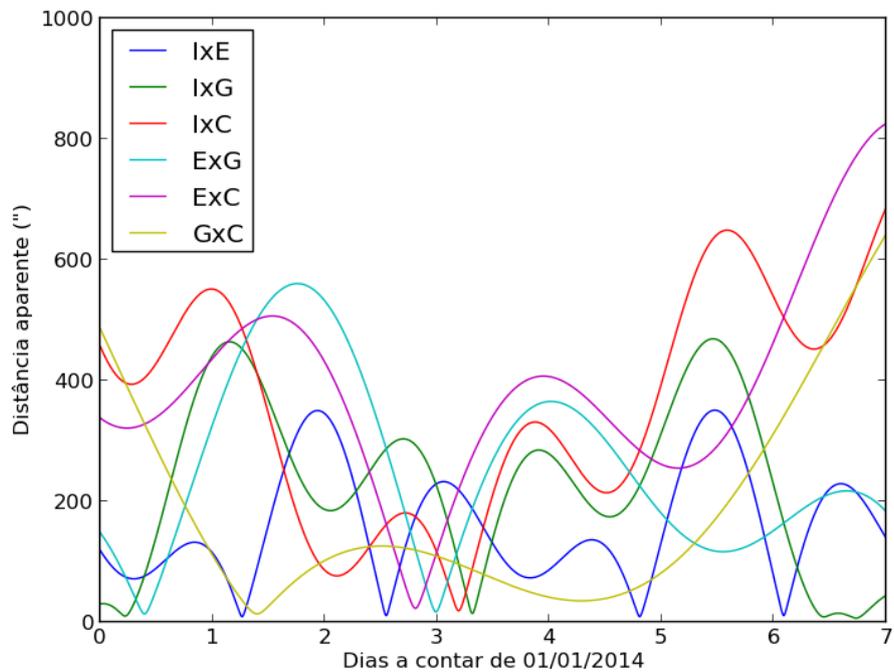


Figura 3.2: Variação da distância aparente para as seis combinações possíveis entre os satélites Galileanos para uma semana a contar de 01 de Janeiro de 2014.

Estas aproximações são regulares e dependem apenas das órbitas dos satélites envolvidos. Cada ponto da Figura 3.3 ilustra uma destas aproximações mútuas com distância mínima entre os satélites menor que 30 segundos de arco, onde no eixo das ordenadas esta representado a mínima distância desta aproximação e no eixo das abscissas esta ilustrado o tempo em anos a contar do dia primeiro de Janeiro de 2014 cobrindo um total de 12 anos, a órbita de Júpiter em torno do Sol. Este gráfico ressalta que em todos os momentos da órbita de Júpiter em torno do Sol há sempre aproximações mútuas com distâncias mínimas menores do que 20 segundos de arco. Note que as regiões onde há eventos com distâncias mínimas inferiores a um segundo de arco são os períodos dos fenômenos mútuos.

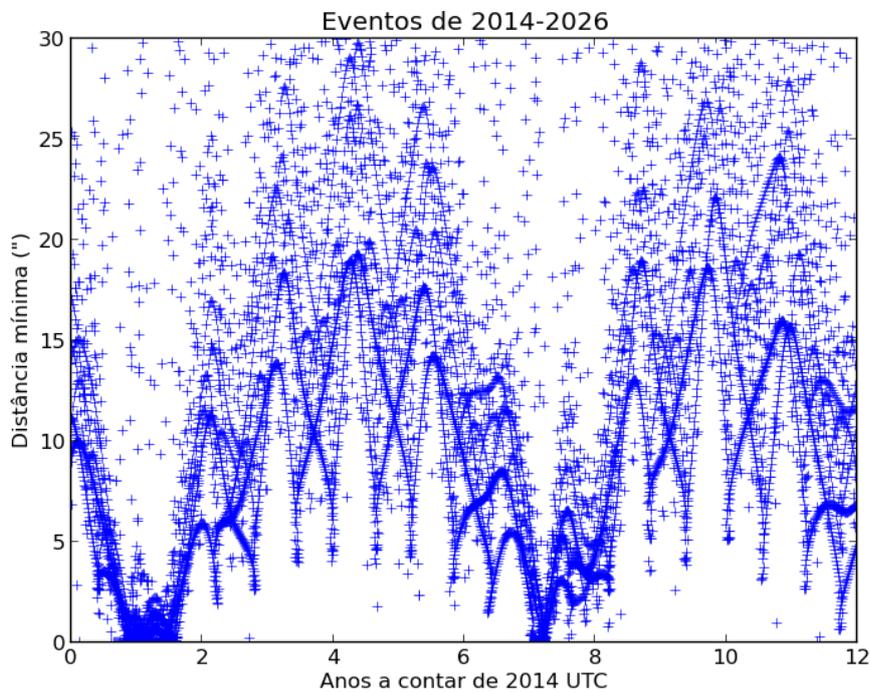


Figura 3.3: Aproximações mútuas

Ainda é necessário levar em consideração três coisas antes de determinar as datas das aproximações. A primeira é a visibilidade de Júpiter para o dado observatório. Isto pode ser feito analisando a altura prevista para Júpiter no momento da máxima aproximação. O segundo detalhe que deve ser considerado é a distância do centro de Júpiter aos satélites no momento da aproximação. Caso a distância fique menor que o raio planeta, somado a uma tolerância de 10 segundos de arco, devido à luz difusa de Júpiter, isso informa que os satélites serão ocultados por Júpiter, ou farão trânsito. Em ambos os casos a observação é inviabilizada. A equação 3.2 detalha estas considerações onde R_J representa o raio do disco de Júpiter.

$$d_J \geq \sqrt{(\alpha_n \cos \delta_n - \alpha_J \cos \delta_J)^2 + (\delta_n - \delta_J)^2} - R_J + 10'' \quad (3.2)$$

A terceira e última consideração que foi feita está relacionada com a velocidade relativa dos eventos, como observado na equação das incertezas do instante mínimo (equação 2.30).

A precisão da determinação do instante da máxima aproximação está relacionada com a concavidade da curva, que por sua vez, possui ligação direta com a velocidade relativa entre os dois satélites. Esta velocidade relativa está diretamente ligada com a configuração geométrica de cada aproximação.

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram as duas geometrias diferentes para as aproximações. Optando pelos eventos onde o mínimo possa ser calculado de maneira mais precisa, os eventos com velocidades relativas menores que um milissegundo de arco por segundo (mas/s) foram eliminados.

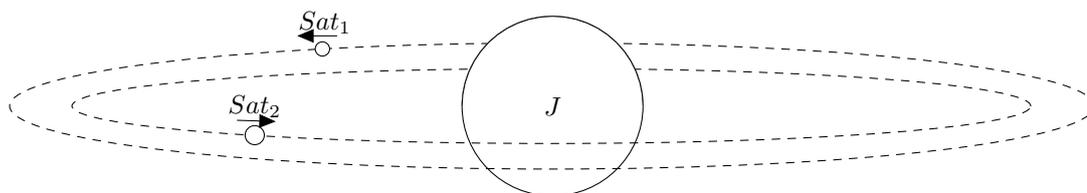


Figura 3.4: Ilustração da configuração geométrica de uma aproximação de maior velocidade relativa.

Para determinar os instantes aproximados onde estes eventos aconteceriam um programa em FORTRAN 77 foi escrito que utiliza as efemérides geradas a partir do programa NAIF SPICE¹, utilizando as efemérides *jup310* com a *DE430*. Foram selecionados 21 eventos para o primeiro semestre de 2014, 11 para o segundo semestre e 27 eventos para o primeiro semestre de 2015.

Note-se que os períodos de 2014-2 e 2015-1 correspondem à nova temporada de fenômenos mútuos entre os satélites Galileanos. Parte destes eventos selecionados estão exemplificados na Tabela 3.1 onde está listada a noite em que o evento ocorreu, os satélites envolvidos no evento e o instante previsto para o mínimo em Tempo Universal Coordenado (UTC na sigla em inglês).

¹Website: <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>

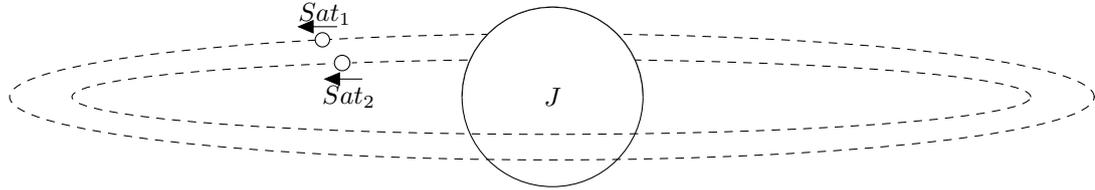


Figura 3.5: Ilustração da configuração geométrica de uma aproximação de menor velocidade relativa.

Tabela 3.1: Exemplificação das aproximações mútuas previstas

Noite	Evento	Mínimo Previsto (UTC)
02-02-14	Io x Europa	03:19:00
05-02-14	Europa x Ganymede	23:28:00
07-02-14	Io x Europa	23:00:00
12-02-14	Europa x Ganymede	02:21:00
14-02-14	Io x Europa	01:03:00
15-02-14	Io x Ganymede	21:51:00
19-02-14	Io x Ganymede	23:47:00
23-02-14	Io x Ganymede	00:26:00
27-02-14	Io x Europa	22:34:00
01-03-14	Europa x Ganymede	22:24:00
06-03-14	Io x Europa	00:42:00
10-03-14	Io x Callisto	00:04:00
18-03-14	Io x Europa	22:42:00
07-04-14	Io x Europa	22:35:00
⋮	⋮	⋮

Destes 59 eventos previstos, 36 foram observados com sucesso, os demais foram perdidos devido a problemas climáticos ou técnicos.

3.2 Telescópio

As observações deste projeto foram feitas no Observatório Pico dos Dias vinculado ao Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD/LNA)². Este sítio possui código IAU 874 e está localizado na longitude geográfica $-45^{\circ} 34' 57''$, latitude geográfica $22^{\circ} 32' 04''$ a uma altitude de 1864 metros acima do nível do mar em Minas Gerais, Brasil. Este sítio conta com três telescópios, o telescópio Perkin-Elmer de 1,60 metros de abertura, o telescópio Boller & Chivens de 0,60 metros e o telescópio ZEISS também de 0,60 metros de abertura, sendo este o único operado com apontamento manual.

Pelo ZEISS ser o único telescópio de apontamento manual deste sítio há uma menor pressão da comunidade astronômica no uso deste telescópio. Esta menor pressão faz com que este telescópio seja o instrumento ideal para missões com um grande número de noites e que possuam como alvo objetos brilhantes, de fácil apontamento manual, que é o caso deste projeto.

O ZEISS possui uma distância focal de 750 cm e razão focal de $f/12,5$. A Figura 3.6 mostra uma foto deste telescópio.



Figura 3.6: Telescópio ZEISS de 0,60 metros de abertura do OPD/LNA.

²Website: <http://www.lna.br/opd/opd.html>

3.3 Câmera CCD

O detector utilizado foi a câmera CCD Andor, modelo Ikon-L.

A grande vantagem desta câmera é que ela possui alta sensibilidade e uma rápida descarga, o que permite utilizarmos um pequeno tempo de integração, da ordem de poucos segundos, obtendo uma alta resolução temporal nas observações feitas, com um pequeno tempo morto entre as imagens (menor que meio segundo). Ela contém 2048 x 2048 pixels de 13,5 micrômetros de lado e dado as configurações usuais adotadas neste projeto a contagem máxima de cada pixel (faixa dinâmica do CCD) é da ordem de 65.000 ADUs (da sigla em inglês Analogic-Digital Units) para a saturação. A eficiência deste detector é de aproximadamente 50% para a região do comprimento de onda adotado (ver Seção 3.4).

Esta câmera junto com o telescópio utilizado possui um campo de visão, ou FOV (do inglês Field Of View) de 12,63 minutos de arco por 12,63 minutos de arco e uma resolução de 0,37 segundos de arco por pixel.

3.4 Filtro

Devido ao intenso brilho de Júpiter, as observações dos satélites próximos são comprometidas pela intensa luz difusa deste planeta gigante. No intuito de reduzir esta interferência fotométrica, que aumenta o ruído e muitas vezes pode inviabilizar inteiramente a observação, duas soluções são encontradas: A primeira é a utilização de baixíssimo tempo de exposição, inferior ao segundo. Esta limitação pode ser crucial dependendo do CCD utilizado. A segunda solução é a utilização de filtros óticos específicos de banda estreita. Ilustrado pela Figura 3.7 estão, na esquerda, uma imagem de Júpiter feito com o CCD Andor Ikon-L utilizando o Filtro I do sistema Johnson, centrado em aproximadamente 800 *nm* (nanômetros) com banda de passagem de 200 *nm*. Na direita uma imagem feita com o mesmo detector porém utilizando o filtro Metano centrado em 889 *nm*, com banda de 15 *nm*.

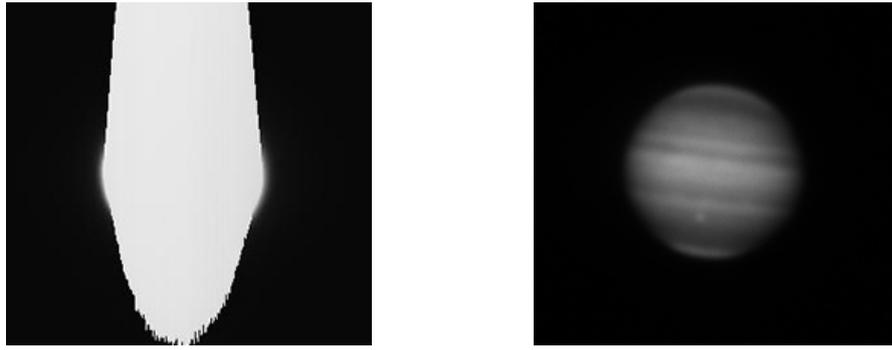


Figura 3.7: Na esquerda, imagem de Júpiter feito com o CCD Andor Ikon-L utilizando o Filtro I do sistema Johnson, na direita uma imagem feita com o mesmo detector porém utilizando o filtro Metano centrado em 889 nm , com banda de 15 nm .

A Figura 3.7 deixa claro que a utilização do filtro Metano é a mais adequada. A curva de transmissão desse filtro consta na Figura 3.8.

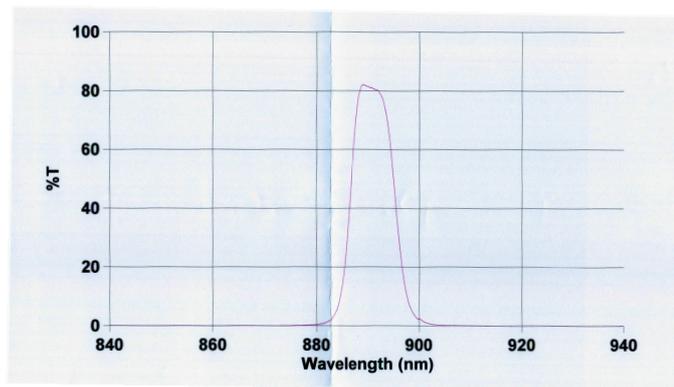


Figura 3.8: Curva de transmissão do filtro Metano.

O filtro metano é o mais adequado uma vez que neste comprimento de onda específico há uma banda de absorção do gás Metano e devido à existência desse gás na atmosfera superior de Júpiter o seu albedo, nesta banda particular, diminui para valores próximos de 0,05, como visto na Figura 3.9 de Karkoschka (1994, 1998), onde observa-se o albedo dos planetas gigantes em função do comprimento de onda. Note a queda no albedo dos planetas gigantes para o comprimento de onda de 889 nm .

Com o seu albedo diminuído a luz difusa de Júpiter também é atenuada, fazendo com que Júpiter tenha brilho similar ao dos satélites Galileanos, uma vez que estes satélites não possuem alterações significativas em seu albedo neste comprimento de onda particular. Outro fator interessante neste filtro é que o ruído (seeing) das imagens diminui, por trazer o comprimento de onda efetivo mais para o vermelho do que para o azul, permitindo maior razão Sinal-Ruído (SNR), mesmo para exposições de poucos segundos.

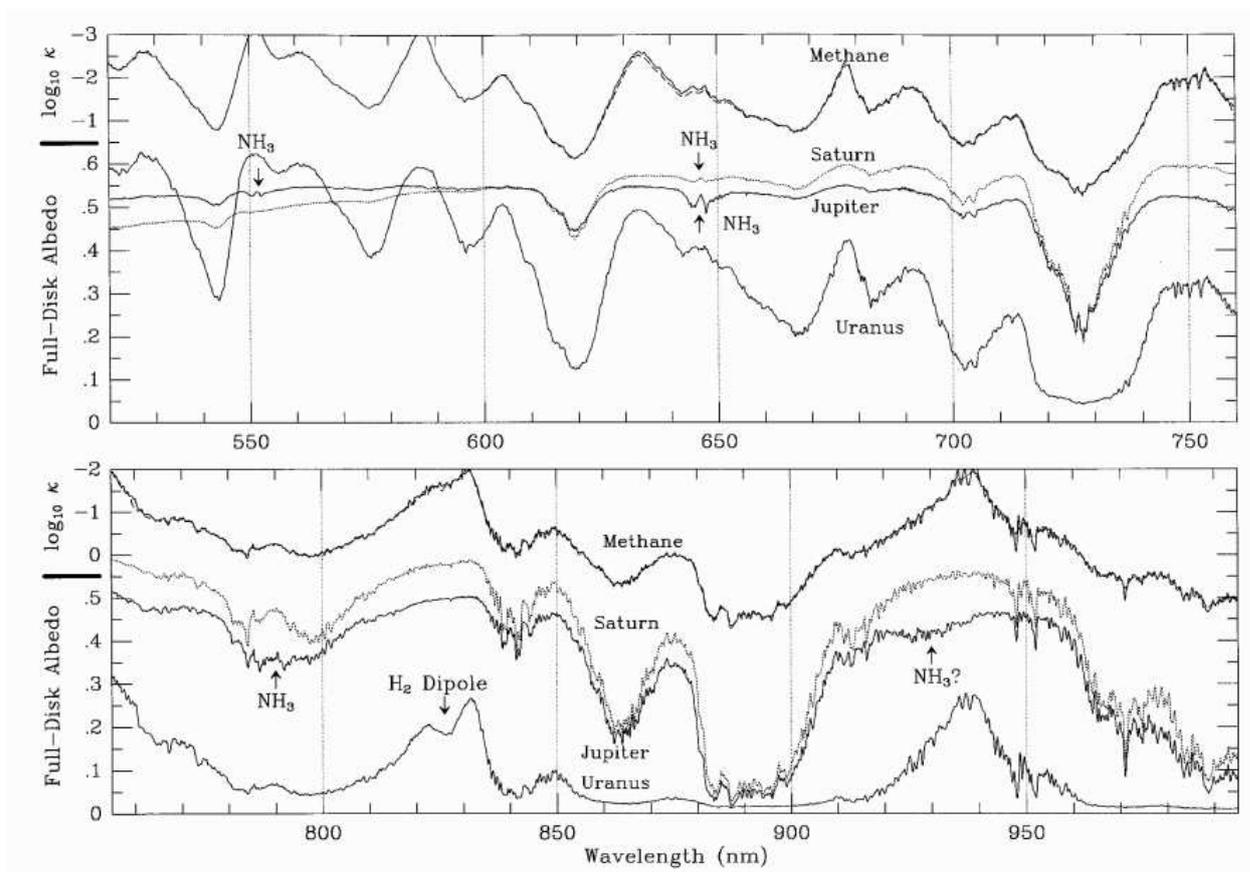


Figura 3.9: Variação do albedo de Júpiter e dos demais planetas gigantes pelo comprimento de onda (Karkoschka, 1994; Karkoschka, 1998)

3.5 Calibração do registro de tempo nas observações

Para se obter a determinação do instante central dos eventos com confiabilidade é importante que o instante gravado na imagem tenha precisão adequada em relação ao Tempo Universal Coordenado. Para tal é necessário a calibração do tempo do computador que está conectado a câmera CCD, utilizando um GPS ou software adequados que fazem esta calibração via internet ou ftp.

Para as observações deste projeto um GPS foi utilizado fazendo a correção temporal a cada minuto. Esta correção possuía valores típicos da ordem de 1 *ms*, porém uma outra alternativa é a utilização de softwares tal qual o Dimension⁴ ³. Este software faz a correção temporal via SNTP, um protocolo de baixo nível da internet, a intervalos específicos determinados pelo usuário. Estas calibrações atingem níveis de 20 *ms* feitas a cada dez minutos, não havendo uma grande flutuação ou tendências, como pode ser observado pelo gráfico da Figura 3.10.

³Website: <http://www.thinkman.com/dimension4/>

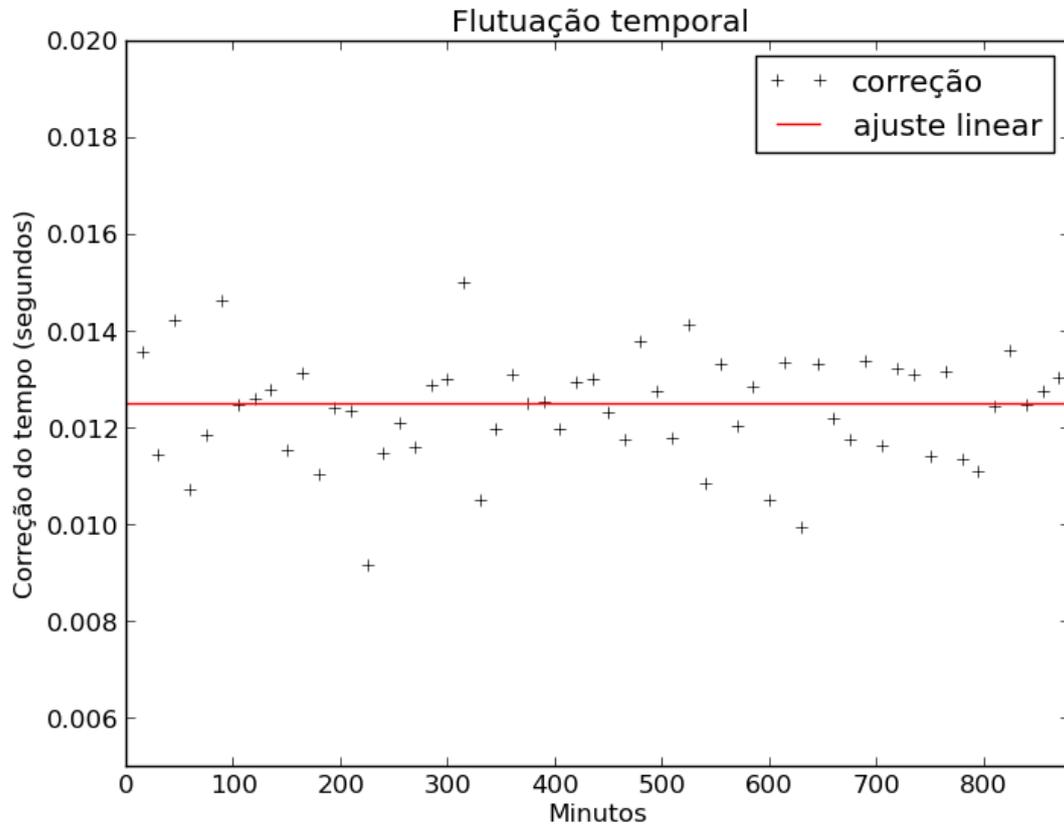


Figura 3.10: Curva de correção temporal utilizando o Dimension⁴.

Como esta flutuação, para ambos os casos, é inferior à precisão alcançada ela pode ser desconsiderada, porém em casos em que essa calibração não é feita o instante central é severamente comprometido podendo até mesmo ser perdido. Esta calibração é de extrema importância para observações dependentes do tempo como neste projeto, os fenômenos mútuos e ocultações estelares.

Capítulo 4

Tratamento de dados

Os dados obtidos nesta campanha observacional, descrita no capítulo anterior, consistem de imagens FITS feitas ao longo dos eventos de interesse com o instrumento descrito. Estas imagens carregam efeitos indesejados oriundos da instrumentação, alguns dos quais, é possível corrigir ou diminuir. Somente após esta calibração é possível fazer a astrometria dos satélites com a qualidade desejada. Após esta calibração os fotocentros dos satélites são determinados e, em terceiro momento, corrigidos de efeitos como a fase solar e a refração diferencial atmosférica.

Para a calibração fotométrica destas imagens, elas foram tratadas utilizando o pacote IRAF - Image Reduction and Analysis Facility - e a astrometria foi feita utilizando o PRAIA - Pacote de Redução Automática de Imagens Astronômicas. Nesta seção está explicitado toda esta calibração e correções necessárias e, por fim, a determinação dos centróides dos satélites.

4.1 Calibrações fotométricas

As Calibrações fotométricas visam limpar a imagem de efeitos instrumentais indesejados. Estes efeitos incluem o ruído de leitura do CCD utilizado sobre as imagens, a não homogeneidade deste CCD, possíveis grãos de poeira sobre a câmera ou a lente, pixels defeituosos - mortos ou quentes. Os efeitos descritos podem ser amenizados ou eliminados utilizando imagens de calibração, tal quais as imagens do tipo Bias ou Zero e as imagens Flat.

Um terceiro tipo de imagem de calibração é utilizado para a correção necessária devido ao aquecimento do CCD para longos tempos de integração. Como as imagens para este projeto possuem tempo de exposição de poucos segundos, de 1 a 5 segundos, esta correção não é necessária. As imagens utilizadas para calibrar este efeito são denominadas imagens Darks.

4.1.1 Bias

O intuito de uma câmera CCD é transformar fótons em elétrons, codificando assim uma imagem visual em sinais eletrônicos que serão lidos e armazenados de maneira a termos acesso àquela imagem sempre que necessário. Entretanto, mesmo na ausência total de luz, há uma quantidade mínima de elétrons que irá popular um determinado pixel do CCD. Esta característica deste componente eletrônico faz com que a contagem de um pixel do CCD nunca seja zero.

Nesse contexto as imagens de Bias se fazem úteis e necessárias. São imagens tiradas com um tempo de exposição igual a zero e com o obturador (do inglês shutter) fechado, de maneira que não haja luz atingindo o CCD. Dessa forma toda e qualquer contagem existente na imagem resultante é relacionada apenas à essa quantidade de elétrons de base. Esta contagem está associada a cada pixel, de maneira que não há um valor representativo para todo o CCD, como observado na Figura 4.1. Para a câmera Andor Ikon-L, utilizada neste projeto, a contagem média das imagens de Bias é de 1350 ADUs.

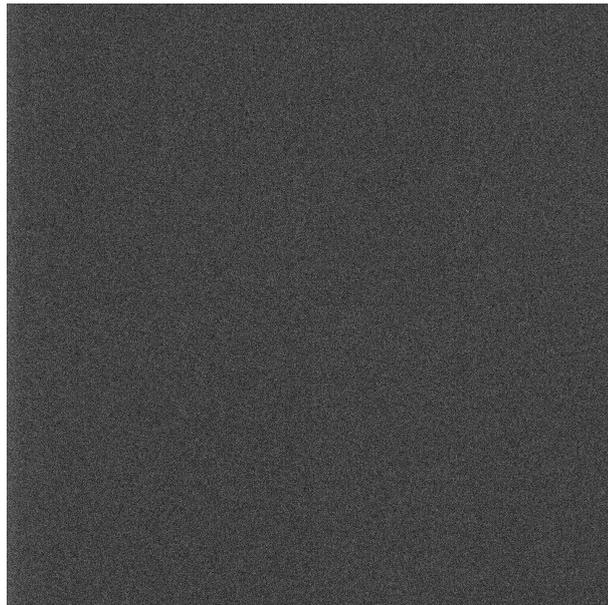


Figura 4.1: Imagem de Bias para correção da contagem mínima observada nos detectores na ausência total de luz.

Para obtermos uma boa imagem de Bias, a mediana, pixel a pixel, em cima de uma quantidade considerável destas imagens é feita. Para este projeto utilizamos cerca de 50 destas imagens para uma boa estatística e utilizamos o pacote IRAF para construir esta imagem. Para que as imagens de ciência não estejam afetadas deste artefato da eletrônica do CCD, é necessário subtrair a imagem de Bias das imagens de interesse.

4.1.2 Flat

Cada pixel do CCD funciona de forma independente no contexto de captação de luz e transformação desta luz em contagens eletrônicas (ADUs). Se todos os pixels fossem exatamente iguais todos teriam a mesma sensibilidade, transformando assim a mesma quantidade de luz em uma mesma quantidade de elétrons. Entretanto isto não ocorre, a sensibilidade de cada pixel pode variar em relação aos seus pares por questões eletrônicas da fabricação do CCD ou por obstrução do caminho ótico até aquele pixel em particular, presença de poeira por exemplo.

O segundo tipo de imagem de correção fotométrica que precisa ser feito são as imagens do tipo Flat que visam corrigir esta diferença de sensibilidade em cada pixel. Para tal, apontamos o telescópio para uma tela em branco iluminada de maneira homogênea, assim garantimos que todos os pixels do CCD estejam submetidos a mesma quantidade de luz. A Figura 4.2 representa uma dessas imagens, onde fica claro a diferença de sensibilidade de cada pixel.

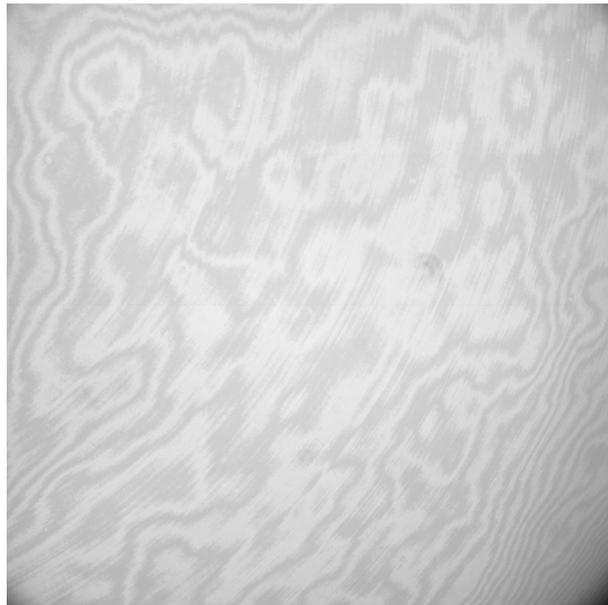


Figura 4.2: Imagem de Flat para correção da não homogeneidade da sensibilidade dos diferentes pixels do CCD

Assim como nas imagens de Bias, uma quantidade considerável destas imagens são feitas com o intuito de termos uma boa amostra e assim concatenamos todas em uma única utilizando o pacote IRAF. Esta imagem por sua vez é utilizada na normalização das imagens de ciência, garantindo assim que a influência da diferença da sensibilidade dos pixel esteja minimizada ou até mesmo anulada.

4.2 Redução dos dados

Uma vez que as imagens estejam limpas das influências fotométricas do detector podemos utiliza-las na determinação dos parâmetros de interesse. Esta determinação em cima das imagens observadas é denominada redução das imagens e neste etapa utilizamos o PRAIA de Assafin et al. (2011). O foco desta redução é caracterizar com alta precisão os fotocentros dos dois satélites de interesse e, após isso, corrigir estes fotocentros de efeitos atmosféricos e da fase solar destes corpos a fim de determinar a distância angular aparente verdadeira no plano do céu entre estes astros.

Para tal é necessário determinarmos a escala de placa e a orientação do CCD em relação a um sistema de coordenadas celestes padrão, como o Sistema Internacional de Coordenadas Celestes (ICRS da sigla em inglês) (Arias et al., 1995), determinando assim com precisão as direções de ascensão reta e declinação nas imagens e o quanto cada pixel representa em segundos de arco. No lugar de catálogos astrométricos de estrelas, utilizamos as próprias efemérides dos satélites para materializar o referencial ICRS nas imagens, como veremos adiante.

A redução destas aproximações mútuas dependem de dois arquivos de entrada. O primeiro contém os fotocentros (x,y) e o tempo, em data juliana, em cada imagem, o segundo contém as efemérides (α, δ) dos satélites envolvidos, o tempo, em data juliana, para cada posição, a altura prevista para os objetos, o ângulo horário (HA) e a distância Terra-Objeto em quilômetros.

Primeiramente adicionamos os efeitos de fase solar e de refração nas efemérides, assim obtemos o valor, em ascensão reta e declinação, que seriam observados (como consta nas seções 4.2.2 e 4.2.3). Estas efemérides, distorcidas destes efeitos astronômicos, são comparadas com os fotocentros determinados (seção 4.2.1). A partir desta comparação se determina a escala de placa e a orientação como explicado com maiores detalhes na seção 4.2.4 e 4.2.5. Uma vez determinadas as escalas em α e δ das imagens retiramos os efeitos causados pela refração e pela fase solar a fim de obter parâmetros observados livres destes efeitos.

4.2.1 Astrometria diferencial de curtíssimo campo

Na determinação do fotocentro dos satélites utilizamos o PRAIA. Este pacote foi desenvolvido pelo Professor Doutor Marcelo Assafin em colaboração com outros pesquisadores do grupo de Astrometria do Rio de Janeiro. O PRAIA foi desenvolvido com o intuito de reduzir automaticamente as imagens astronômicas guardadas em formato FITS fazendo tanto fotometria quanto a astrometria. No contexto deste trabalho utilizamos uma das tasks que ajusta gaussianas circulares bi-dimensionais às imagens dos objetos observados, para determinar seus fotocentros (x, y) . Como o diâmetro angular dos satélites, em torno de 1.0 segundos de arco, é inferior ao seeing obtido não é necessário utilizar gaussianas

elípticas para o ajuste do fotocentro, isto seria necessário caso o seeing fosse menor que o diâmetro angular dos satélites e assim fosse possível observar a fase solar em que estes satélites se encontram.

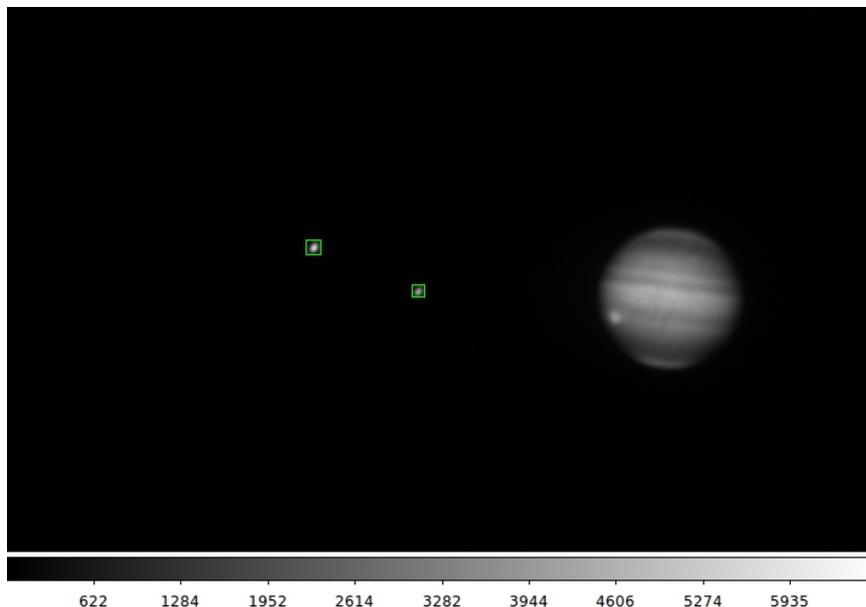


Figura 4.3: Determinação dos fotocentros para uma das imagens da aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.

Fazemos este ajuste em ambos os satélites de interesse e assim determinamos o seus fotocentros nas imagens, como ilustrado pela Figura 4.3. A largura à meia altura ajustada representa o seeing da imagem, que está diretamente relacionado com as condições atmosféricas no momento da observação.

Para eliminar efeitos instrumentais e astronômicos que afetam o fotocentro de ambos os satélites de forma igual no caso de estarem relativamente muito próximos no plano do céu, utilizamos o conceito de astrometria diferencial de curtíssimo campo para determinar a distância aparente no céu entre os dois astros e não suas posições individuais.

Usamos as efemérides conhecidas dos satélites para calcular algumas correções. Como ficará claro, pela natureza do método, não há a necessidade dessas efemérides serem extremamente precisas, embora o bom senso sugira que usemos sempre as melhores disponíveis. É que, a partir de um certo ponto, efemérides mais ou menos precisas resultam em iguais valores de correção. Em outras palavras, podemos dizer que, embora usemos efemérides, os resultados observacionais do método são independentes delas.

Assim, usamos as efemérides para calcular correções de posição devido aos efeitos de refração atmosférica e de fase solar. A escala de placa e a orientação do CCD também foram determinadas com o auxílio das efemérides.

Nas seções seguintes, descreveremos mais detalhadamente esses cálculos. Uma vez determinadas a escala e as direções, podemos extrair das aproximações mútuas não só o

instante central, mas também distâncias e velocidades relativas observadas com grande precisão e de forma, na prática, independente das efemérides.

4.2.2 Fase solar

Os planetas e satélites são corpos que não possuem luz própria. A luminosidade atribuída a estes corpos é originária da luz do Sol refletida. A configuração geométrica entre o Sol, o observador e o alvo origina a fase solar do objeto, efeito este facilmente percebido nos corpos celestes próximos, como a Lua e Vênus. O ângulo de fase, i , é o ângulo entre a direção da luz solar incidente no objeto e a direção da luz refletiva que chega no observador. A Figura 4.4 ilustra este ângulo. Esta fase, por sua vez, faz com que o fotocentro da imagem observada pelo CCD seja diferente do centro geométrico (para todos os efeitos, o centro de massa) do objeto, como representado pela Figura 4.5. O objetivo desta etapa é caracterizar e corrigir a distância entre os dois objetos deste efeito.

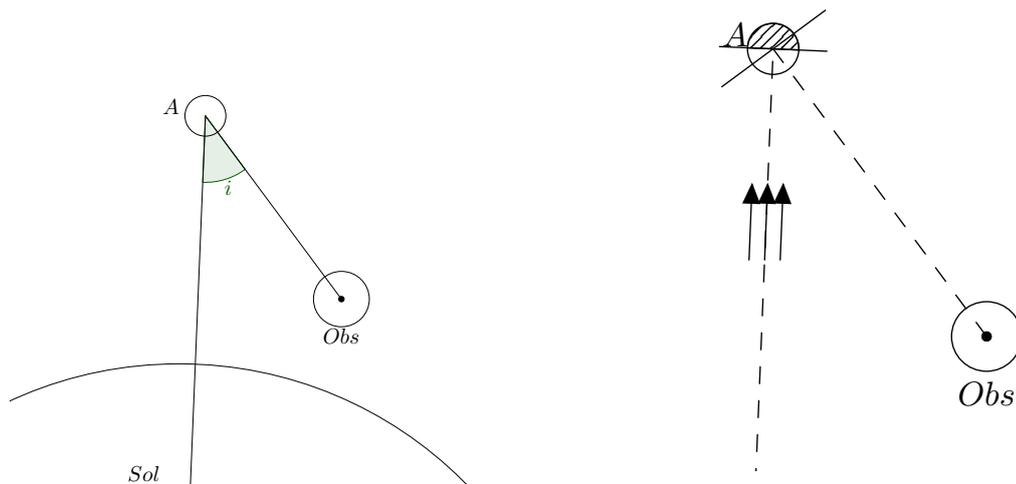


Figura 4.4: Na esquerda: O ângulo de fase, i , é o ângulo entre a direção da luz incidente do Sol no alvo e a direção do observador. Na direita esta representado a aplicação do efeito de fase no objeto observado, onde a parte hachurada representa a região não iluminada do objeto.

A diferença entre o fotocentro da imagem e o centro geométrico do objeto, segmento \overline{FC} , pode ser calculada utilizando a equação 4.1, onde o r é o raio do objeto, A_f um coeficiente relacionado com a lei de reflexão e i o ângulo de fase.

$$|\overline{FC}| = A_f r \sin(i/2) \quad (4.1)$$

Segundo Lindegren (1977), A_f pode ser utilizado como uma constante igual a 0.75 para estes corpos. Os tamanhos dos satélites Galileanos são conhecidos a partir de observações

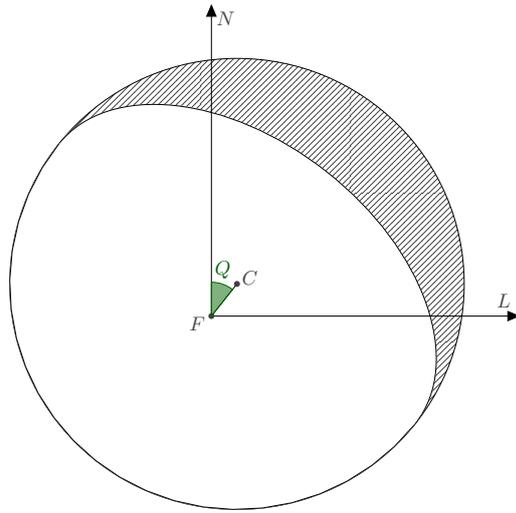


Figura 4.5: Influência da fase solar em um satélite. N denomina o Norte, e L o Leste, o ponto F representa o fotocentro do objeto e C o centro geométrico. O ângulo Q é o ângulo sub-solar que determina a direção da fase no plano tangente à esfera celeste

das Voyagers¹ e os ângulos de fase são fornecidos pelas efemérides. Falta apenas calcular a direção em que esta fase estará no plano tangente à esfera celeste. Este ângulo, por sua vez, é denominado ângulo sub-solar, Q , e pode ser calculado com a equação 4.2 (Green, 1985) onde o índice \odot indica as coordenadas do Sol. A ambiguidade deste ângulo pode ser resolvida da seguinte forma, quando o numerador for positivo este ângulo está nos dois primeiros quadrantes, este ângulo também é fornecido pelas efemérides.

$$\tan Q = \frac{\cos \delta_{\odot} \sin(\alpha_{\odot} - \alpha)}{\cos \delta \sin \delta_{\odot} - \sin \delta \cos \delta_{\odot} \cos(\alpha_{\odot} - \alpha)} \quad (4.2)$$

O ângulo de fase e a direção do ponto sub-solar não é alterada no intervalo dos eventos, de poucas horas, e possui o mesmo valor para ambos os satélites.

O que medimos a partir dos ajustes feitos nas imagens originadas de uma câmera CCD são os fotocentros dos corpos. Desta forma a distância entre os fotocentros dos satélites é determinada utilizando a equação 4.3, onde o índice f representa *fotocentro*.

$$d_f = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.3)$$

Uma vez que a orientação das imagens estejam acordadas com a orientação do ângulo Q , norte para cima (declinações positivas) e leste para direita (ascensões retas crescentes), as correções em x e y são dados na forma:

¹Website: <http://voyager.jpl.nasa.gov/>

$$x_f = Ar \sin(i/2) \sin Q \quad (4.4)$$

$$y_f = Ar \sin(i/2) \cos Q \quad (4.5)$$

Assim as coordenadas dos centros geométricos são descritas da seguinte forma, onde o índice c representa o centro geométrico do corpo:

$$x_{c1} = x_1 + x_{f1} \quad (4.6)$$

$$y_{c1} = y_1 + y_{f1} \quad (4.7)$$

$$x_{c2} = x_2 + x_{f2} \quad (4.8)$$

$$y_{c2} = y_2 + y_{f2} \quad (4.9)$$

A distância entre os centros geométricos é calculada utilizando 4.10

$$d_c = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2} \quad (4.10)$$

Como esta correção é diferente para cada satélite ela influencia o instante central, influenciando mais quanto maior for o ângulo de fase e quanto maior for a diferença entre os raios dos satélites envolvidos. Para exemplificar o instante central pode ser modificado de até seis segundos para um ângulo de fase típico de dez graus. Ressalto por fim a extrema importância desta correção.

4.2.3 Refração

A luz proveniente dos astros quando penetra na atmosfera da Terra não o faz encontrando de imediato uma atmosfera igual àquela que respiramos. A densidade da atmosfera superior de nosso planeta é muito menor do que a densidade da atmosfera próxima a superfície. Tendo que atravessar camadas cada vez mais densas da atmosfera a luz é refratada de maneira gradual pela atmosfera causando um desvio da posição observada para a posição real do astro que está relacionada com a massa de ar entre o observador e o astro. Esta diferença é tão maior quanto maior for a distância zenital do objeto (Green, 1985).

As correções de refração são dadas pelas equações 4.11 e 4.12:

$$\alpha' - \alpha = -R_m \sec \delta \sin \psi \quad (4.11)$$

$$\delta' - \delta = -R_m \cos \psi \quad (4.12)$$

Onde R_m é o ângulo de refração atmosférica e ψ é o ângulo paralático entre o pólo

celestial e o zênite como visto da posição do astro observado. Dado um observador na Terra este ângulo pode ser escrito como:

$$\sin \psi = \frac{\cos \phi \sin HA}{\sin z_0} \quad (4.13)$$

$$\cos \psi = \frac{\sin \phi - \sin \delta \cos z_0}{\cos \delta \sin z_0} \quad (4.14)$$

Onde ϕ é a latitude terrestre do observador, HA é o ângulo horário do astro e z_0 a distância zenital. Este ângulo de refração atmosférica depende da distância zenital e das condições atmosféricas da seguinte forma:

$$R_m = A \tan z_0 + B \tan^3 z_0 \quad (4.15)$$

Onde A e B são parâmetros relacionados com as condições atmosféricas. Para as condições padrões de nossa atmosfera assume-se que A é igual a $60''29$ e B é igual a $0''06688$ (Stone 1996; Green 1985). Variando-se as condições climáticas estes fatores não se alteram de forma significativa para este estudo uma vez que os satélites estudados estão muito próximos.

Estas correções são similares para ambos os satélites, mas como variam no tempo podem causar variações de até um segundo no instante central além de influenciar na distância relativa mínima e na determinação da escala de placa para objetos com altas distâncias zenitais.

4.2.4 Escala de Placa

A escala de placa de um CCD dá a relação entre ângulos na esfera celeste e distâncias lineares correspondentes no plano focal do telescópio que contém o detector, podendo ser expressa em segundos de arco por pixel do detector. A distância obtida pela astrometria diferencial é apenas a distância instrumental entre os dois satélites. Para determinarmos a distância angular entre os dois astros é necessário determinarmos com precisão a escala de placa para cada observação uma vez que pequenas alterações de temperatura ou flexões podem causar pequenas, porém relevantes, variações neste parâmetro.

Com a ausência de estrelas de referência dos catálogos astrométricos para a calibração das imagens o mecanismo utilizado na determinação desta escala é a distância instrumental entre os satélites comparando-a com as distâncias previstas pelas efemérides afetadas de fase solar e refração. Analisar a velocidade relativa instrumental comparando-a com a velocidade relativa das efemérides provê resultados equivalentes.

Sugerido pela primeira vez por Pascu (1994) a posição relativa de dois satélites separados por uma pequena distância possui alta precisão uma vez que as órbitas destes satélites estejam bem determinadas. Essa descoberta foi feita utilizando imagens de placas foto-

gráficas e mais tarde esse conceito foi estendido para observações com CCD dos satélites Galileanos por Peng et al. (2008) que chamou esta precisão de *precision premium*.

Utilizando este conceito podemos afirmar que a relação entre a distância observada, d_o em pixels, e a distância esperada, d_e em segundos de arco, vai conter majoritariamente uma relação linear onde o coeficiente angular será a escala de placa, P_s , como observado na equação (4.16). A diferença real existente entre a observação e a efeméride estará representada pelo coeficiente linear e termos de outras ordens.

$$P_s = \frac{d_e}{d_o} \quad (4.16)$$

A Figura 4.8 ilustra um gráfico entre as distâncias relativas observadas e previstas pelas efemérides, onde está também ilustrado o ajuste feito por uma regressão linear e o resíduo deste ajuste.

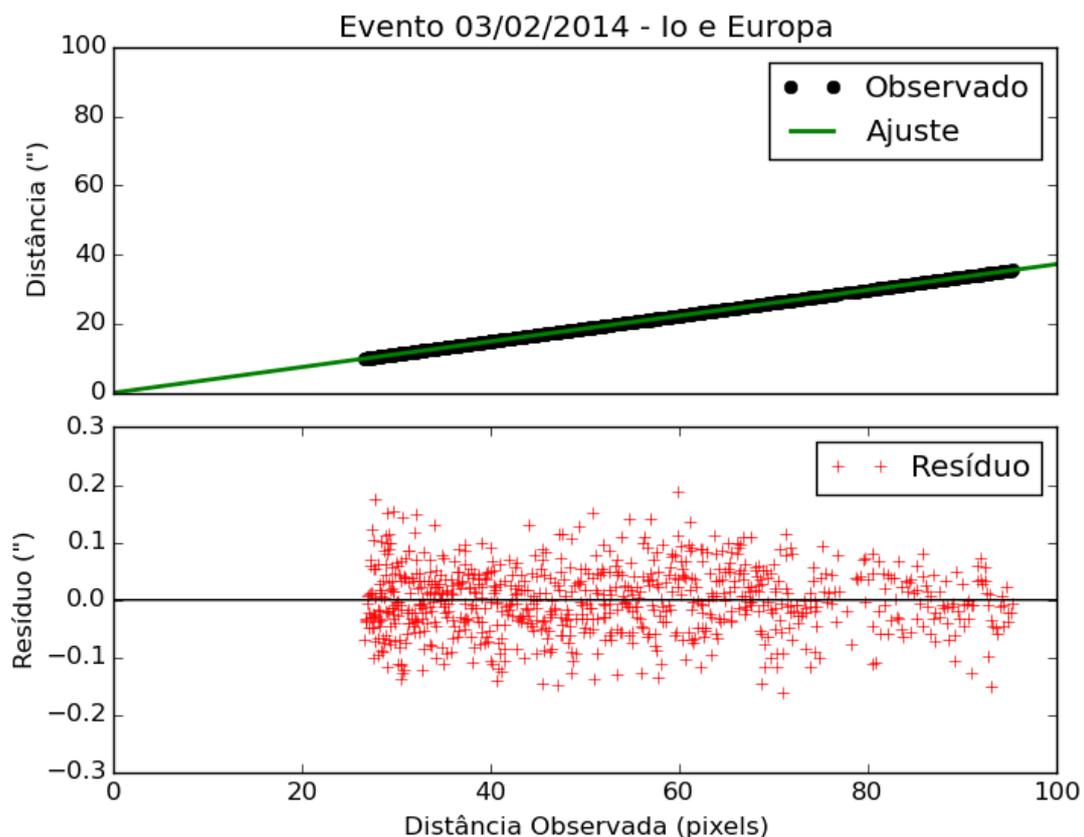


Figura 4.6: Ajuste da escala de placa, P_s , para a aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.

A precisão média da escala de placa obtida com este método é da ordem de $0,1 \text{ mas/pixel}$ um valor extremamente preciso dado que a escala de placa nominal do instrumento, 370 mas/pixel .

4.2.5 Orientação do CCD

Para determinar a orientação do CCD em relação ao plano do céu (direções de ascensão reta e declinação) precisamos recorrer novamente a distância relativa entre os dois satélites. Agora, uma vez que os eixos (x, y) estão normalizados e com a mesma escala, utilizamos a linha que liga os satélites e os ângulos dela com os respectivos eixos - (x, y) e eixos de ascensão reta e declinação - para determinar a orientação do CCD em alfa e delta.

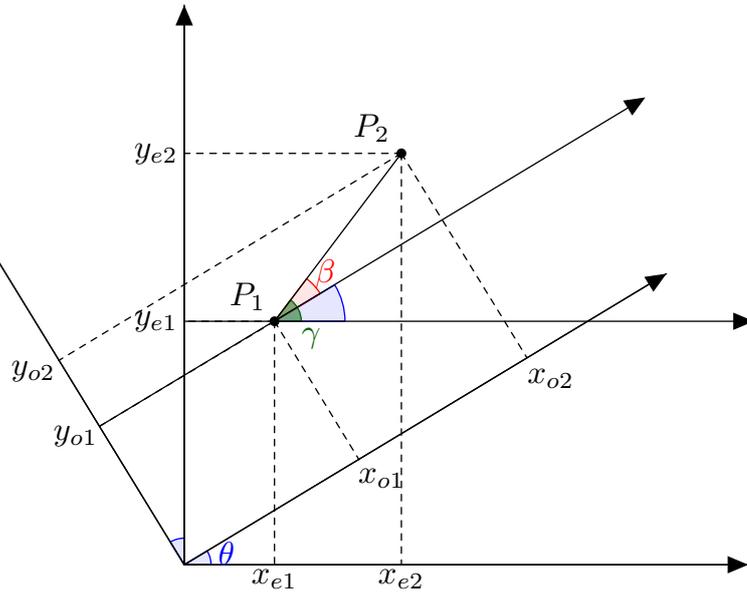


Figura 4.7: A orientação dos eixos do CCD em relação aos eixos alfa e delta do plano do céu.

Como ilustrado pela Figura 4.7, para cada posição relativa entre os satélites determinamos os ângulos que os eixos de referência, de ambos os sistemas, fazem com o segmento de reta que conecta os dois satélites, d , onde γ é o ângulo em relação ao eixo de orientação do plano do céu ($\alpha \cos \delta, \delta$) aqui representados por (x_e, y_e) e β é o ângulo em relação ao eixo (x_o, y_o) do CCD. As equações (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20) são utilizadas na determinação destes ângulos para cada imagem.

$$\Delta x_e = d \cos \gamma \quad (4.17)$$

$$\Delta y_e = d \sin \gamma \quad (4.18)$$

$$\Delta x_o = d \cos \beta \quad (4.19)$$

$$\Delta y_o = d \sin \beta \quad (4.20)$$

Por fim, o ângulo entre os eixos será igual a diferença entre estes dois ângulos que se manterá constante para todas as imagens a exceção de movimentação mecânica do encaixe câmera-telescópio.

$$\theta = \gamma - \beta \quad (4.21)$$

Para ilustrar essa determinação utilizamos a aproximação entre Io e Europa que aconteceu em 03 de Fevereiro de 2014. A precisão da orientação obtida é melhor que 0,03 graus.

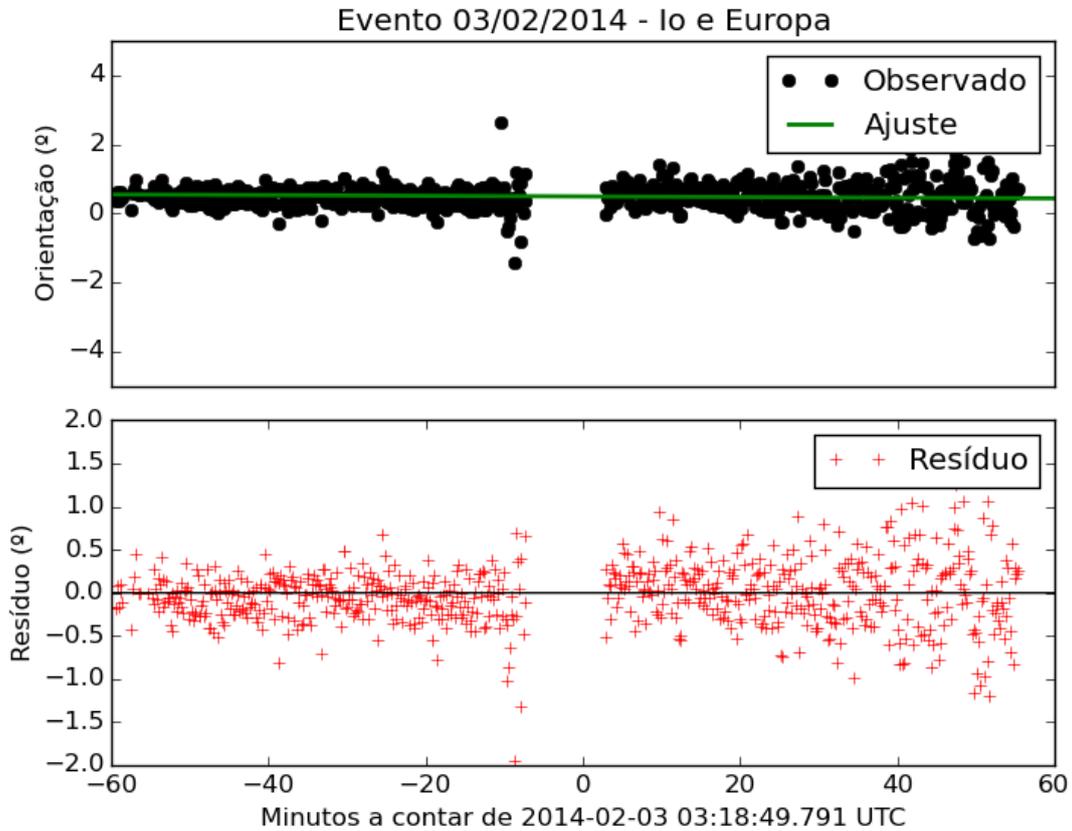


Figura 4.8: Ajuste da orientação do CCD, θ , para a aproximação entre Io e Europa que aconteceu no dia 03 de Fevereiro de 2014.

Capítulo 5

Resultados

Reunimos nesta seção os resultados de 36 aproximações mútuas entre os satélites Galileanos que ocorreram entre 2014 e 2015, período vigente deste projeto. Dividimos os eventos em três categorias principais: (i) os eventos que aconteceram antes do período dos fenômenos mútuos; estes são 9 eventos que ocorreram no período de 2014-1; (ii) aproximações que ocorreram durante o período dos fenômenos mútuos de Júpiter; estes são 22 eventos que ocorreram nos períodos de 2014-2 e 2015-1; e (iii) eventos de qualidade inferior; estes são 5 eventos que ocorreram ao longo de todo o período do projeto.

Todas estas aproximações foram observadas com o telescópio ZEISS de 0,60 metros de abertura do OPD/LNA com a instrumentação explicitada no capítulo 3 desta dissertação. O modelo teórico apresentado no capítulo 2 foi ajustado às posições relativas observadas através do método de mínimos quadrados utilizando um programa escrito em Python para este projeto. Estas posições, ou distâncias relativas, foram obtidas como descrito no capítulo 4 com o programa em Python, mencionado anteriormente, que faz a redução completa e automática destas aproximações mútuas.

Comparamos os resultados destas 36 aproximações com o resultado fruto da análise da efeméride NOE - 5 - 2010 - GAL de Lainey *et al.* (2009) fornecidas pelo IMCCE que é atualmente considerada a representação mais precisa do sistema joviano. Todos os satélites Galileanos estiveram envolvidos nestas aproximações. A diferença observada é de poucos segundos para o instante central o que condiz com a qualidade das efemérides dos satélites Galileanos.

Por fim, analisamos cinco aproximações derivadas das imagens da campanha internacional dos fenômenos mútuos de 2009 e comparamos estes resultados com a análise das ocultações utilizando a fotometria diferencial em Arlot *et al.* (2014). Estas cinco observações foram feitas com o telescópio ZEISS de 0,60 metros de abertura do OPD/LNA. O detector utilizado foi a câmera CCD EEVCCD-02-061-206 denominada CCD301 que possui um arranjo de 385 x 578 pixels quadrados de $22\mu m$ de lado. O filtro utilizado está centrado em 890 nm com 20 nm de passagem, ligeiramente superior ao utilizado neste projeto. Maiores informações sobre estas imagens estão presentes na dissertação de

Mestrado de Alex Dias Oliveira defendida em 2011 pelo Observatório do Valongo, UFRJ e em Dias-Oliveira *et al.* (2013) e Arlot *et al.* (2014).

Esta comparação retrata a robustez do método das aproximações mútuas ao observarmos a coerência nos resultados determinados de maneira completamente independente. Com esta comparação obtemos diferenças inferiores à soma das incertezas dos dois ajustes.

Foram obtidas precisões entre 3 *mas* (9 km) e 30 *mas* (90 km) para a distância mínima (parâmetro de impacto) dos eventos de 2014-1, 0,01 *mas/s* (30 *m/s*) e 0,11 *mas/s* (330 *m/s*) para a velocidade relativa e entre 0,12 s e 9,45 s para o instante central. O Anexo 1 reúne as curvas de todos os eventos observados que estão exemplificados nas seções seguintes.

5.1 Resultados são independentes das efemérides

Como mencionado anteriormente é necessário utilizamos informações das efemérides para fazer as correções de fase solar e refração atmosférica e na determinação da escala de placa e orientação do CCD. Por consequência isto faria com que os resultados obtidos aqui estivessem influenciados pela efeméride utilizada, isto é, utilizando diferentes efemérides, diferentes resultados seriam determinados. Entretanto, como apontado por Peng *et al.* (2012), utilizar diferentes efemérides não causa diferença relevante para os resultados obtidos, sendo a escala de placa, por exemplo, igual, dentro da incerteza, utilizando efemérides diferentes.

Para ilustrar isto optamos por duas efemérides a NOE-5-2010-GAL de Lainey *et al.* (2009) e a efeméride jup310 do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*)¹. Os resultados para os instantes centrais de 3 eventos escolhidos como exemplos seguem na Tabela 5.1 e a escala de placa determinada a partir de cada uma das efemérides em segundo de arco por pixel.

Nota-se que os valores para o instante central obtidos a partir de cada efeméride são diferentes, porém esta diferença não afeta os resultados da observação. O mesmo acontece para o valor da escala de placa determinado.

Com isto podemos garantir que não só o instante central, porém os demais parâmetros, como a distância mínima e a velocidade relativa, são independentes da efeméride utilizada. Para as futuras comparações optamos por utilizar as efemérides NOE-5-2010-GAL de Lainey *et al.* (2009) por ser considerada mais precisa pela literatura.

¹Website: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>

Tabela 5.1: Comparação entre os resultados obtidos e as efemérides do jup310 e a NOE-5-2010-GAL para o instante central.

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	NOE		JPL	
		Obs hh:mm:ss	Ephem hh:mm:ss	Obs hh:mm:ss	Ephem hh:mm:ss
03-02-2014	IaE	03:18:49,791 (0,203)	03:18:43,045 (0,001)	03:18:49,792 (0,620)	03:18:42,314 (0,001)
	Escala ($''/px$)	0.37214	(0,00015)	0.37217	(0,00012)
	Orientação ($^{\circ}$)	0,49	(0,05)	0,46	(0,04)
05-02-2014	EaG	23:27:54,720 (0,666)	23:27:47,782 (0,001)	23:27:54,720 (0,771)	23:27:51,900 (0,001)
	Escala ($''/px$)	0.37478	(0,00056)	0.37479	(0,00057)
	Orientação ($^{\circ}$)	-0.69	(0,03)	-0.70	(0,03)
19-02-2014	IaG	23:46:35,795 (0,763)	23:46:31,682 (0,001)	23:46:35,795 (0,516)	23:46:35,224 (0,001)
	Escala ($''/px$)	0.37287	(0,00095)	0.37282	(0,00086)
	Orientação ($^{\circ}$)	-0.75	(0,07)	-0.80	(0,05)

5.2 Aproximações de 2014-1

As aproximações de 2014-1 ocorreram antes do período dos fenômenos mútuos dos satélites Galileanos. A configuração geométrica Terra-Júpiter-Sol permite que durante toda a aproximação os satélites estejam separados por uma distância superior ao seeing. Esta separação permite que os satélites estejam distinguíveis a todo momento, não havendo a sobreposição de suas PSFs (do inglês Point Spread Function).

Uma característica relevante destes eventos é que eles serão similares àqueles que ocorrerão após a atual campanha de fenômenos mútuos de 2014-2015, período este que a astrometria não poderá ser feita pela fotometria dos fenômenos mútuos. É época esta onde apenas a astrometria clássica CCD pode ser utilizada para se obter posições destes satélites e esta técnica não possui a precisão conferida pelos fenômenos mútuos. Isto é uma das motivações para o desenvolvimento de nossa nova técnica.

Escolhemos como exemplo destes eventos a aproximação entre Io e Europa que ocorreu em 03 de Fevereiro de 2014. O seeing da noite esteve em torno de 1,9 segundos de arco, e o instante central do evento ocorreu com Júpiter a uma distância zenital de aproximadamente 56° . Mais de 800 imagens FITS foram analisadas, cada qual com três segundos de exposição, e o gráfico da distância aparente entre os satélites em função do tempo pode ser observado na Figura 5.1.

Note-se que os ajustes polinomiais em função do tempo são feitos com o quadrado da distância, mas para maior conveniência na visualização, os gráficos mostram, a partir dos ajustes, valores da distância.

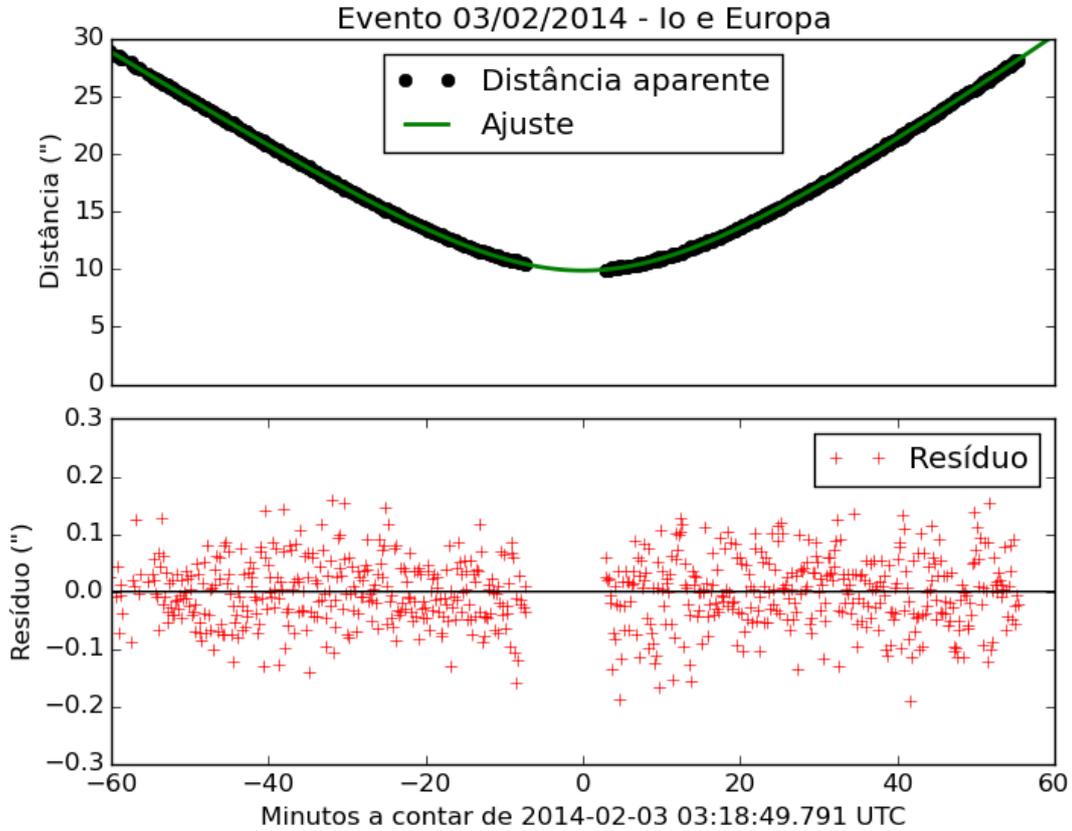


Figura 5.1: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014.

Devido a presença de nuvens nos instantes próximos ao instante central há uma ausência de pontos nessa região, mas este efeito não foi suficiente para prejudicar o ajuste. A precisão obtida foi de 0,2 segundos para o instante central, 7,9 *mas* para o parâmetro de impacto e 0,02 *mas/s* para a velocidade relativa. Utilizando a velocidade relativa da aproximação, 7,76 *mas/s*, para se obter a incerteza no tempo em escala de distância, obtivemos uma precisão de 1,62 *mas* para o instante central. Esta precisão é da ordem daquelas obtidas pelos modelos de fenômenos mútuos para curvas de luz de excelente qualidade.

De todas as aproximações previstas para 2014-1, dez foram observadas com sucesso, onde nove de excelente qualidade e uma de baixa qualidade. A Tabela 5.2 contém as informações relevantes sobre as observações destes fenômenos, onde estão descritas a data da aproximação e outras características da noite, como o seeing, a distância zenital em que o instante de mínimo ocorre, a fase solar em que Júpiter e seus satélites principais se encontram e o ângulo de posição sub-solar. O código do evento é tal que as letras maiúsculas discriminam as iniciais dos satélites que se aproximam e "a" representa *aproximação*.

Determinamos então o instante central de cada aproximação, a distância mínima entre os satélites, a velocidade relativa entre os satélites e por fim σ_{IC} a incerteza do instante

Tabela 5.2: Características das observações das aproximações de 2014-1

Data (d-m-a)	Evento	Seeing (arsec)	z ($^{\circ}$)	Fase solar ($^{\circ}$)	Q ($^{\circ}$)
03-02-2014	IaE	1,9	56,74	5,80	275,44
05-02-2014	EaG	2,1	49,58	6,27	275,36
19-02-2014	IaG	2,8	45,76	8,39	274,84
27-02-2014	IaE	1,9	47,23	9,32	274,71
18-03-2014	IaE	2,4	46,68	10,73	274,63
07-04-2014	IaE	2,4	51,73	10,99	275,15
20-04-2014	EaG	2,3	52,12	10,58	275,75
21-04-2014	GaC	2,2	51,38	10,54	275,77
21-04-2014	IaG	2,2	64,52	10,54	275,77

central em unidade de distância angular utilizando a velocidade relativa para tal. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4 comparamos estes valores com as efemérides (Δ), no sentido *observação - efemérides*. Para estes eventos as precisões médias alcançadas são de 0,78 segundos para o instante central, 10,23 *mas* para o parâmetro de impacto e 0,01 *mas/s* para a velocidade relativa.

Tabela 5.3: Resultados das observações das aproximações de 2014-1

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	t_0 (hh:mm:ss)	d_0 (mas)	v_r ($mas\ s^{-1}$)	σ_{IC} (mas)
03-02-2014	IaE	03:18:49,791 (0,203)	9890,45 (7,94)	7,76 (0,01)	1,62
05-02-2014	EaG	23:27:54,720 (0,666)	15046,36 (9,62)	6,15 (0,01)	4,10
19-02-2014	IaG	23:46:35,795 (0,763)	12982,89 (6,08)	7,53 (0,03)	5,75
27-02-2014	IaE	22:34:27,920 (0,099)	9831,77 (13,64)	7,94 (0,01)	0,79
18-03-2014	IaE	22:43:23,924 (2,522)	8027,37 (29,31)	6,41 (0,02)	16,15
07-04-2014	IaE	22:35:29,306 (0,188)	8845,84 (11,83)	7,70 (0,01)	1,44
20-04-2014	EaG	21:47:42,818 (0,520)	8409,57 (3,46)	3,55 (0,01)	1,85
21-04-2014	GaC	21:41:54,245 (1,009)	18078,84 (2,97)	4,70 (0,01)	4,74
21-04-2014	IaG	23:13:56,864 (1,010)	9228,48 (7,25)	5,39 (0,02)	5,45

Nota: Resultado das aproximações de 2014-1, onde estão detalhados os instantes centrais, t_0 , as distâncias mínimas, d_0 , as velocidades relativas, v_r . A última coluna, σ_{IC} , lista a incerteza do instante central em *mas* usando a velocidade relativa de cada aproximação em *mas/s*.

Tabela 5.4: Comparação dos resultados das aproximações de 2014-1 com as efemérides

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Δt_0 (s)	Δd_0 (mas)	Δv_r (mas s ⁻¹)	$\Delta \alpha \cos \delta$ (mas)	$\Delta \delta$ (mas)
03-02-2014	IaE	+6,75	+35,39	0,00	+48,47	-27,25
05-02-2014	EaG	+6,93	-83,10	0,00	+50,19	+91,56
19-02-2014	IaG	+4,11	+12,23	-0,01	+29,73	-6,00
27-02-2014	IaE	-1,13	-29,55	+0,05	-6,22	+30,60
18-03-2014	IaE	-7,26	-50,24	-0,03	-40,99	+45,83
07-04-2014	IaE	-1,55	+44,82	0,00	-16,65	-43,79
20-04-2014	EaG	-7,45	+11,77	0,00	-27,82	-13,63
21-04-2014	GaC	+2,39	-12,43	0,00	+12,62	+27,10
21-04-2014	IaG	-2,55	+46,06	0,00	-18,65	-45,32
Média		+0,02	-2,78	0,00	+3,41	+6,57
Desvio padrão		5.10	42.24	0,02	31,49	43,08

Nota: Comparação entre os resultados obtido e as efemérides do NOE-5-2010-GAL. Para a diferença em $\alpha \cos \delta$ e δ também levamos em consideração a diferença do instante central utilizando as componentes da velocidade relativa assim como Emelyanov (2009).

5.3 Aproximações de 2014-2 e 2015-1

Em 2014-2 e 2015-1 houve a organização de uma campanha nacional de observação dos fenômenos mútuos, pois Júpiter se encontrava em seu equinócio. Como toda ocultação é, por definição, também uma aproximação utilizamos as imagens obtidas para derivarmos os parâmetros através deste novo método.

Entretanto, isso faz com que nas imagens em torno do instante central as PSFs dos dois satélites fiquem sobrepostas, devido ao seeing, mesmo em casos onde não há ocultação. Perdemos, então, os pontos centrais da aproximação, aumentando assim a incerteza da distância mínima observada. Esta indeterminação não afeta de forma substancial o ajuste do instante de máxima aproximação ou da velocidade relativa dos eventos.

Para exemplificar estes eventos optamos pela aproximação entre Ganymede e Callisto que ocorreu no dia 15 de Outubro de 2014. O seeing da noite foi de 1,3 segundos de arco e no instante central Júpiter se encontrava a uma distância zenital de aproximadamente 66°. Um total de 662 imagens foram analisadas, imagens feitas com um segundo de exposição.

Esta aproximação não culminou em uma ocultação, não havendo queda no fluxo de luz, porém os dois satélites se tornaram indistinguíveis durante os instantes centrais, como é possível observar no gráfico da distância pelo tempo da Figura 5.2.

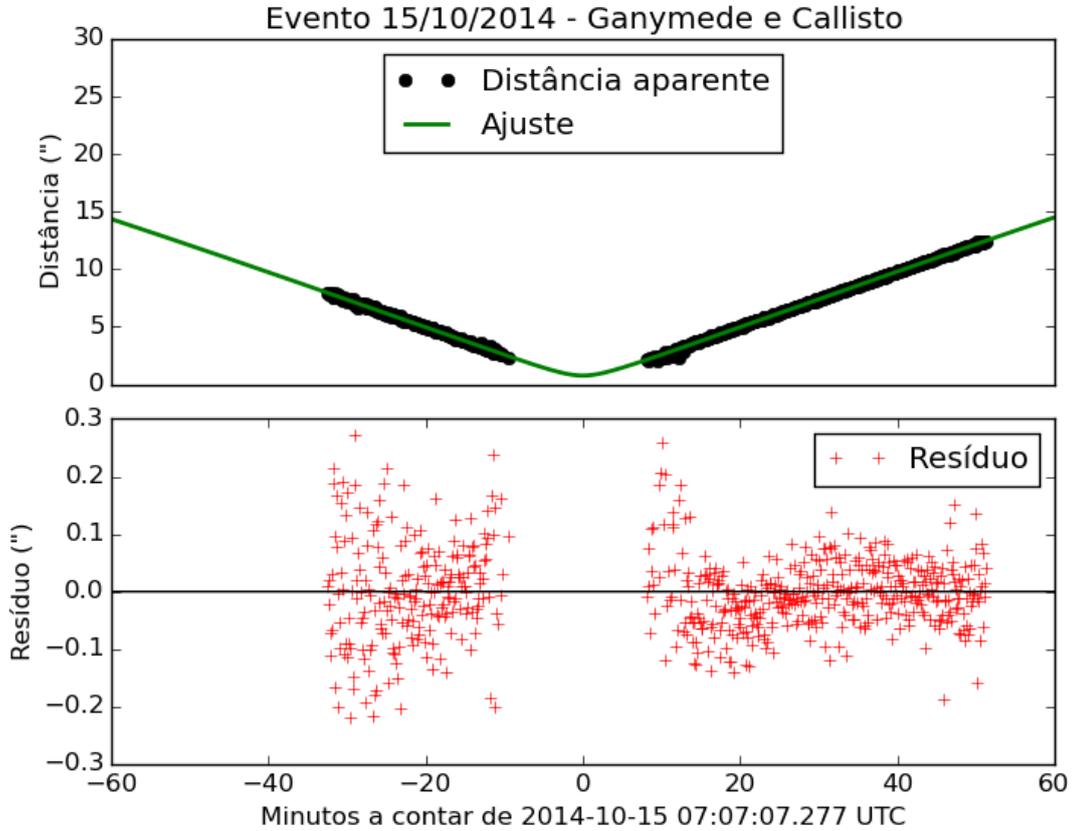


Figura 5.2: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 15 de Outubro de 2014.

Da análise desta curva obtemos uma precisão de 2,5 segundos para o instante central, 250 *mas* para o parâmetro de impacto e 0,02 *mas/s* para a velocidade relativa. Como este foi um evento mais lento, 4,03 *mas/s*, a incerteza no tempo pode ser descrita como uma incerteza de 10 *mas* para o instante central.

Vinte e seis aproximações foram observadas para este período, onde vinte e duas foram consideradas de boa qualidade e 4 de qualidade inferior. A Tabela 5.5 contém as informações relevantes sobre estas observações. Os resultados para todas estas aproximações estão mostradas na Tabela 5.6, a comparação entre a observação e as efemérides encontram-se na Tabela 5.7. As incertezas médias são de 1,63 segundos para o instante central, 274,9 *mas* para o parâmetro de impacto e 0,03 *mas/s* para a velocidade relativa.

5.4 Aproximações de baixa precisão

Das 36 aproximações analisadas neste projeto 5 foram consideradas de qualidade inferior as demais. Esse aumento na incerteza se dá, principalmente, por fatores climáticos que impossibilitaram a determinação de todos os parâmetros com a mesma precisão que os demais eventos. É importante ressaltar que mesmo estas observações possuem uma

Tabela 5.5: Características das observações das aproximações de 2014-2 e 2015-1

Data (d-m-a)	Evento	Seeing (arsec)	z ($^{\circ}$)	Fase solar ($^{\circ}$)	Q ($^{\circ}$)
15-10-2014	GaC	1,3	66,32	9,70	108,26
15-10-2014	IaE	1,3	66,32	9,70	108,26
29-10-2014	IaG	1,5	54,46	10,45	108,67
02-11-2014	IaC	2,0	68,93	10,60	108,67
02-02-2015	GaC	1,7	42,82	1,01	98,03
22-02-2015	IaE	1,7	39,58	3,17	290,47
26-02-2015	IaE	1,6	64,54	4,14	289,47
27-02-2015	GaC	1,6	40,35	4,16	289,46
27-02-2015	IaG	1,6	40,60	4,17	289,45
02-03-2015	IaG	1,6	56,01	4,95	288,90
24-03-2015	GaC	2,2	41,53	8,19	287,38
02-04-2015	IaE	1,5	52,27	9,14	287,07
11-04-2015	EaG	2,1	41,50	10,07	286,82
13-04-2015	IaE	1,5	43,80	10,21	286,79
17-04-2015	IaC	1,4	45,35	10,42	286,72
18-04-2015	GaC	1,4	61,45	10,42	286,72
18-04-2015	IaG	1,5	45,31	10,45	286,73
19-04-2015	EaG	1,4	59,89	10,46	286,73
21-04-2015	IaE	1,4	68,34	10,57	286,70
25-04-2015	IaG	2,7	48,86	10,41	286,70
29-04-2015	IaG	1,9	57,72	10,81	286,70
03-05-2015	IaE	2,0	52,39	10,84	286,71

precisão adequada para as futuras análises orbitais uma vez que as posições aqui obtidas possuem precisões da ordem de 20 a 50 *mas*, ressaltando que a precisão da astrometria CCD clássica é da ordem de 100 *mas*. Isto é, as precisões aqui obtidas, mesmo que piores do que as demais analisadas nesta dissertação, são até duas vezes melhores do que as precisões alcançáveis através da astrometria clássica CCD.

Para esta etapa optamos por dois exemplos de observações de baixa qualidade. A primeira é a aproximação entre Europa e Callisto que ocorreu em 19 de Novembro de 2014. Esta aproximação aconteceu em uma noite de seeing de 1,3 segundos de arco e o instante central ocorreu com Júpiter a uma altura zenital de aproximadamente 41° . Um total de 1422 imagens foram observadas, cada qual com exposição de 1 segundo. Como observado no gráfico da Figura 5.3 o resíduo esteve controlado e de boa qualidade, porém um súbito nevoeiro forçou que o telescópio fosse fechado devido a alta umidade. Isto fez com que apenas a aproximação entre os satélites fosse observada e o afastamento fosse perdido.

Tabela 5.6: Resultados das observações das aproximações de 2014-2 e 2015-1

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	t_0 (hh:mm:ss)	d_0 (mas)	v_r ($mas\ s^{-1}$)	σ_{IC} (mas)
15-10-2014	GaC	07:07:07,277 (2,549)	763,46 (243,22)	4,03 (0,03)	10,28
15-10-2014	IaE	07:07:54,218 (1,485)	1828,49 (248,00)	7,05 (0,02)	10,46
29-10-2014	IaG	07:24:24,317 (3,335)	683,83 (371,04)	4,98 (0,04)	16,62
02-11-2014	IaC	06:02:33,871 (8,189)	136,46 (247,90)	1,70 (0,03)	13,93
02-02-2015	GaC	02:24:31,506 (1,569)	2949,44 (128,80)	5,82 (0,02)	9,13
22-02-2015	IaE	02:07:53,578 (0,321)	16,43 (379,40)	5,43 (0,12)	1,74
26-02-2015	IaE	22:21:26,198 (1,529)	643,77 (178,53)	9,33 (0,03)	14,27
27-02-2015	GaC	01:24:10,368 (0,418)	1784,59 (25,99)	5,73 (0,01)	2,40
27-02-2015	IaG	02:20:23,773 (0,301)	8,82 (655,25)	6,57 (0,01)	1,97
03-03-2015	IaG	04:08:13,425 (2,851)	371,51 (552,93)	8,39 (0,03)	23,93
24-03-2015	GaC	00:14:44,508 (4,083)	81,72 (504,63)	4,95 (0,11)	20,21
02-04-2015	IaE	01:43:57,571 (0,864)	274,63 (226,55)	6,35 (0,02)	5,49
11-04-2015	EaG	22:07:13,230 (0,130)	2154,18 (19,42)	5,08 (0,01)	0,66
13-04-2015	IaE	23:44:41,110 (0,121)	1467,56 (42,35)	7,68 (0,01)	0,93
17-04-2015	IaC	23:46:57,510 (0,259)	680,37 (168,58)	5,03 (0,05)	1,31
18-04-2015	GaC	01:32:20,972 (0,162)	321,05 (442,54)	4,99 (0,02)	0,81
18-04-2015	IaG	20:54:35,606 (1,058)	409,61 (256,42)	5,51 (0,02)	5,83
19-04-2015	EaG	01:17:57,210 (1,003)	2282,39 (31,87)	5,13 (0,01)	5,15
21-04-2015	IaE	01:55:02,705 (0,160)	1747,99 (279,25)	7,37 (0,01)	1,18
25-04-2015	IaG	23:45:24,947 (1,763)	116,14 (697,88)	5,83 (0,01)	10,28
29-04-2015	IaG	00:28:55,757 (3,357)	393,54 (290,02)	6,88 (0,04)	23,11
03-05-2015	IaE	23:39:21,008 (0,527)	644,69 (100,47)	6,67 (0,03)	3,51

Nota: Resultado das aproximações de 2014-2 e 2015-1, onde estão detalhados os instantes centrais, t_0 , as distâncias mínimas, d_0 , as velocidades relativas, v_r . A última coluna, σ_{IC} , lista a incerteza do instante central em mas usando a velocidade relativa de cada aproximação em mas/s .

Tabela 5.7: Comparação dos resultados das aproximações de 2014-2 e 2015-1 com as efemérides

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Δt_0 (s)	Δd_0 (mas)	Δv_r ($mas\ s^{-1}$)	$\Delta \alpha \cos \delta$ (mas)	$\Delta \delta$ (mas)
15-10-2014	GaC	+4,83	+385,96	-0,08	+68,24	+164,94
15-10-2014	IaE	+0,05	-284,36	+0,02	+0,19	+320,14
29-10-2014	IaG	-1,99	-290,83	+0,12	+16,05	+79,67
02-11-2014	IaC	-3,06	+213,73	+0,12	-147,15	-439,87
02-02-2015	GaC	-3,60	+105,02	+0,01	-16,09	-105,37
22-02-2015	IaE	+6,24	+310,44	-0,04	-24,44	-72,03
26-02-2015	IaE	+1,26	+161,47	+0,04	-45,16	-108,28
27-02-2015	GaC	+0,78	+4,40	0,00	-5,66	-2,62
27-02-2015	IaG	-1,66	+57,09	0,00	-7,36	-91,50
03-03-2015	IaG	-1,42	+483,92	-0,01	+68,66	+300,92
24-03-2015	GaC	+1,31	-436,89	-0,40	-143,87	-412,44
02-04-2015	IaE	+3,67	+231,49	0,00	-45,01	-202,01
11-04-2015	EaG	-2,71	+41,37	0,00	-26,24	-43,73
13-04-2015	IaE	-1,65	-47,34	0,00	+3,19	+45,00
17-04-2015	IaC	-2,77	+28,32	-0,05	+3,54	-25,42
18-04-2015	GaC	-0,82	+260,68	0,00	+75,32	+247,95
18-04-2015	IaG	-5,12	+293,25	+0,01	-114,02	-284,50
19-04-2015	EaG	+4,22	-80,75	+0,02	+46,02	+83,70
21-04-2015	IaE	-1,89	-358,05	0,00	+94,60	+314,00
25-04-2015	IaG	+1,40	-517,52	+0,02	-164,09	-538,21
29-04-2015	IaG	-14,69	-270,97	+0,02	-183,20	-283,93
03-05-2015	IaE	+2,49	-65,90	0,00	+35,87	+75,01
Média		-0,69	+10,21	-0,01	-23,21	-44,48
Desvio padrão		4.21	270.71	0,09	79,02	238,59

Nota: Comparação entre os resultados obtido e as efemérides do NOE-5-2010-GAL. Para a diferença em $\alpha \cos \delta$ e δ também levamos em consideração a diferença do instante central utilizando as componentes da velocidade relativa assim como Emelyanov (2009).

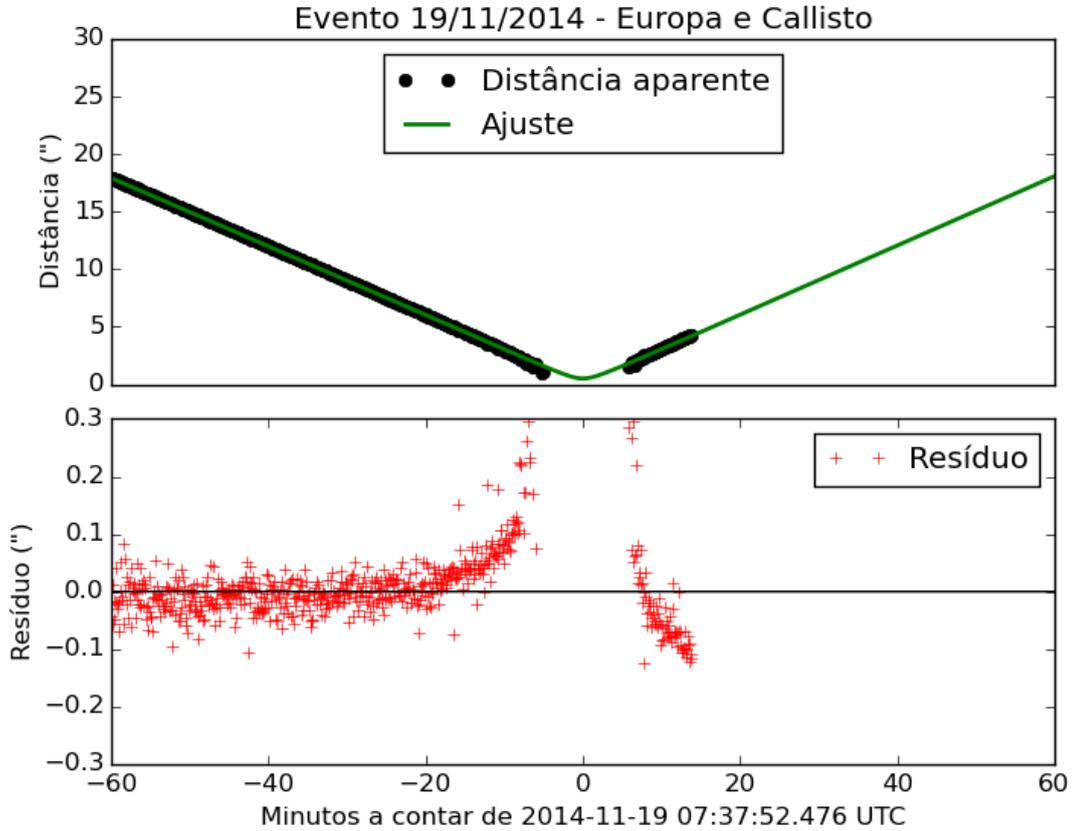


Figura 5.3: Aproximação entre Europa e Callisto em 19 de Novembro de 2014.

A incerteza para o instante central foi de 3,9 segundo, para o parâmetro de impacto foi de aproximadamente 600 *mas* e para a velocidade relativa foi de 0,02 *mas/s*. Utilizando a velocidade relativa determinamos que a incerteza do instante central é de 20 *mas*.

Note que o efeito apontado para os fenômenos de 2014-2 e 2015-1 do aumento da incerteza do parâmetro de impacto também está presente nessa imagem, o que faz com que esta incerteza seja muito superior a esperada. O evento entre Io e Europa que ocorreu em 07 de Fevereiro de 2014 também carrega a mesma característica, apenas um dos lados da aproximação, e possui precisão de 12 segundos de arco para o parâmetro de impacto (Ver Tabela 5.9 e Anexo 1).

O segundo exemplo de curva que consideramos de baixa qualidade é a aproximação entre Io e Europa que ocorreu em 25 de Março de 2015. Nesse caso mesmo havendo observações ao longo de toda a aproximação, anterior e posterior ao instante central, a baixa qualidade do céu impossibilitou uma determinação precisa dos parâmetros. O gráfico ilustrado pela Figura 5.4 representa esta aproximação, onde podemos notar claramente um aumento no resíduo do ajuste.

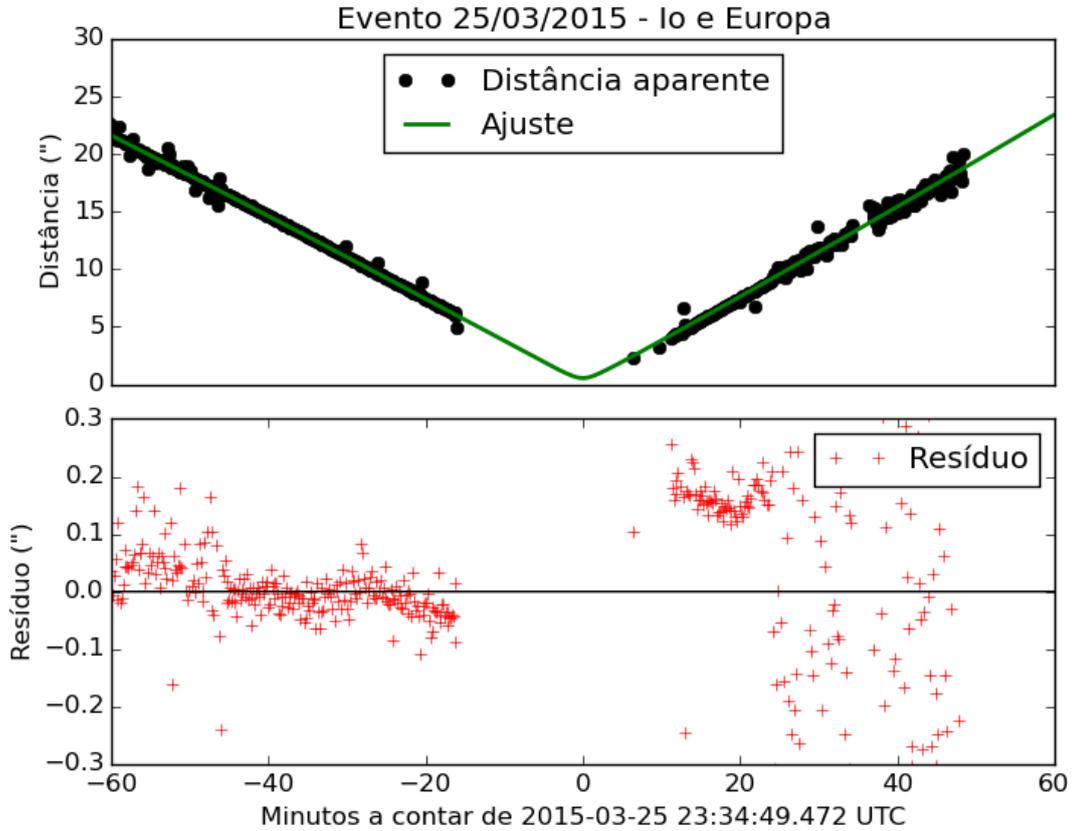


Figura 5.4: Aproximação entre Io e Europa em 25 de Março de 2015.

O instante central foi determinado com precisão de 9,4 segundos, o parâmetro de impacto com precisão da ordem de 600 *mas* e a velocidade relativa da ordem de 0,10 *mas/s*. A incerteza do instante central ficou em 59 *mas* utilizando a velocidade relativa para transformar de segundos para distância angular.

A Tabela 5.8 contém os detalhes observacionais destas cinco aproximações de baixa precisão, a Tabela 5.9 contém os resultados dos parâmetros obtidos para todas elas e na Tabela 5.10 contém as comparações com as efemérides.

Os valores médios das incertezas são de 5,40 segundos para o instante central, 82,28 *mas* para o parâmetro de impacto e 0,066 *mas/s* para a velocidade relativa com eventos envolvendo todos os quatro satélites Galileanos.

Tabela 5.8: Características das observações das aproximações de baixa precisão

Data (d-m-a)	Evento	Seeing (arsec)	z ($^{\circ}$)	Fase solar ($^{\circ}$)	Q ($^{\circ}$)
07-02-2014	IaE	1,8	51,87	6,61	275,28
19-11-2014	EaC	1,3	41,34	10,69	108,86
24-02-2015	IaG	1,8	40,01	3,59	289,99
25-03-2015	IaE	1,6	40,65	8,46	287,27
26-04-2015	IaE	2,0	40,67	10,74	286,69

Tabela 5.9: Resultados das observações das aproximações de baixa qualidade

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	t_0 (hh:mm:ss)	d_0 (mas)	v_r ($mas\ s^{-1}$)	σ_{IC} (mas)
07-02-2014	IaE	23:00:18,370 (4,944)	10084,99 (12,25)	8,32 (0,09)	41,14
19-11-2014	EaC	07:37:52,476 (3,937)	508,24 (617,24)	5,09 (0,02)	20,04
24-02-2015	IaG	01:44:46,758 (5,43)	26,55 (650,75)	8,29 (0,05)	45,05
25-03-2015	IaE	23:34:49,472 (9,456)	488,21 (668,88)	6,26 (0,10)	59,20
26-04-2015	IaE	21:24:57,428 (3,246)	93,43 (554,12)	6,60 (0,07)	21,43

Nota: Resultado das aproximações de baixa precisão, onde estão detalhados os instantes centrais, t_0 , as distâncias mínimas, d_0 , as velocidades relativas, v_r . A última coluna, σ_{IC} , lista a incerteza do instante central em mas usando a velocidade relativa de cada aproximação em mas/s .

Tabela 5.10: Comparação dos resultados das aproximações de baixa qualidade com as efemérides

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Δt_0 (s)	Δd_0 (mas)	Δv_r ($mas\ s^{-1}$)	$\Delta \alpha \cos \delta$ (mas)	$\Delta \delta$ (mas)
07-02-2014	IaE	-0,30	+68,28	-0,02	-9,95	-65,86
19-11-2014	EaC	+11,79	+202,42	+0,01	+127,81	+211,13
24-02-2015	IaG	+2,51	+250,61	+0,02	-79,59	-253,29
25-03-2015	IaE	-9,15	-73,04	-0,01	-32,67	+53,22
26-04-2015	IaE	+0,11	-507,36	-0,02	-154,71	-478,93
Média		+0,99	-11,82	-0,00	-29,82	-106,81
Desvio padrão		6.97	272.21	0,02	93,09	240,16

Nota: Comparação entre os resultados obtido e as efemérides do NOE-5-2010-GAL. Para a diferença em $\alpha \cos \delta$ e δ também levamos em consideração a diferença do instante central utilizando as componentes da velocidade relativa assim como Emelyanov (2009).

5.5 Comparações com as ocultações de 2009

É necessário comparar os valores dos parâmetros determinados através do método das aproximações mútuas com os valores obtidos através de outros métodos. Como o método mais preciso até então utilizado é a astrometria através da fotometria dos fenômenos mútuos e devido a similaridade geométrica entre a ocultação e o a aproximação, a melhor comparação possível é a entre as aproximações e as ocultações.

Para tal usamos um conjunto de imagens de cinco ocultações que aconteceram na campanha dos fenômenos mútuos de 2009. Comparamos os resultados das aproximações com os parâmetros obtidos pela fotometria diferencial das ocultações detalhados em Dias Oliveira (2011) , Dias-Oliveira *et al.* (2013) e Arlot *et al.* (2014). Note que as duas técnicas comparadas aqui são completamente independentes, uma vez que na ocultação é analisado a variação do fluxo de luz do objeto e na aproximação é utilizado as posições dos dois objetos. A ausência de posições centrais, que são as imagens utilizadas para a fotometria do fenômeno mútuo, também é um indicador da independência destas duas técnicas.

Os resultados apontados por Arlot *et al.* (2014) são ligeiramente diferentes dos valores reportados por Dias-Oliveira *et al.* (2013) como observado na Tabela 5.11. Nesta tabela estão reunidas as diferenças entre os valores para os instantes centrais determinados pelo método das aproximações mútuas e estes dois resultados. Também comparamos nossos valores com os resultados das efemérides. A principal diferença, na redução dos fenômenos mútuos, entre Arlot *et al.* (2014) e Dias-Oliveira *et al.* (2013) é a lei de reflexão adotada e a razão de albedo utilizada. Estudos aprofundados são necessários para se determinar quais dos dois métodos é o mais preciso, porém os resultados obtidos pelas aproximações mútuas podem ser um indicativo.

Tabela 5.11: Comparação entre os instantes centrais determinados pelo método das aproximações mútuas [1], com aqueles obtidos por Arlot *et al.* (2014) [2], Dias-Oliveira *et al.* (2013) [3] e a efeméride NOE-5-2010-GAL [4].

Data	Evento	[1] - [2] s	[1] - [3] s	[1] - [4] s
09-05-2009	IaE	-0,521	+7,139	-0,891
28-05-2009	IaE	+2,296	+11,816	+1,726
22-06-2009	IaE	-2,244	+6,276	-1,774
06-07-2009	IaE	-2,995	+4,775	-1,545
07-08-2009	IaE	+1,965	+4,225	-3,025

Como os resultados entre os métodos das aproximações mútuas, de Arlot *et al.*(2014) e das efemérides estão condizentes optamos por utilizar estes resultados nas comparações

que se seguem. Para exemplificar utilizamos a ocultação de 09 de maio de 2009. A Figura 5.5 contém a curva de luz de Arlot *et al.* (2014) e a Figura 5.6 contém o ajuste através do método das aproximações mútuas.

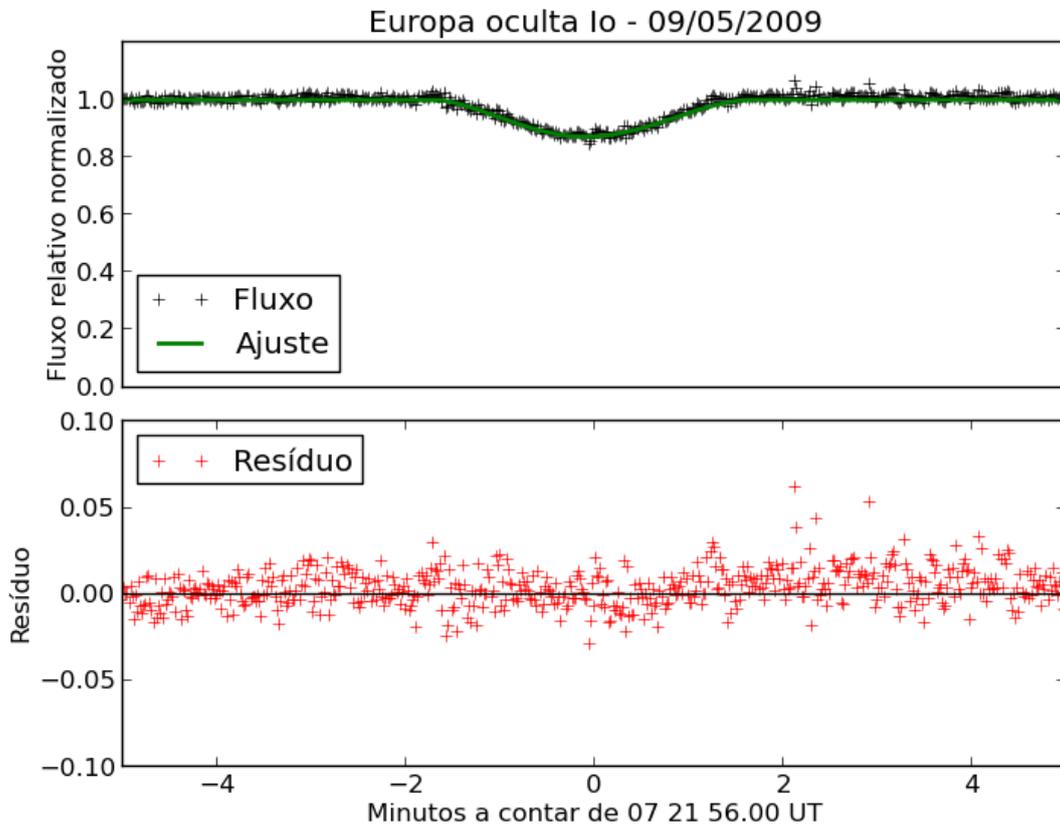


Figura 5.5: Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.

O instante central calculado por ambos os métodos difere de 0,5 segundos no sentido ocultação menos aproximação, quando a incerteza obtida é da ordem de 3,2 segundos para a aproximação e da ordem de 0,6 segundos para a ocultação. O parâmetro de impacto possui maior divergência, mas ainda assim dentro da escala de erro, considerando o questionamento já levantado sobre a alta incerteza quando não se tem posições centrais no ajuste da aproximação. Este parâmetro possui diferença de 177 *mas*, dentro de uma incerteza de 200 *mas* dominado pela incerteza da aproximação.

Os detalhes observacionais destes cinco eventos estão detalhados na Tabela 5.12 e os resultados constam na Tabela 5.13 e a comparação com os dados de Arlot *et al.* (2014) consta na Tabela 5.14, onde Δ simboliza a comparação com os valores obtidos através da ocultação, no sentido aproximação menos ocultação. Note que para os cinco eventos estudados os valores coincidem dentro da incerteza, mostrando a concordância entre os dois métodos.

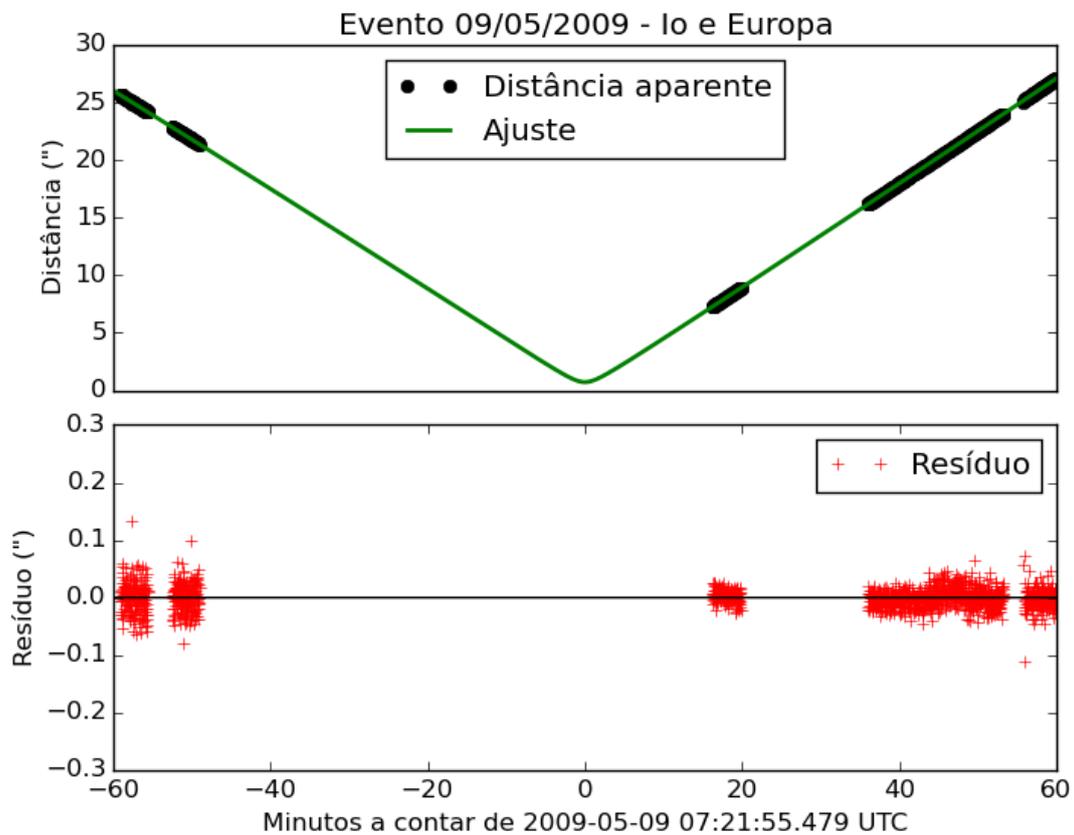


Figura 5.6: Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.

Novas comparações serão feitas para os fenômenos mútuos observados em 2014 e 2015, quando estes dados forem tratados, trabalho esse que não faz parte da presente dissertação.

Tabela 5.12: Características das observações das aproximações derivadas das observações dos fenômenos mútuos de 2009 (Dias-Oliveira *et al.* 2013)

Data (d-m-a)	Evento	Seeing (arsec)	z ($^{\circ}$)	Fase solar ($^{\circ}$)	Q ($^{\circ}$)
09-05-2009	IaE	1,7	34,26	11,41	70,32
28-05-2009	IaE	1,9	14,17	11,33	70,23
22-06-2009	IaE	1,2	50,29	9,59	70,54
06-07-2009	IaE	1,9	27,54	7,71	71,12
07-08-2009	IaE	2,0	28,82	1,64	78,27

Tabela 5.13: Resultados das observações das aproximações de 2009 comparadas com as ocultações

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	t_0 (hh:mm:ss)	d_0 (mas)	v_r ($mas\ s^{-1}$)	σ_{IC} (mas)
09-05-2009	IaE	07:21:55,479 (3,232)	719,97 (193,16)	7,38 (0,05)	23,85
28-05-2009	IaE	07:44:20,546 (3,624)	650,62 (687,12)	6,23 (0,04)	22,57
22-06-2009	IaE	03:27:53,186 (4,721)	314,01 (297,05)	5,63 (0,05)	26,58
06-07-2009	IaE	07:48:31,955 (3,018)	459,78 (128,90)	5,30 (0,04)	15,99
07-08-2009	IaE	05:37:49,805 (3,590)	562,98 (394,06)	3,75 (0,03)	13,46

Nota: Resultado das aproximações de 2009, onde estão detalhados os instantes centrais, t_0 , as distâncias mínimas, d_0 , as velocidades relativas, v_r . A última coluna, σ_{IC} , lista a incerteza do instante central em mas usando a velocidade relativa de cada aproximação em mas/s .

Tabela 5.14: Comparação dos resultados das aproximações de 2009 com os dados de Arlot *et al.* (2014).

Data (dd-mm-aaaa)	Evento	Δt_0 (s)	Δd_0 (mas)	Δv_r ($mas\ s^{-1}$)	$\Delta \alpha \cos \delta$ (mas)	$\Delta \delta$ (mas)
09-05-2009	IaE	-0,52	+177,37	+0,01	+43,70	+170,45
28-05-2009	IaE	+2,30	+431,52	+0,03	+117,49	+416,95
22-06-2009	IaE	-2,24	-264,99	-0,03	-89,86	+234,73
06-07-2009	IaE	-2,99	-145,12	+0,07	-44,75	-138,43
07-08-2009	IaE	+1,87	+281,98	-0,01	+88,34	+268,01
Média		-0,32	+96,15	+0,01	+22,99	+190,34
Desvio padrão		2.12	261.62	0,03	78,68	183,22

Nota: Comparação entre os resultados obtido e os dados fornecidos em Arlot *et al.* (2014). Para a diferença em $\alpha \cos \delta$ e δ também levamos em consideração a diferença do instante central utilizando as componentes da velocidade relativa assim como Emelyanov (2009).

Capítulo 6

Conclusão

Neste projeto apresentamos uma técnica nova de determinação de posições relativas dos satélites Galileanos que pode ser utilizada sempre que dois satélites se aproximam no plano do céu. Descrevemos também os resultados obtidos com a aplicação desta técnica, a partir da observação, redução e análise de 36 destes eventos observados durante os períodos de 2014-1 e 2015-1 no OPD/LNA. Para a redução destas aproximações o modelo desenvolvido leva em consideração efeitos como a fase solar e a refração atmosférica. Os resultados obtidos possuem precisões que permitem o refinamento dos modelos orbitais destes satélites em torno de Júpiter, contribuindo, em última análise, para a compreensão da origem e, principalmente, evolução do sistema Joviano, e, por extensão, do Sistema Solar.

Os resultados obtidos possuem precisões médias de 1,4 segundos para o instante central, o que reflete em uma precisão de 9,7 *mas*, ou 28,5 km, utilizando a velocidade relativa dos eventos. Por sua vez a precisão de distância mínima pode chegar a valores inferiores a 5 *mas*, ou 20 km, e a velocidade relativa possui incerteza média de 0,02 *mas/s*, ou 60 m/s.

Esta precisão alcançada é fruto da combinação de três fatores principais. O primeiro é a qualidade das imagens obtidas, com alta razão sinal-ruído alcançada graças ao filtro Metano de banda estreita que diminui, praticamente eliminando, a influência da luz difusa de Júpiter na imagem. Em segundo lugar a astrometria diferencial de curtíssimo campo aplicada a um campo menor que 60". Esta técnica é capaz de cancelar fatores astronômicos e instrumentais que afetam os dois satélites de mesma maneira. O terceiro fator é o método robusto de nossa redução que leva em consideração os efeitos de fase solar sobre cada satélite e a refração diferencial ao longo do evento.

Os resultados aqui obtidos independem das efemérides utilizadas, uma vez que diferentes efemérides determinam os mesmos valores para escala de placa e orientação (Peng *et al.*, 2012).

A abordagem deste projeto é similar àquela adotada por Peng *et al.* (2012) para determinação da escala de placa e orientação, porém sem a correção do efeito da refração

atmosférica. Além disto a principal diferença entre os dois métodos é que Peng *et al.* (2012) fornece como resultado cada distância relativa individual e seu instante de tempo, o que poderíamos fazer. Para cada conjunto de observações, fornecemos um e somente um resultado apenas, porém bem mais robusto e mais preciso, na forma de instante central, distancia relativa da máxima aproximação e velocidade relativa. Ao estilo de fenômenos mútuos.

Esta precisão é suficiente para representar uma contribuição relevante e significativa aos modelos orbitais que buscam quantificar perturbações não conservativas de baixíssima intensidade na evolução orbital destes corpos, tal como os efeitos de maré tão importantes para o sistema Joviano. Ao compararmos os resultados obtidos por este novo método com as efemérides observa-se uma coerência e concordância, o que reflete a qualidade das efemérides destes corpos e a qualidade de nosso método.

A experiência dos procedimentos observacionais adquirida pela campanha dos fenômenos mútuos de Júpiter em 2009 (Dias-Oliveira *et al.*, 2011) permitiu um maior aproveitamento dos dados obtidos para esta nova técnica. A comparação dos resultados obtidos em cinco aproximações, em que ocultações foram registradas, com os resultados destas ocultações permitiu analisar a precisão média obtida pelo método das aproximações mútuas em cima de imagens reais. Obtemos uma concordância entre a determinação do instante central pelas aproximações e pelas ocultações muitas vezes inferior a um segundo, sendo que em todos os casos a diferença é inferior as incertezas obtidas.

Por fim ressalto a diferença entre os fenômenos mútuos e esta nova técnica. As aproximações mútuas não necessitam de uma configuração geométrica específica que ocorre apenas nos equinócios de Júpiter, somente a cada 6 anos, que é o caso dos fenômenos mútuos. Sem esta limitação observacional, esta técnica pode ser utilizada para determinar posições com alta precisão em um período de tempo onde a incerteza obtida com a astrometria CCD usual é muitas vezes até três vezes maior.

Devido ao intenso brilho de Júpiter e de seus satélites principais estes eventos podem ser facilmente observados a partir de pequenos telescópios. Este fato aliado à nova técnica desenvolvida neste trabalho permitem um aumento substancial da quantidade de posições relativas dos satélites Galileanos que podem ser utilizadas em futuras integrações orbitais. Estas novas integrações podem revelar informações importantes a respeito da evolução orbital destes corpos por forças dissipativas de baixíssima intensidade, tal qual a força de maré, o que revelaria fatores importantes sobre o interior destes satélites. Destacamos que obtemos uma incerteza aparentemente inferior àquelas dos fenômenos mútuos, porém podemos obter um maior número de observações distribuídas ao longo dos anos, fora dos equinócios, o que melhoraria a precisão global do método das aproximações.

Por fim, a técnica das aproximações mútuas desenvolvida neste projeto pode ser utilizada, ainda que com modificações, para outros sistemas, como por exemplo os satélites de Urano.

Referências Bibliográficas

- ARIAS, E. F. *et al.*, The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, *ICRS Astronomy and Astrophysics*, v.303, p.604-608, 1995.
- ARLOT, J. E. & STAVINSCHI, M., Past and future mutual events of the natural planetary satellites: need of a network of observation **ASP Conference Series**, v. 370, p. 58-67, 2007.
- ARLOT, J. E., Predictions of the mutual events of the Galilean satellites of Jupiter occurring in 2009-2010 **Astronomy and Astrophysics**, v. 478, p. 285-298, 2008.
- ARLOT, J. E. & EMELYANOV, N. V., The NSDB natural satellites astrometric database **Astronomy and Astrophysics**, v. 503, p. 631, 2009.
- ARLOT, J. E. *et al.*, The PHEMU09 catalogue and astrometric results of the observations of the mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter made in 2009 **Astronomy and Astrophysics**, v. 572, p. A120, 2014.
- ASSAFIN, M. *et al.*, PRAIA: Plataforma para redução automática de imagens astronômicas **Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira**, v. 26, p. 189, 2006.
- ASSAFIN, M. *et al.*, Rio survey of optical astrometric positions for 300 ICRF2 sources and the current optical/radio frame link status before Gaia **Mon. Not. R. Astron. Soc.**, v. 430, p. 2797-2814, 2013.
- BOCZKO T. M., Conceitos de Astronomia **Edgard Blucher Ltda**, 1981.
- BRAGA-RIBAS, F., Fenômenos mútuos entre os satélites de Urano. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Astronomia) - Observatório do Valongo, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009
- BUTCHER, H. & STEVENS, R., Image Reduction and Analysis Facility Development **Newsletter Kitt Peak National Observatory**, n. 16, p. 6, 1981.
- CORREIA, A. C. M. *et al.*, Deformation and tidal evolution of close-in planets and satellites using a Maxwell viscoelastic rheology **arXiv**,1411.1860v1, 2014.
- DE ALMEIDA, G., A refração atmosférica e os seus problemas nas observações astronômicas **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 2, p. 410-420, 2014.

- DE SITTER, W., Orbital elements determining the longitude of Jupiter's satellites, derived from observations **Leiden Ann.**, v. 16, p. 1, 1928.
- DEIENNO, R. *et al.*, Orbital Perturbations of the Galilean Satellites During Planetary Encounters **arXiv**1405.1880. 2014.
- DIAS-OLIVEIRA, A., Fenômenos Mútuos entre os satélites Galileanos de Júpiter. 2011. 83f. Dissertação (Mestrado em Astronomia) - Observatório do Valongo, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011
- DIAS-OLIVEIRA, A. *et al.*, Analysis of 25 mutual eclipses and occultations between the Galilean satellites observed from Brazil in 2009 **Mon. Not. R. Astron. Soc.**, v. 432, p. 225–242, 2013.
- EFROIMSKY M. & LAINEY V., The Physics of Bodily Tides in Terrestrial Planets, and the Appropriate Scales of Dynamical Evolution **Journal of Geophysical Research Planets**, v. 112, p. E, 2007.
- EMEL'YANOV, N. V., Mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter in 2002-2003: final astrometric results **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 394, p. 1037-1044, 2009.
- FAURE G. & MENSING T. M., Introduction to Planetary Science - The Geological Perspective **Springer**, 2007.
- FERRAZ-MELLO, S., Dynamics Of The Galilean Satellites: An Introductory Treatise. **SAO PAULO: INSTITUTO ASTRONÓMICO E GEOFÍSICO-USP**, 1977.
- FERRAZ-MELLO S., Tidal synchronization of close-in satellites and exoplanets. A rheophysical approach. **ArXiv**, 1204.3957v3. 2013.
- GALILEU, G., Sidereus Nuncius - O Mensageiro das Estrelas **Gulbenkian**, e. 3, 2010.
- GREEN, R. M., Spherical Astronomy **Cambridge**, 1985.
- HUSSMAN, H. & SPOHN, T., Thermal-orbital evolution of Io and Europa **Icarus**, v. 171, p. 391-410, 2004.
- KARKOSCHKA, E., Spectrophotometry of the jovian planets and Titan at 300 to 1000nm Wavelength: the methane spectrum **Icarus**, v. 111, p. 174-192, 1994.
- KARKOSCHKA, E., Methane, Ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry **Icarus**, v. 133, p. 134-146, 1998.
- KISELEVA, T. P. *et al.*, Results of astrometric observations of Jupiter's Galilean satellites at the Pulkovo Observatory from 1986 to 2005 **Solar System Research**, v. 42, p. 414-433, 2008.
- LAINEY, V. *et al.*, New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter - I. Numerical integration of elaborated equations of motion **Astronomy and Astrophysics**, v. 420, p. 1171–1183, 2004.

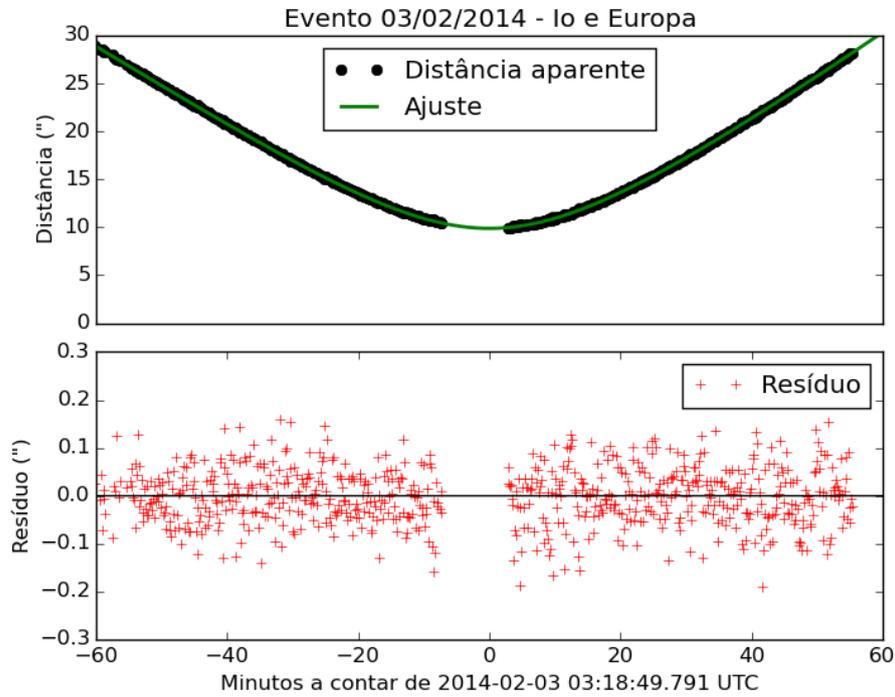
- LAINEY, V. *et al.*, New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter - II. Fitting the observations **Astronomy and Astrophysics**, v. 427, p. 371–376, 2004.
- LAINEY, V. *et al.*, Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations **Nature**, v. 459, p. 957-959, 2009.
- DE SITTER, W., Galilean satellite evolution - Observational evidence for secular changes in mean motions **Astronomy and Astrophysics**, v. 176, p. 146, 1987.
- LINDEGREN, L., Meridian observations of planets with a photoelectric micrometer **Astronomy and Astrophysics**, v. 57, p. 55-72, 1977.
- PASCU, D., An appraisal of the USNO program of photographic astrometry of bright planetary satellites **Galactic and Solar System Optical Astrometry**, p. 304–311, 1994.
- PATER I. & LISSAUER J. J., Planetary Sciences **Cambridge**, 2001.
- PENG, Q. Y. *et al.*, New evidence of precision premium for Galilean satellites from CCD imaging **Planetary and Space Science**, v. 56, p. 1807–1811, 2008.
- PENG, Q. Y. *et al.*, Precise CCD positions of Galilean satellite-pairs **Mon. Not. R. Astron. Soc.**, v. 419, p. 1977–1982, 2012.
- ROBERT, V. *et al.*, A new astrometric reduction of photographic plates using the DAMIAN digitizer: improving the dynamics of the Jovian system **Mon. Not. R. Astron. Soc.**, v. 415, p. 701–708, 2011.
- STONE, R. C., An Accurate Method for Computing Atmospheric Refraction **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 108, p. 1051-1058, 1996.
- STONE, R. C., Digital centering algorithms for the sun, moon, and planets **The Astronomical Journal**, v. 99, p. 424-420, 1999.
- STONE, R. C., Positions for the outer planets and many of their satellites. V. FASTT observations taken in 2000-2001 **The Astronomical Journal**, v. 122, p. 2723-2733, 2001.
- ZACHARIAS, N. *et al.*, The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) **The Astronomical Journal**, v. 145, p. 44, 2013

Apêndice A

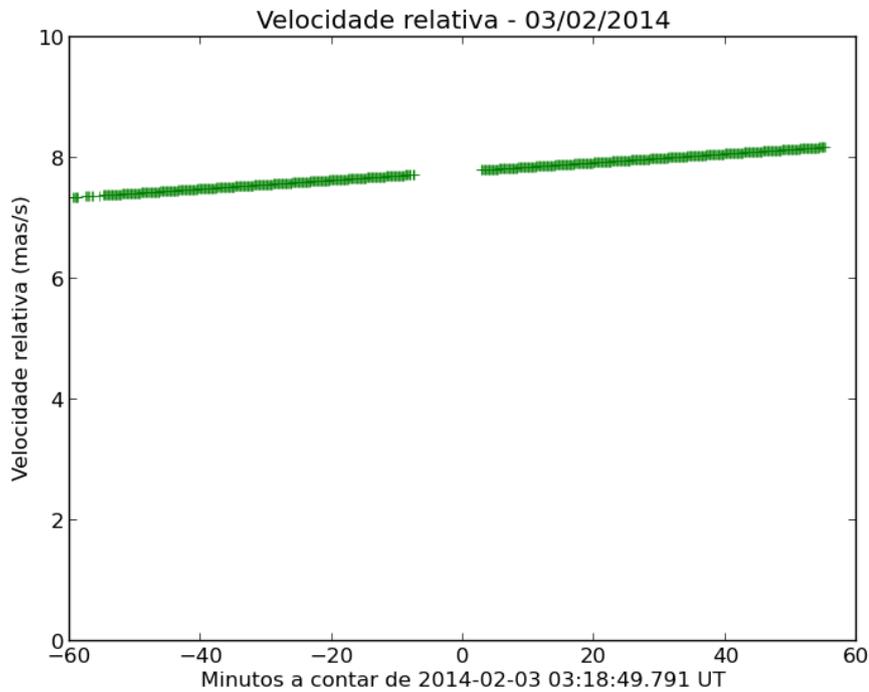
Curvas Analisadas

Neste anexo reunimos todas as 41 curvas da distância aparente entre os satélites em função do tempo para os dados obtidos nas observações. A elas ajustamos o modelo desenvolvido neste trabalho, e seguem, também, as curvas da variação das velocidades ao longo do tempo, também determinadas observacionalmente. Separamos, assim como no texto, em quatro grupos: (i) As curvas das aproximações de 2014-1; (ii) as de 2014-2 e 2015-1; (iii) as consideradas de pior qualidade; e (iv) as curvas para os eventos de 2009.

A.1 Aproximações de 2014-1

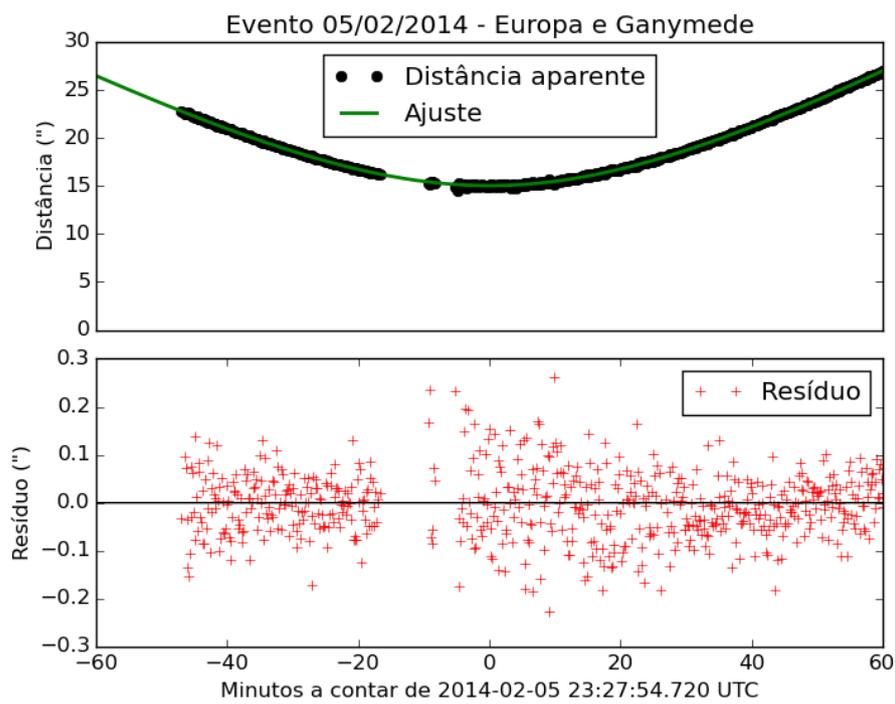


(a) Distância

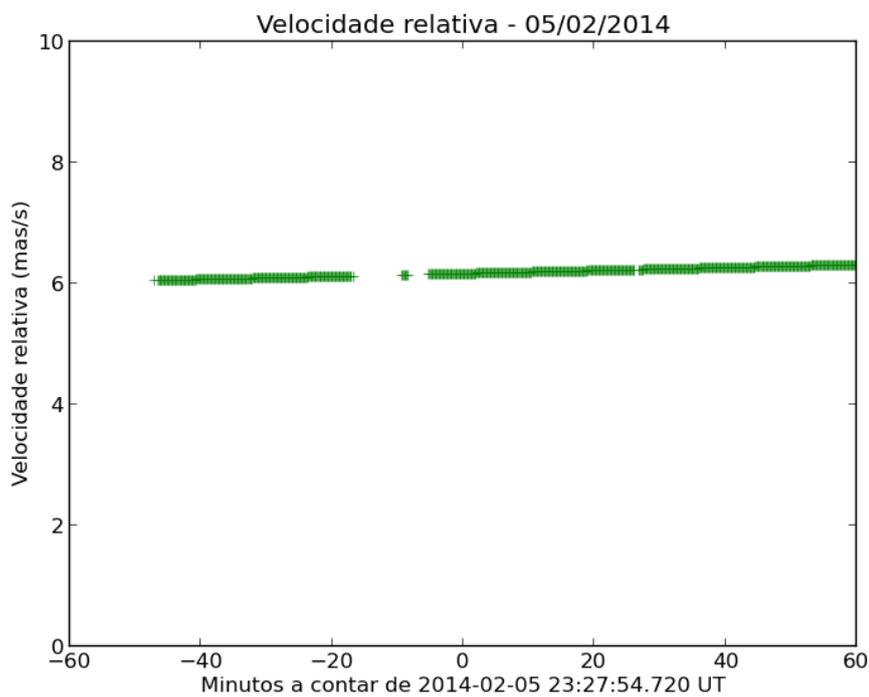


(b) Velocidade

Figura A.1: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Fevereiro de 2014.

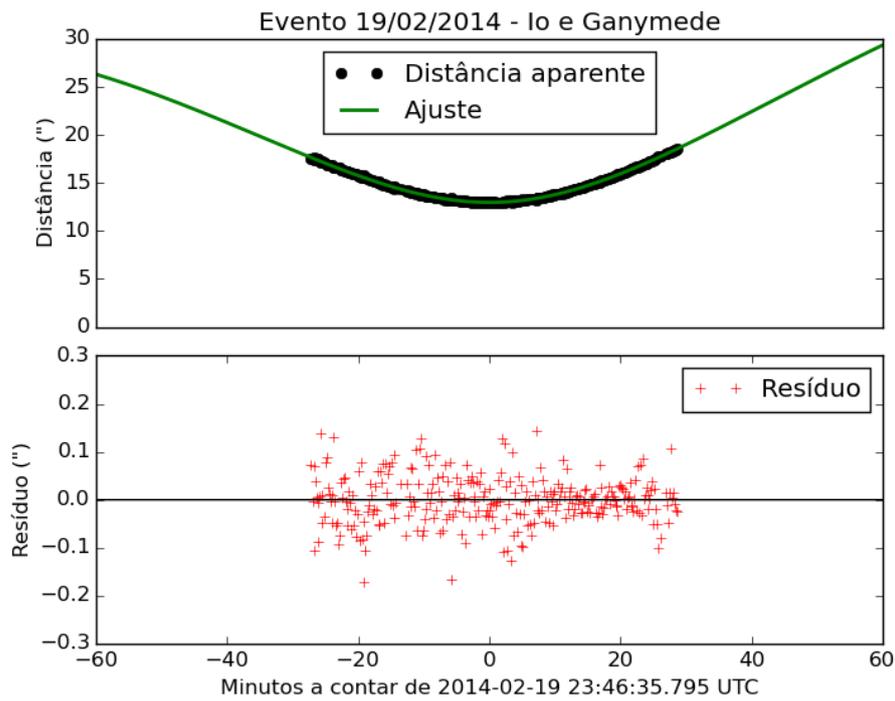


(a) Distância

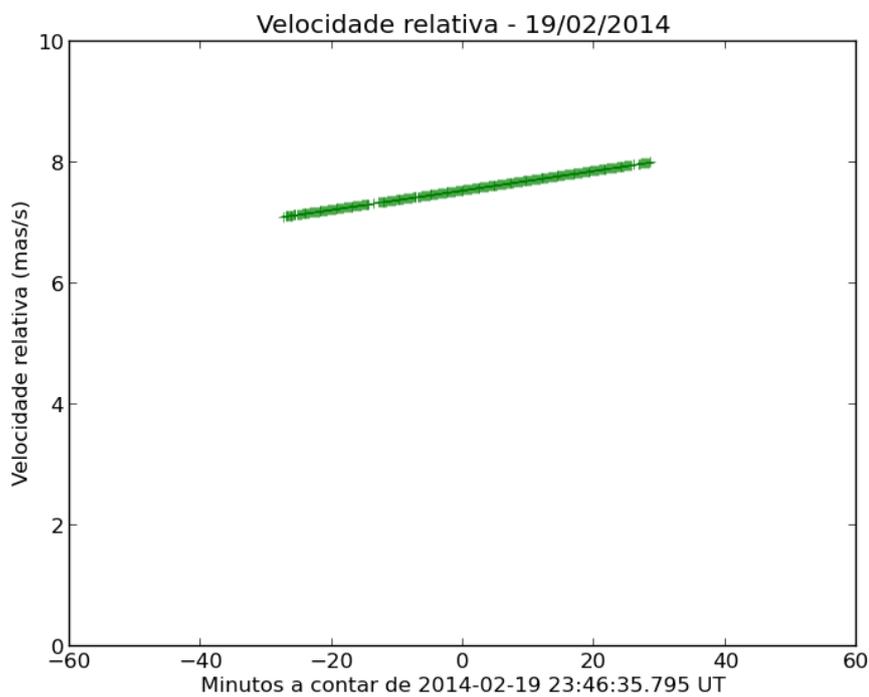


(b) Velocidade

Figura A.2: Aproximação entre Europa e Ganymede em 05 de Fevereiro de 2014.

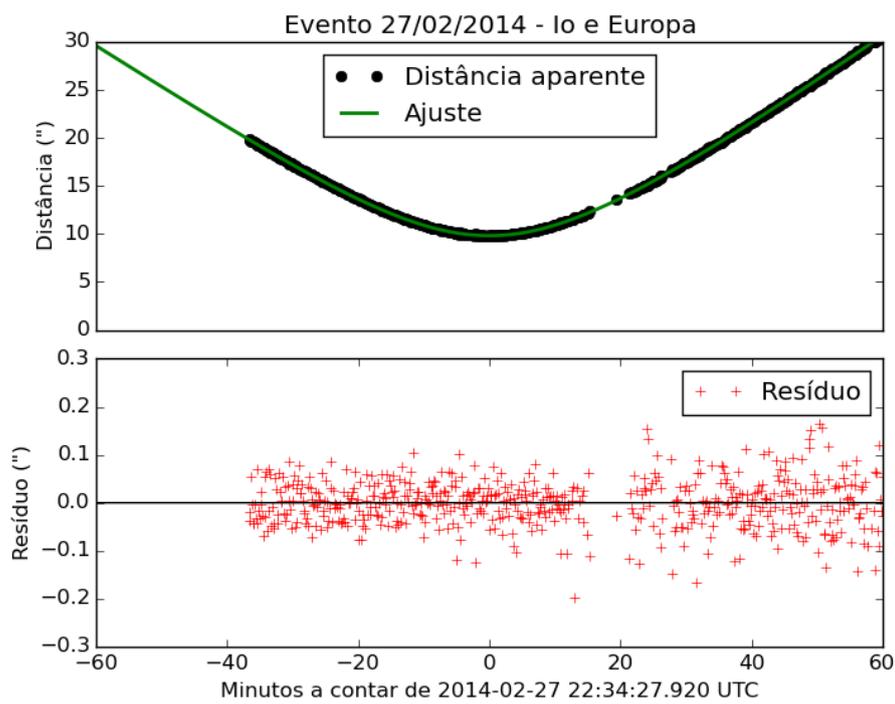


(a) Distância

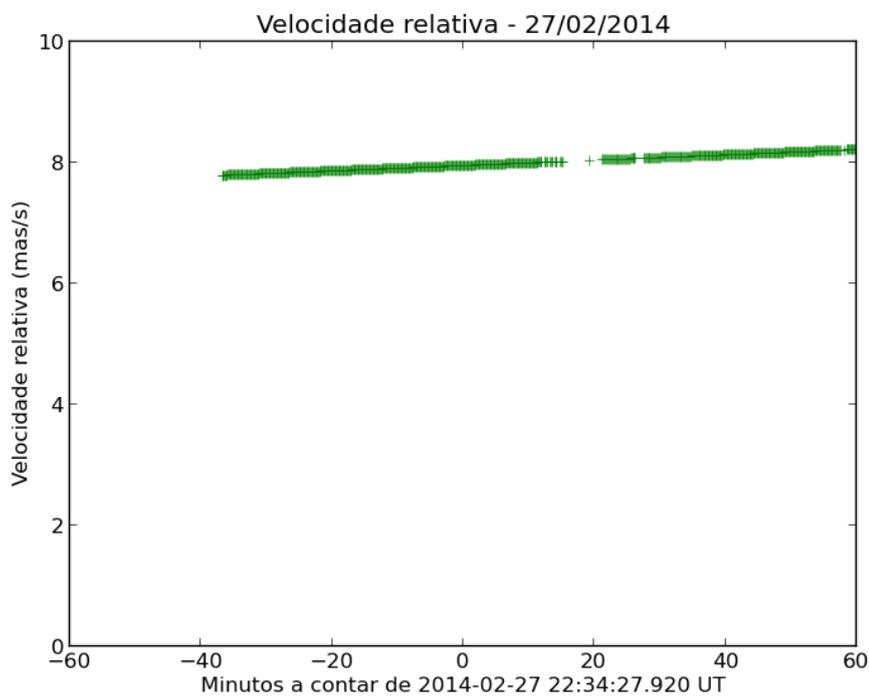


(b) Velocidade

Figura A.3: Aproximação entre Io e Ganymede em 19 de Fevereiro de 2014.

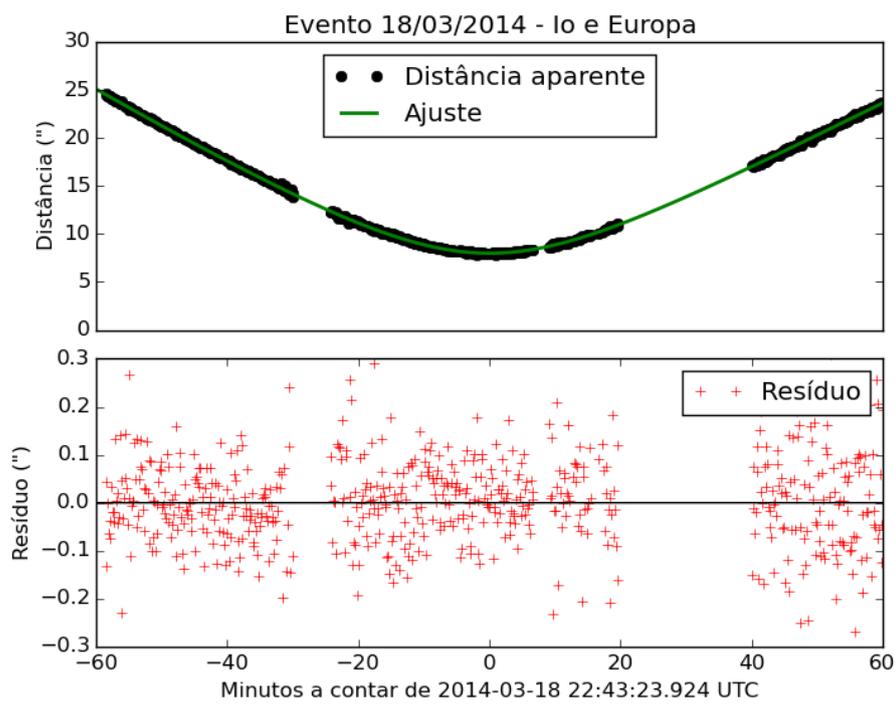


(a) Distância

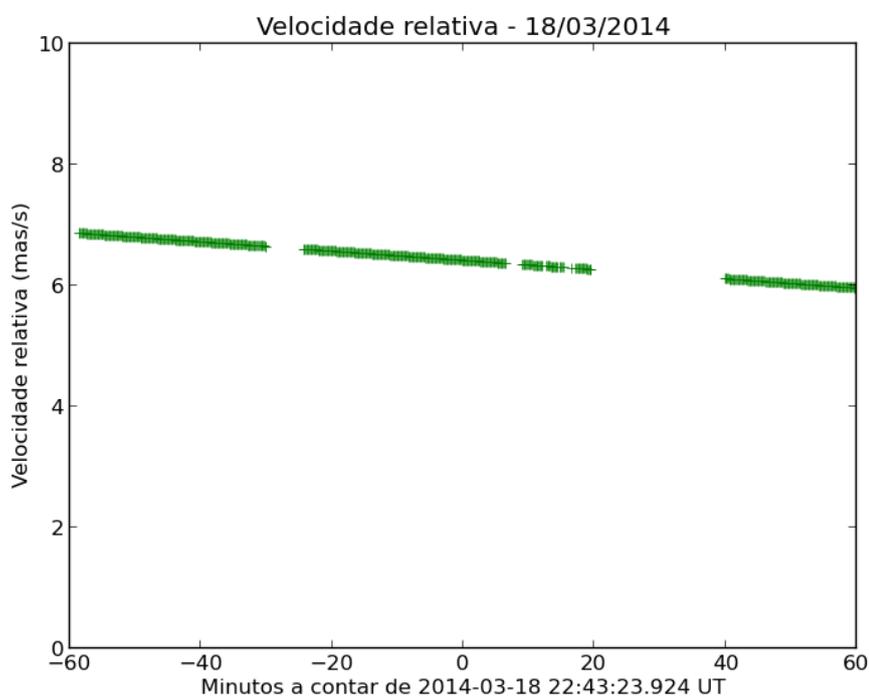


(b) Velocidade

Figura A.4: Aproximação entre Io e Europa em 27 de Fevereiro de 2014.

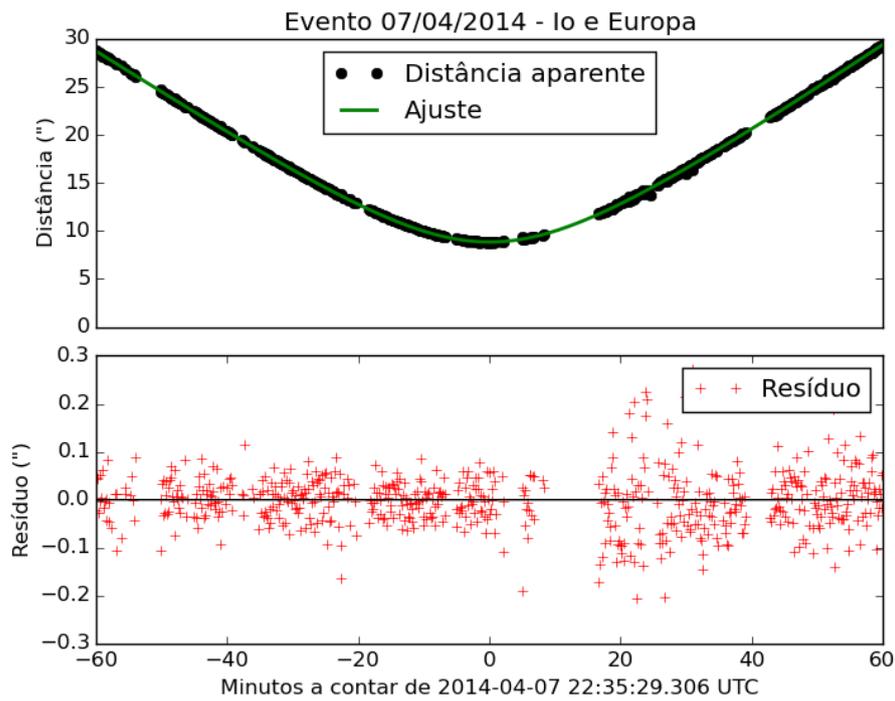


(a) Distância

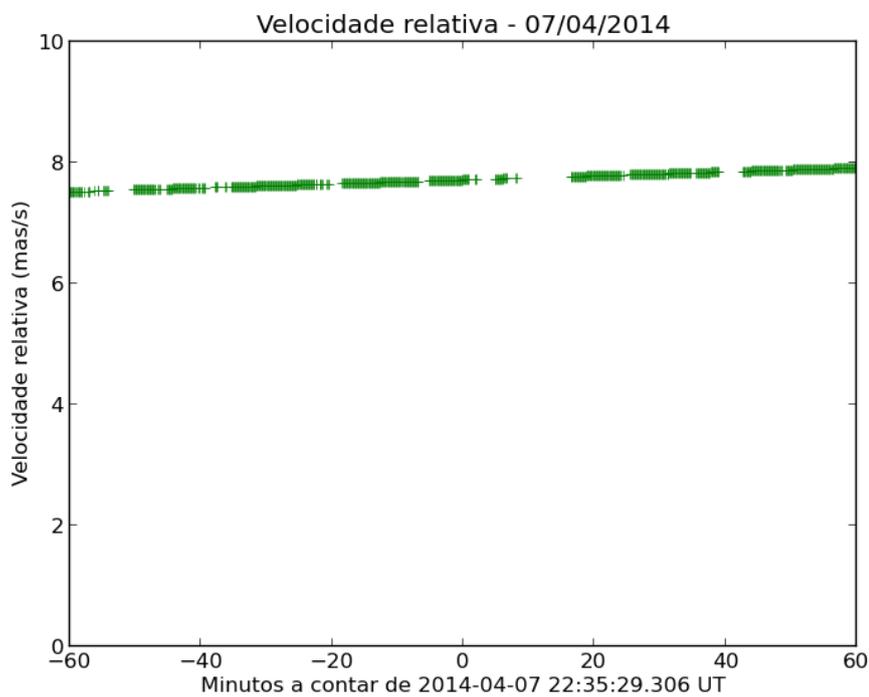


(b) Velocidade

Figura A.5: Aproximação entre Io e Europa em 18 de Março de 2014.

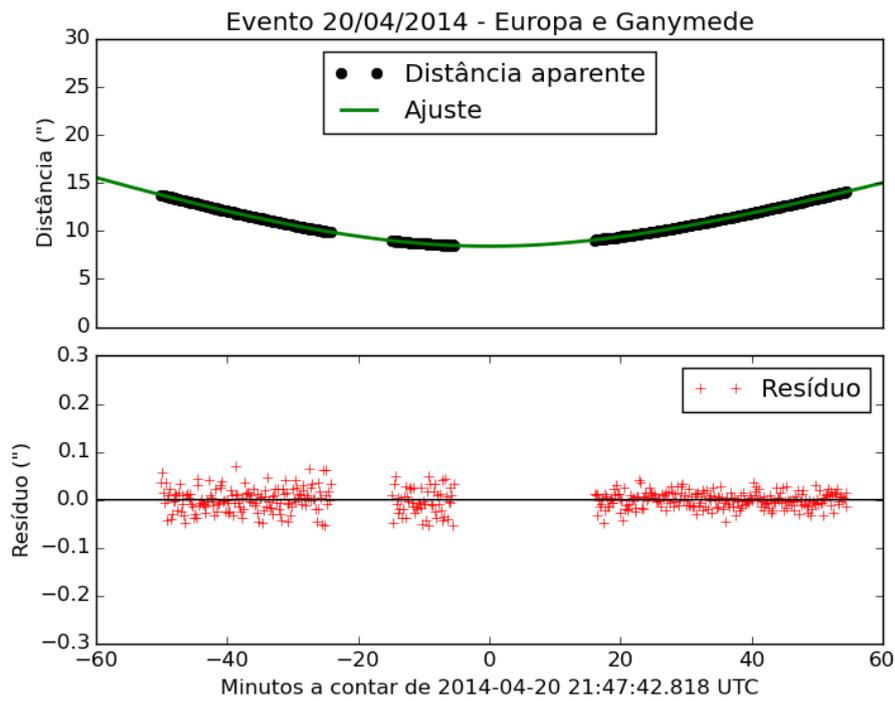


(a) Distância

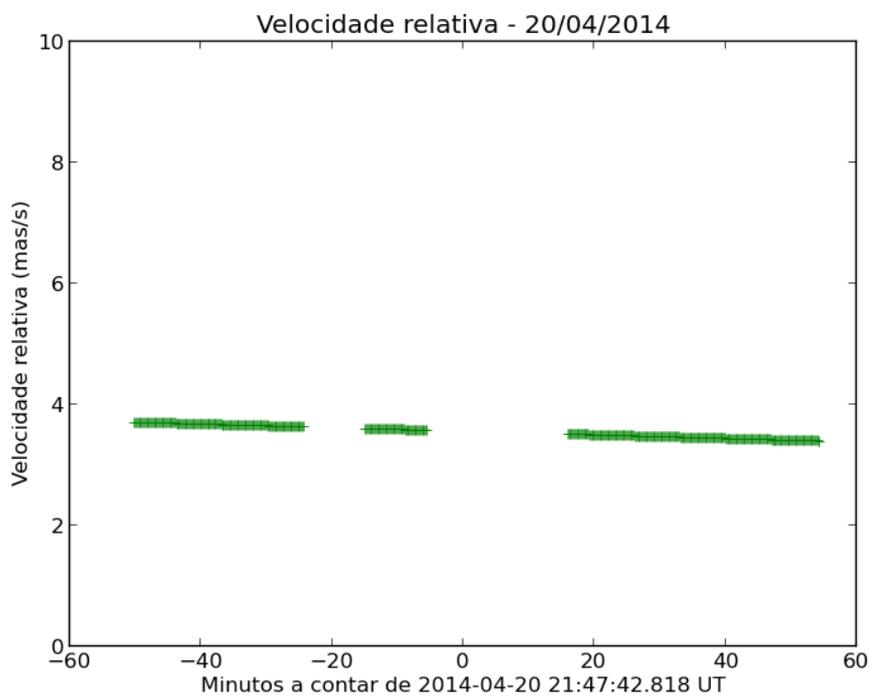


(b) Velocidade

Figura A.6: Aproximação entre Io e Europa em 07 de Abril de 2014.

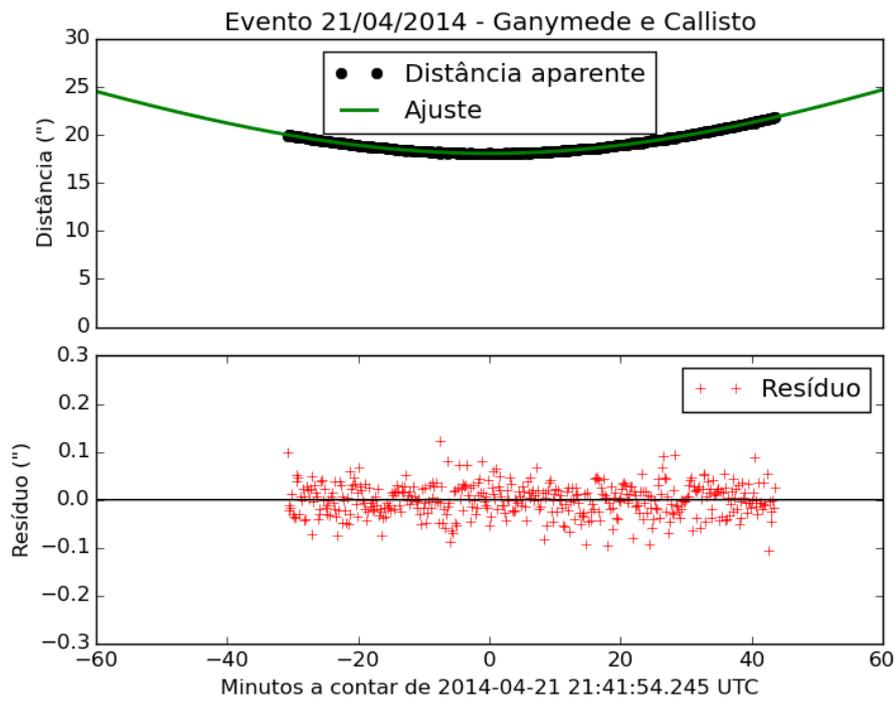


(a) Distância

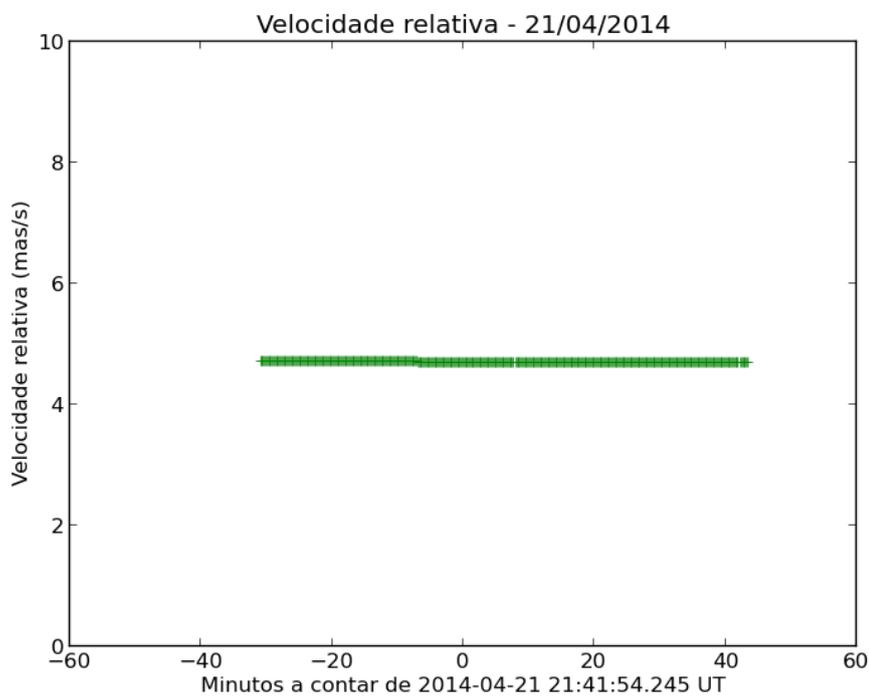


(b) Velocidade

Figura A.7: Aproximação entre Europa e Ganymede em 20 de Abril de 2014.

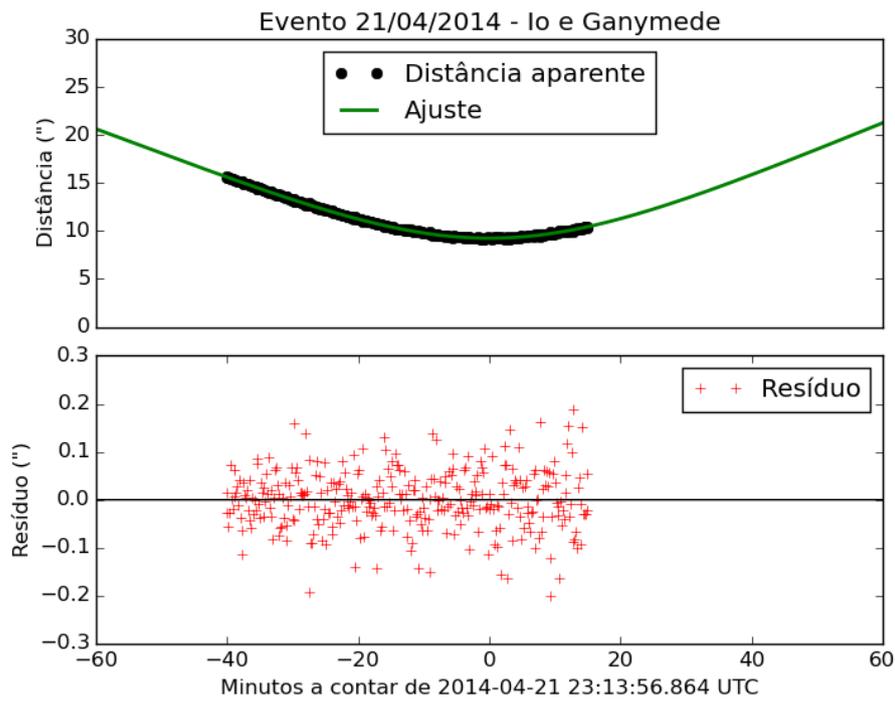


(a) Distância

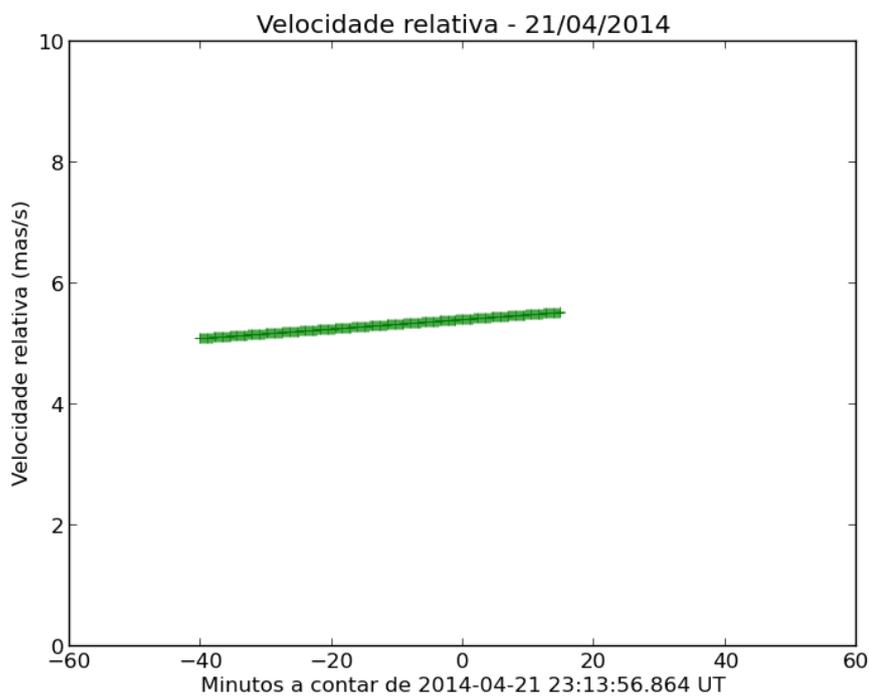


(b) Velocidade

Figura A.8: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 21 de Abril de 2014.



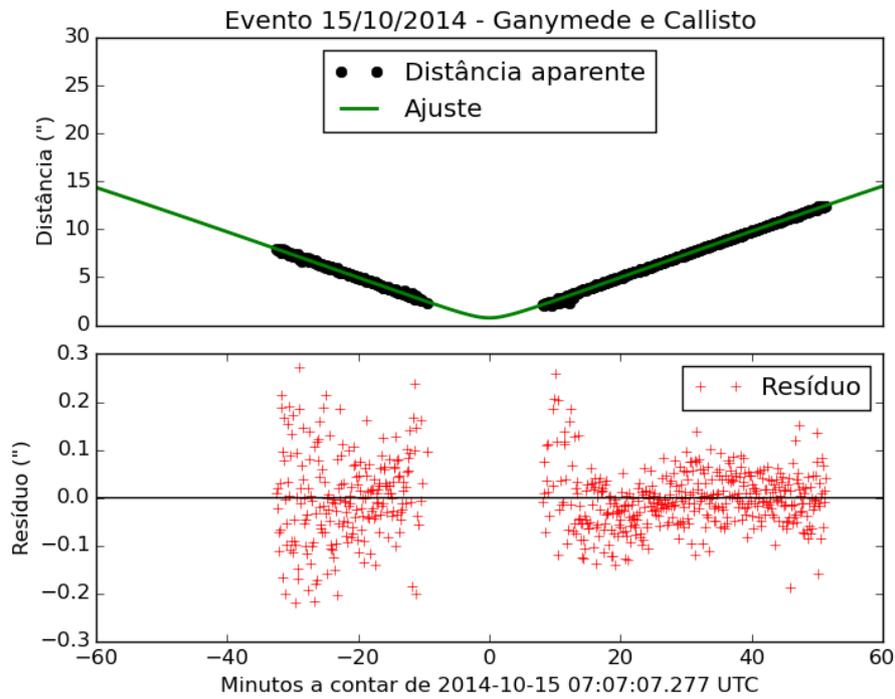
(a) Distância



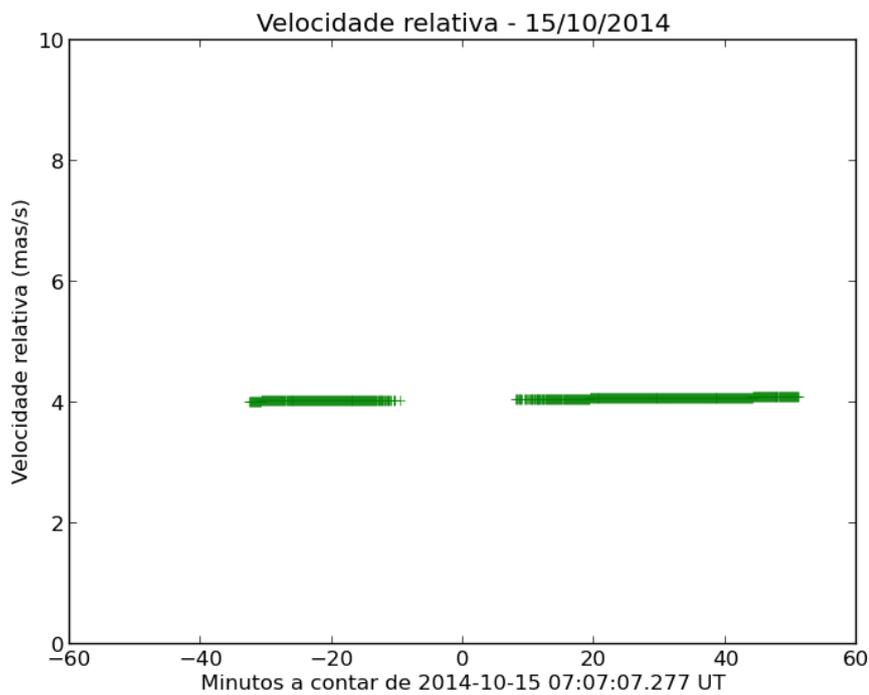
(b) Velocidade

Figura A.9: Aproximação entre Io e Ganymede em 21 de Abril de 2014.

A.2 Aproximações de 2014-2 e 2015-1

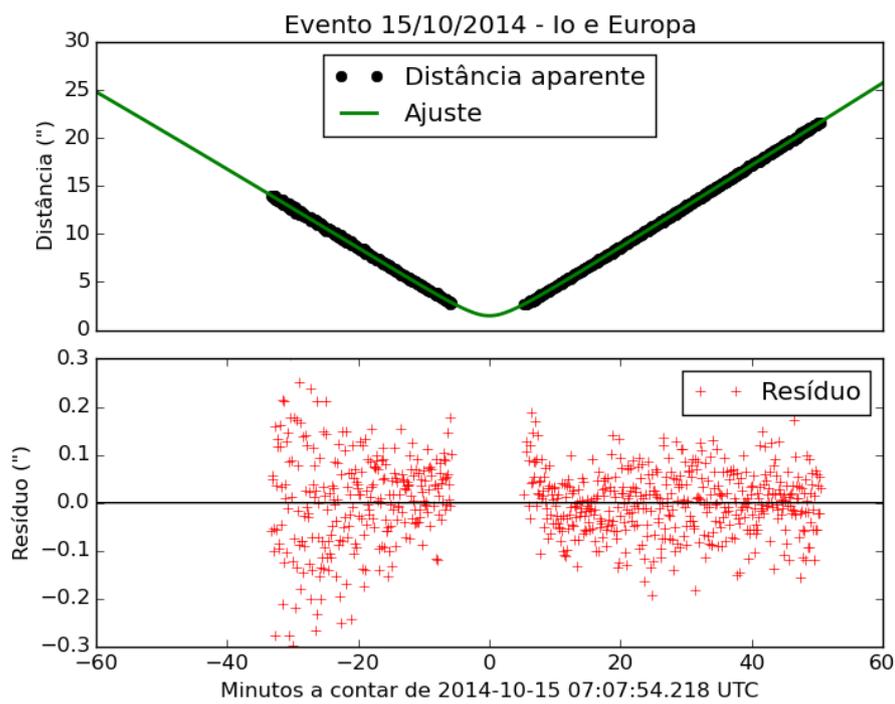


(a) Distância

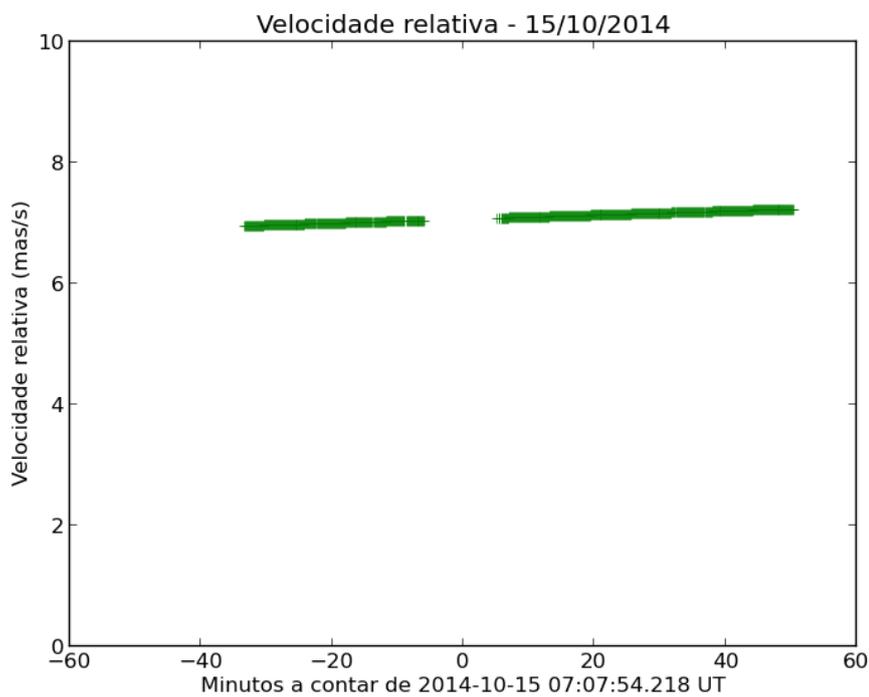


(b) Velocidade

Figura A.10: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 15 de Outubro de 2014.

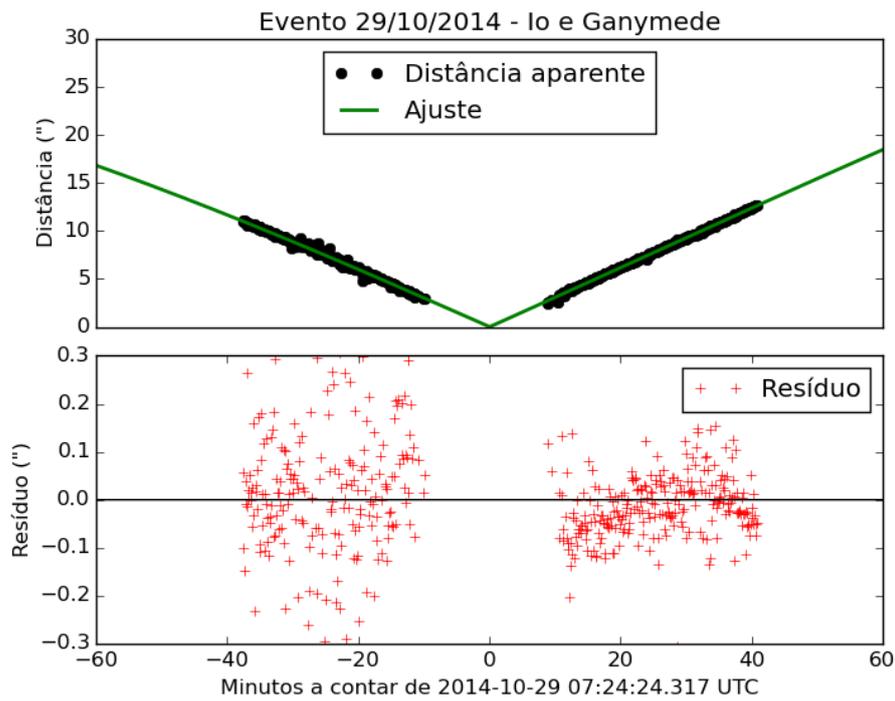


(a) Distância

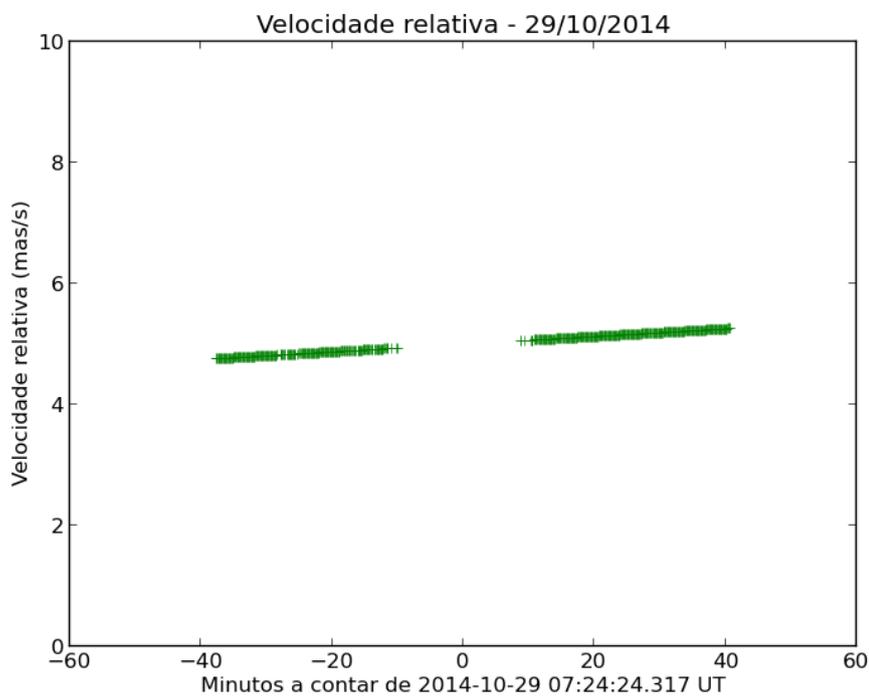


(b) Velocidade

Figura A.11: Aproximação entre Io e Europa em 15 de Outubro de 2014.

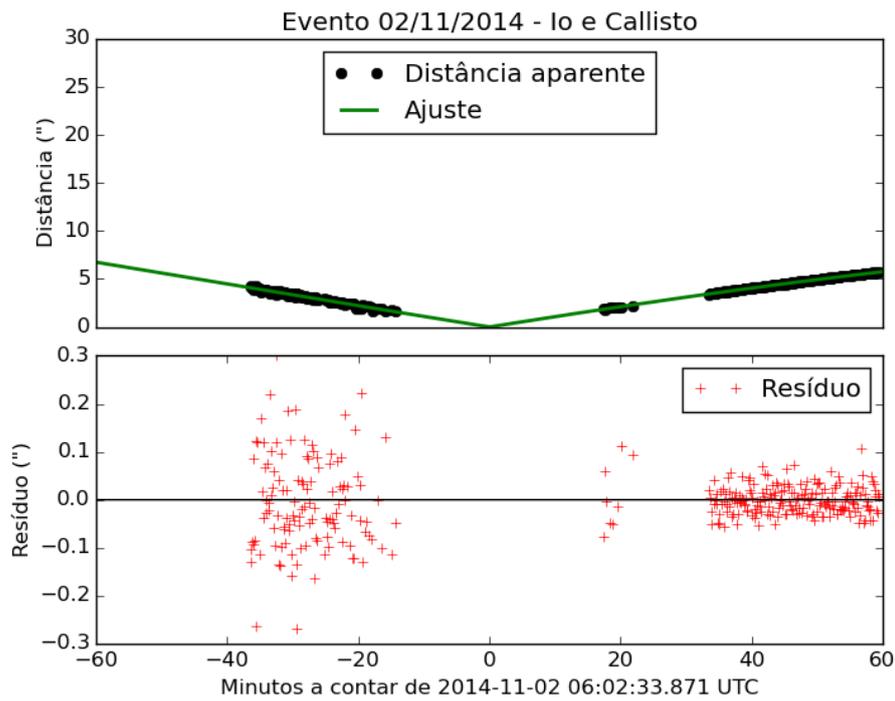


(a) Distância

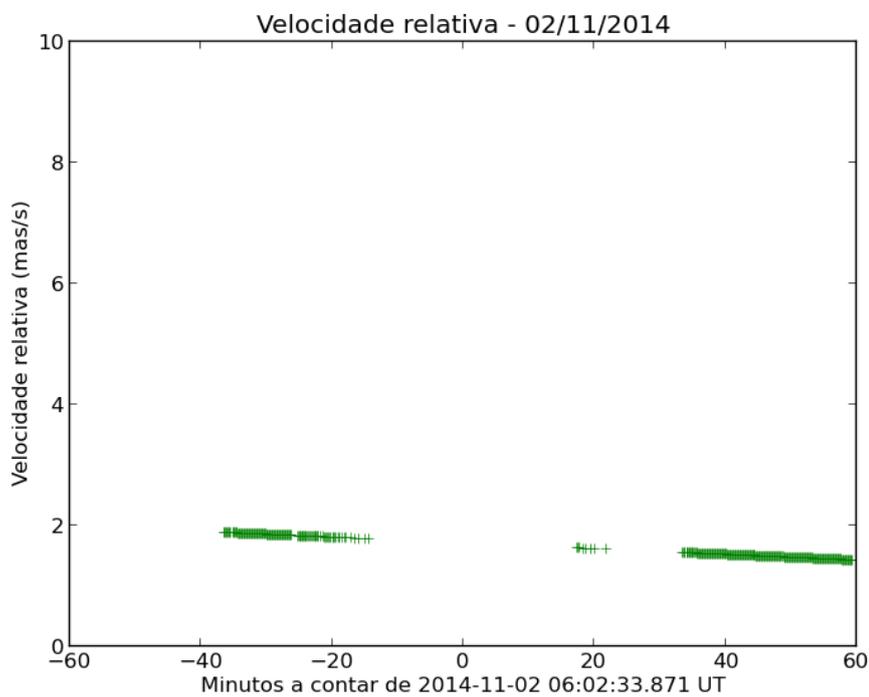


(b) Velocidade

Figura A.12: Aproximação entre Io e Ganymede em 29 de Outubro de 2014.

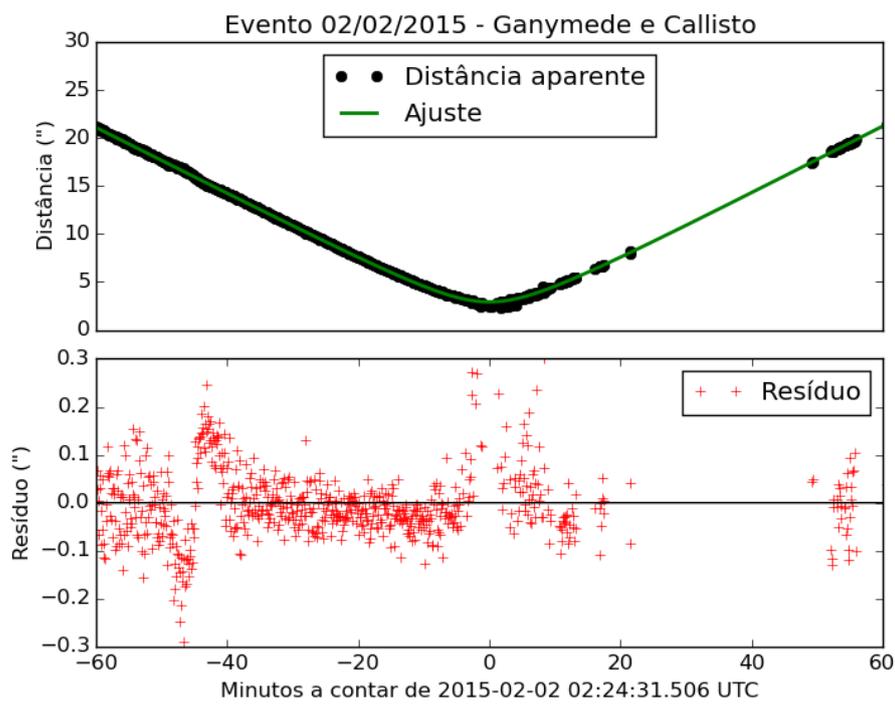


(a) Distância

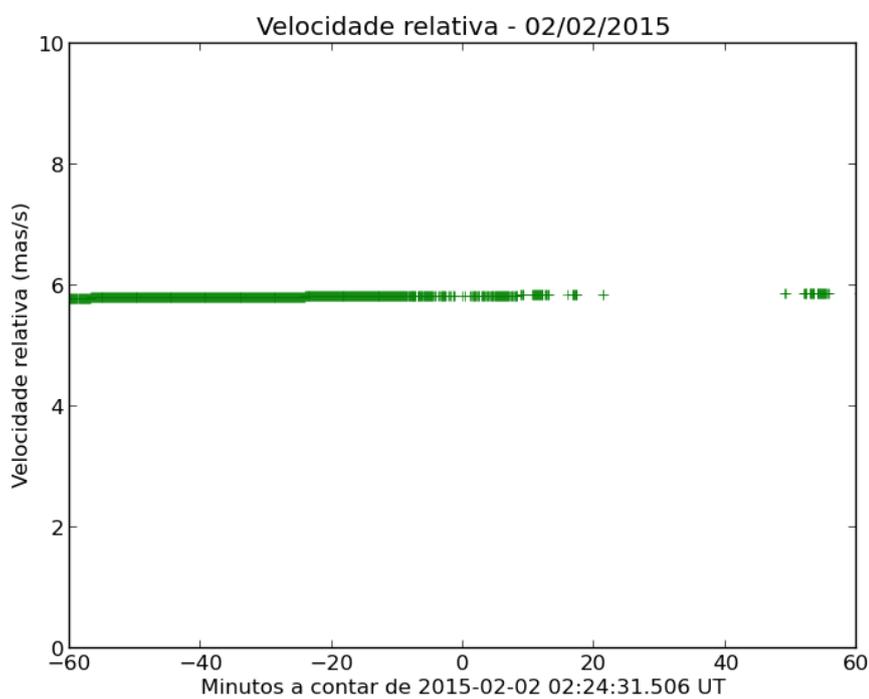


(b) Velocidade

Figura A.13: Aproximação entre Io e Callisto em 02 de Novembro de 2014.

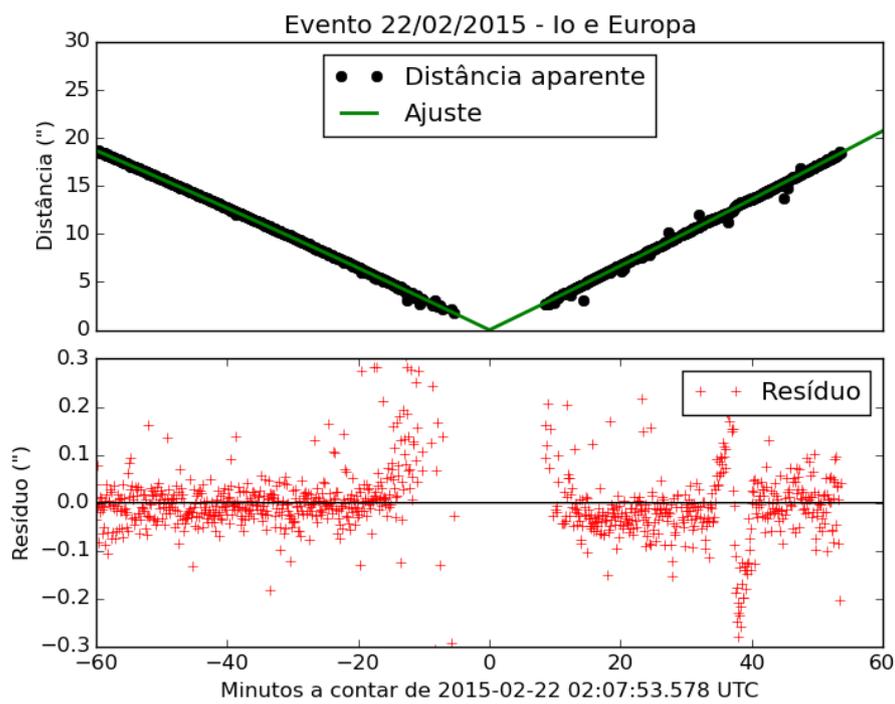


(a) Distância

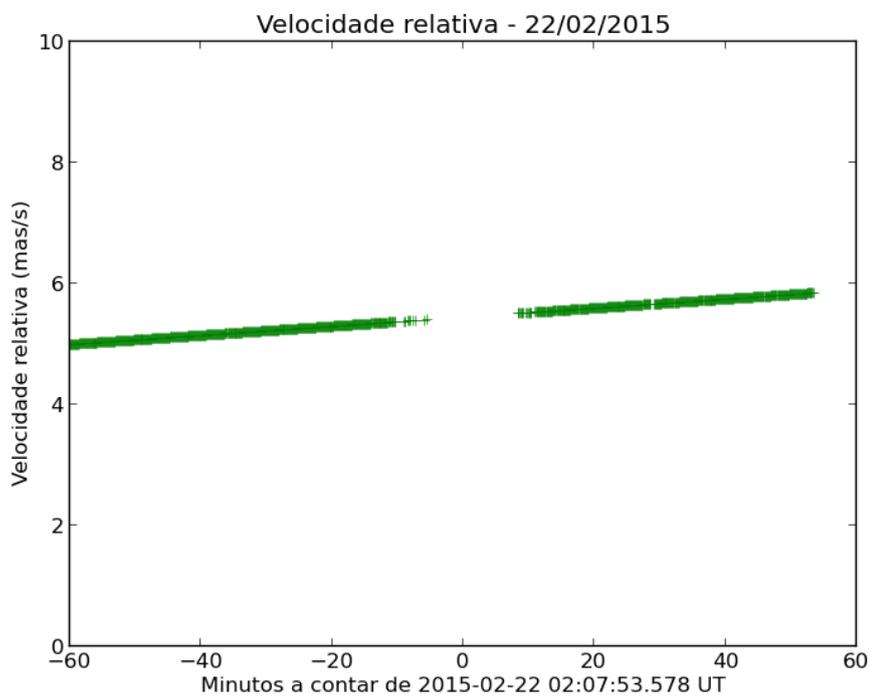


(b) Velocidade

Figura A.14: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 02 de Fevereiro de 2015.

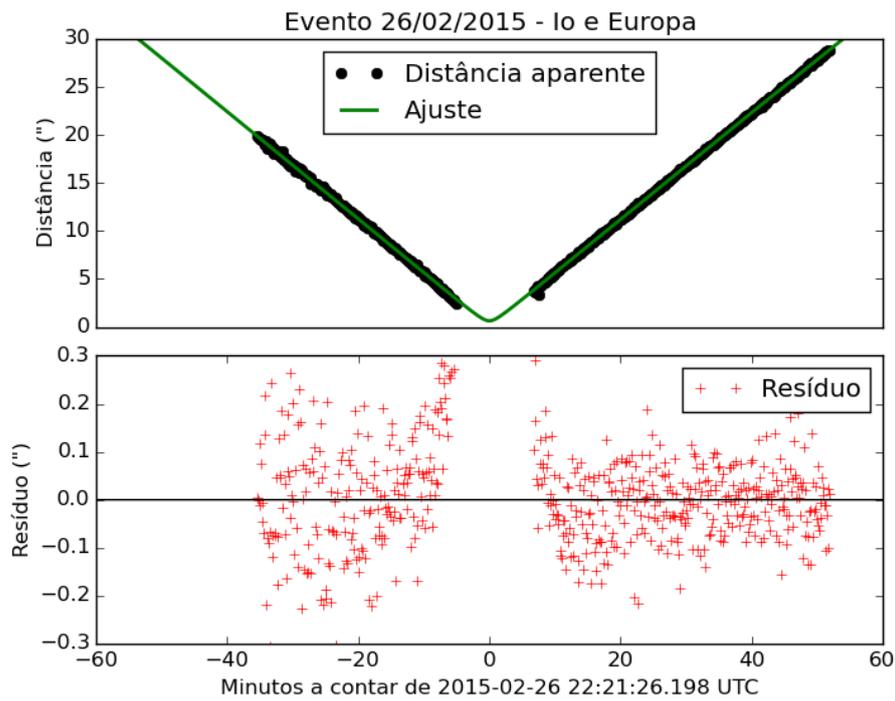


(a) Distância

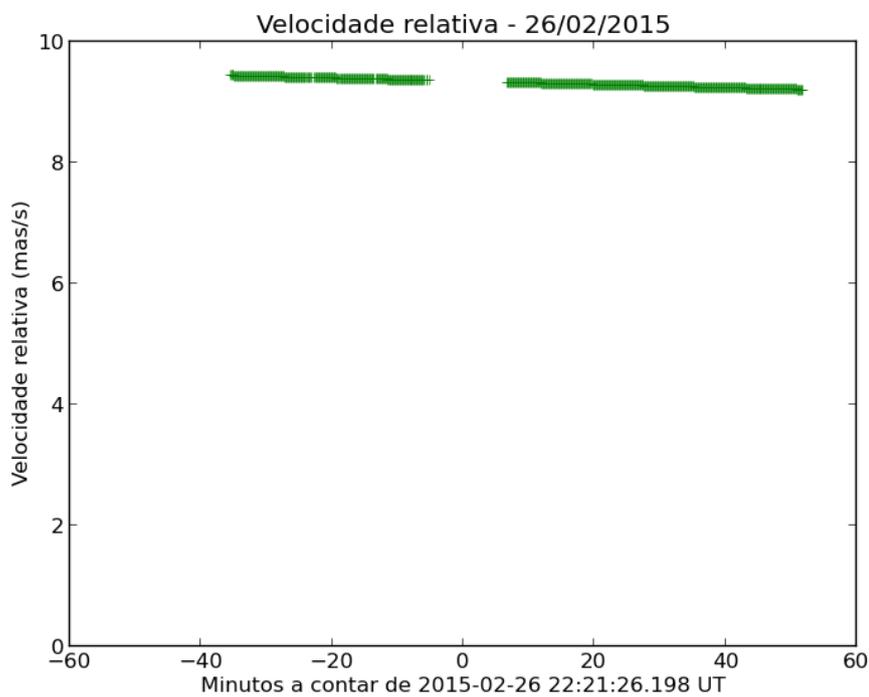


(b) Velocidade

Figura A.15: Aproximação entre Io e Europa em 22 de Fevereiro de 2015.

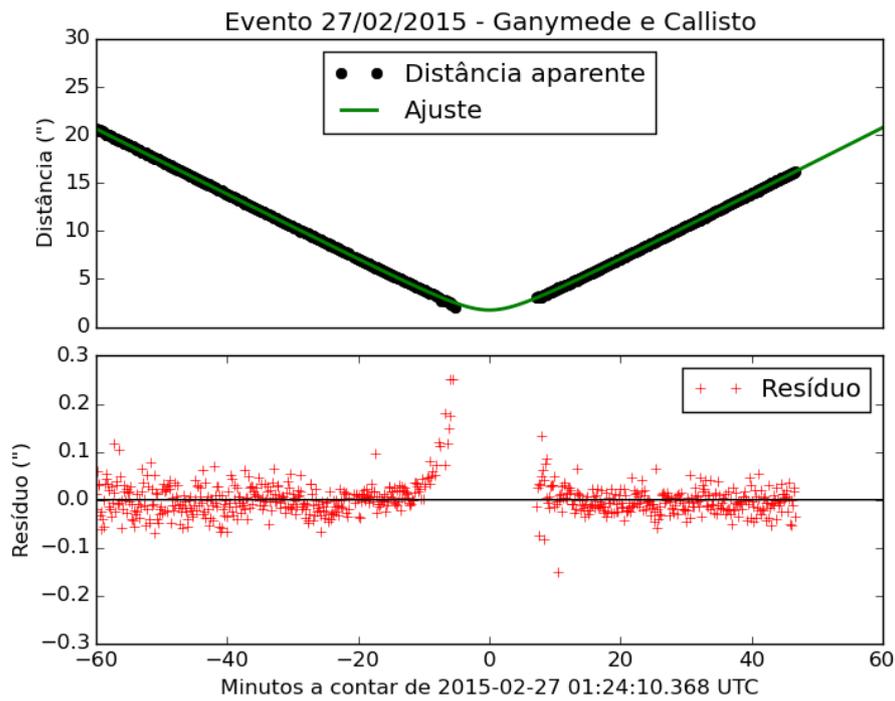


(a) Distância

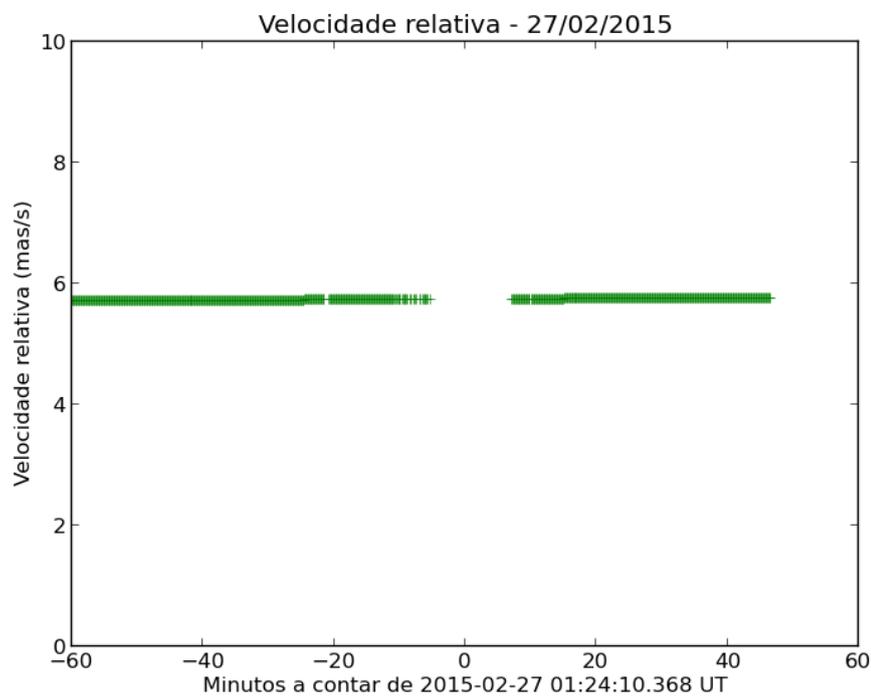


(b) Velocidade

Figura A.16: Aproximação entre Io e Europa em 26 de Fevereiro de 2015.

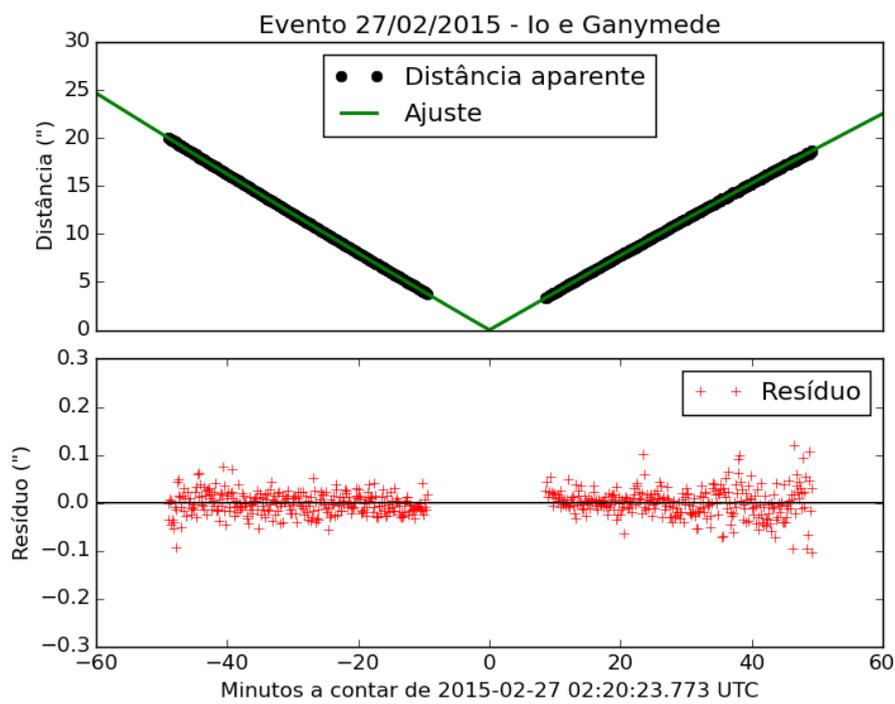


(a) Distância

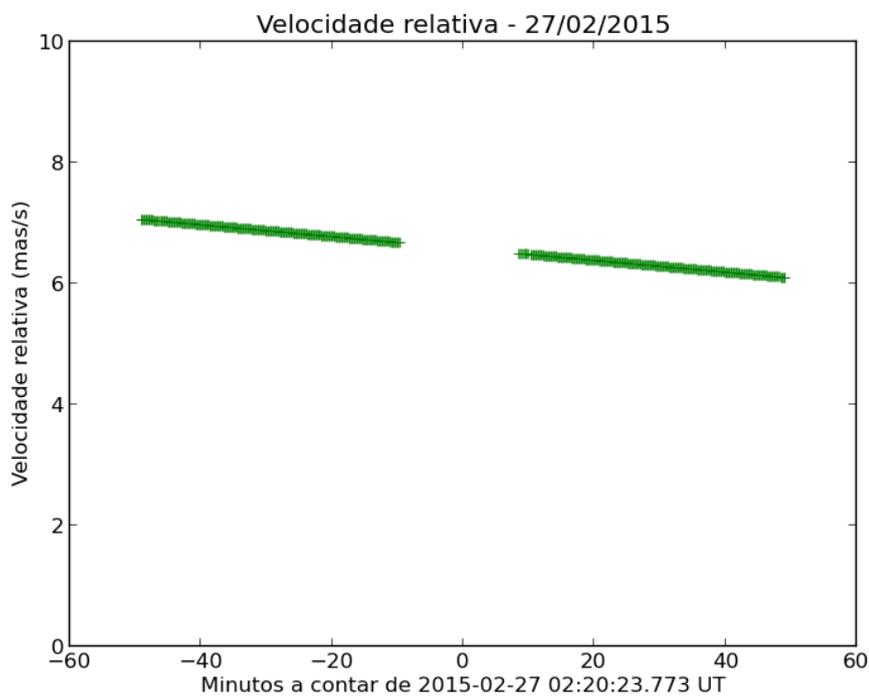


(b) Velocidade

Figura A.17: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 27 de Fevereiro de 2015.

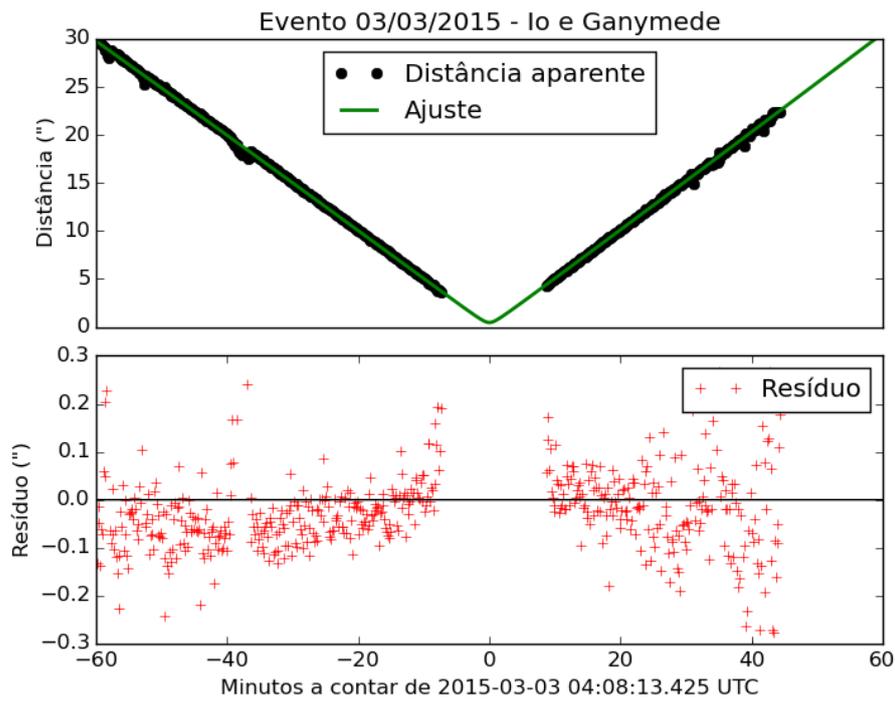


(a) Distância

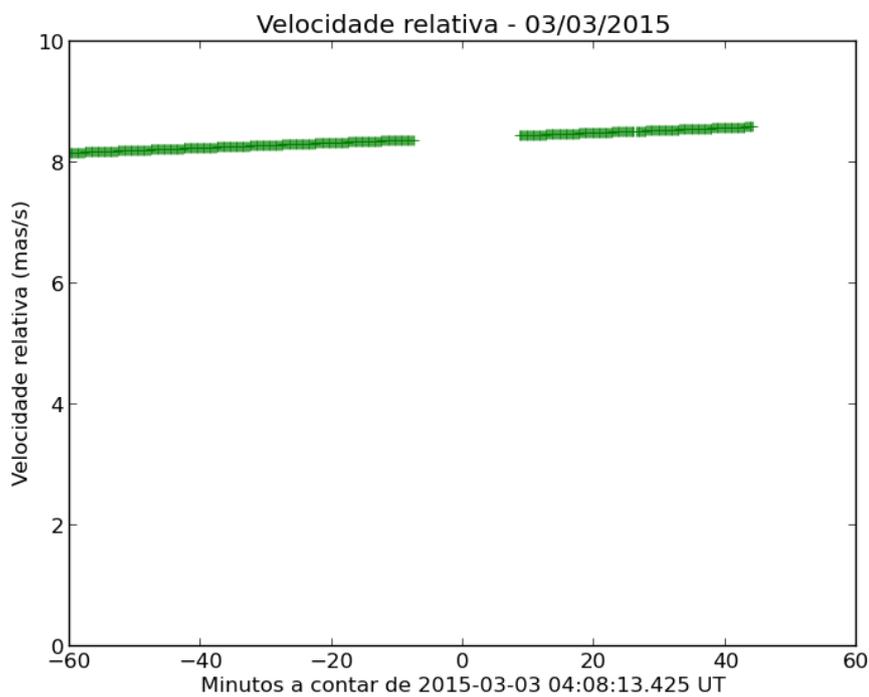


(b) Velocidade

Figura A.18: Aproximação entre Io e Ganymede em 27 de Fevereiro de 2015.

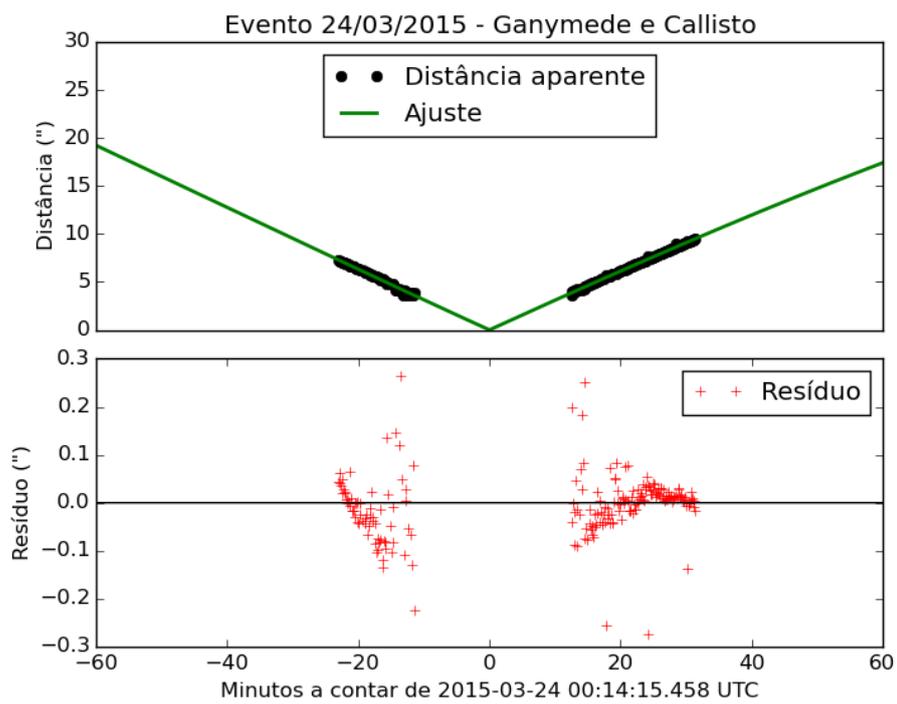


(a) Distância

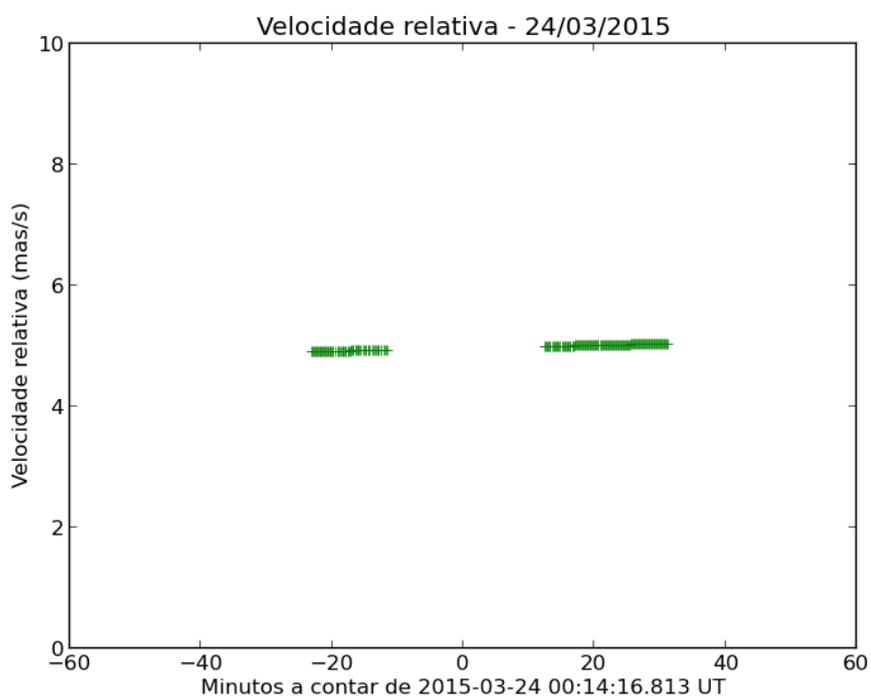


(b) Velocidade

Figura A.19: Aproximação entre Io e Ganymede em 03 de Março de 2015.

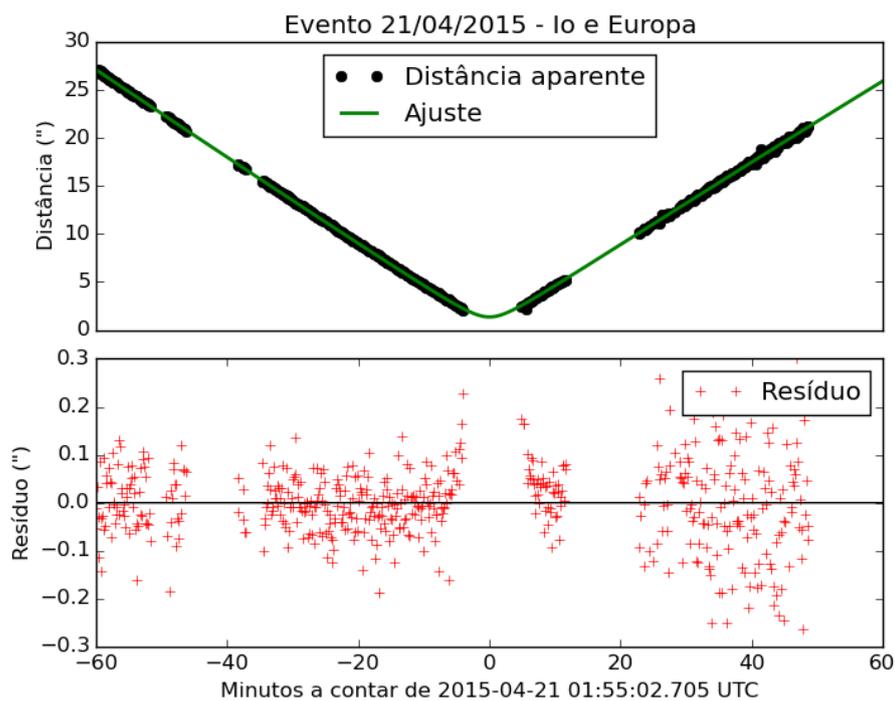


(a) Distância

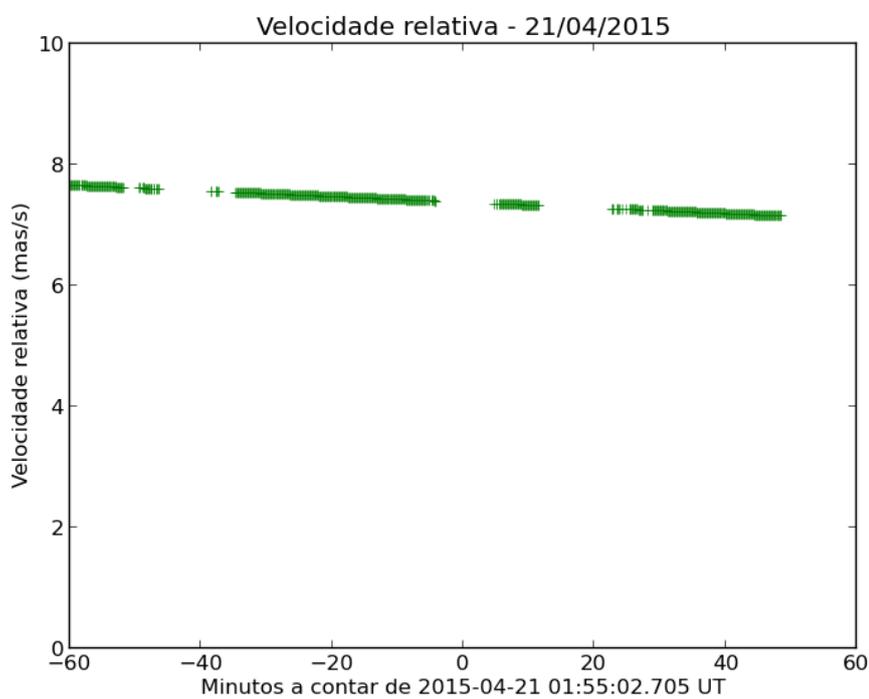


(b) Velocidade

Figura A.20: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 24 de Março de 2015.

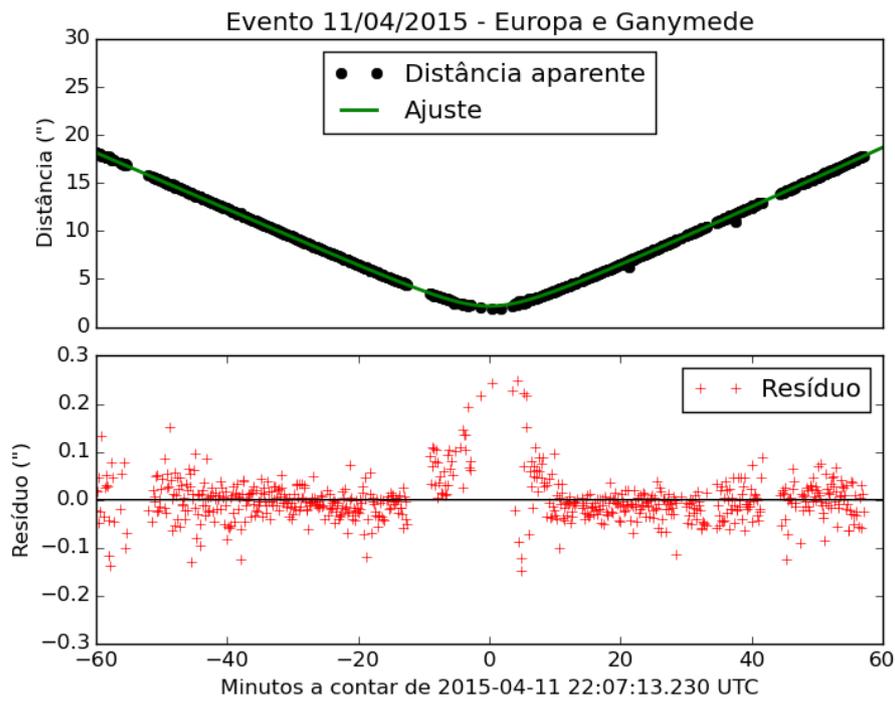


(a) Distância

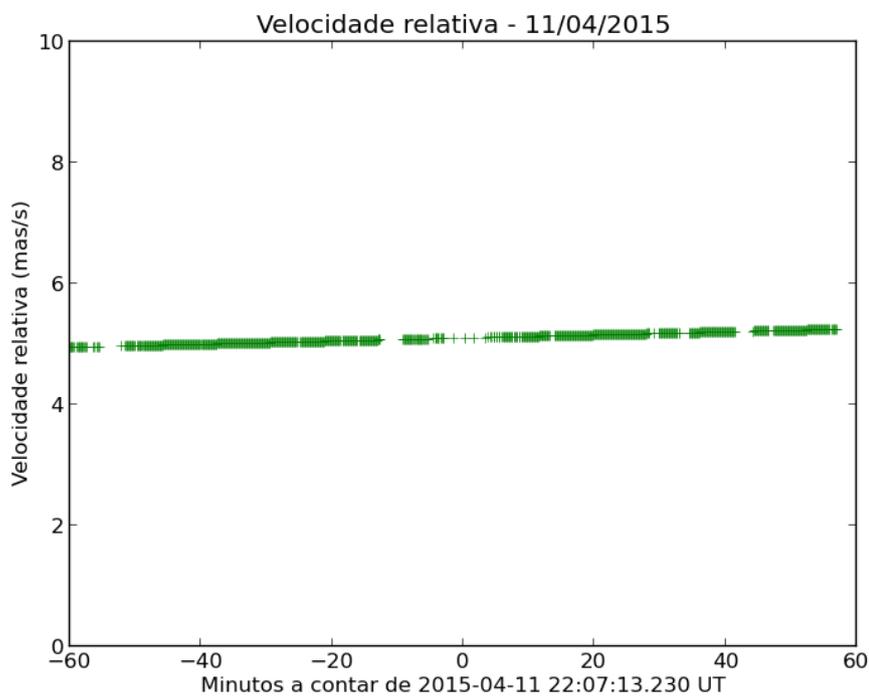


(b) Velocidade

Figura A.21: Aproximação entre Io e Europa em 02 de Abril de 2015.

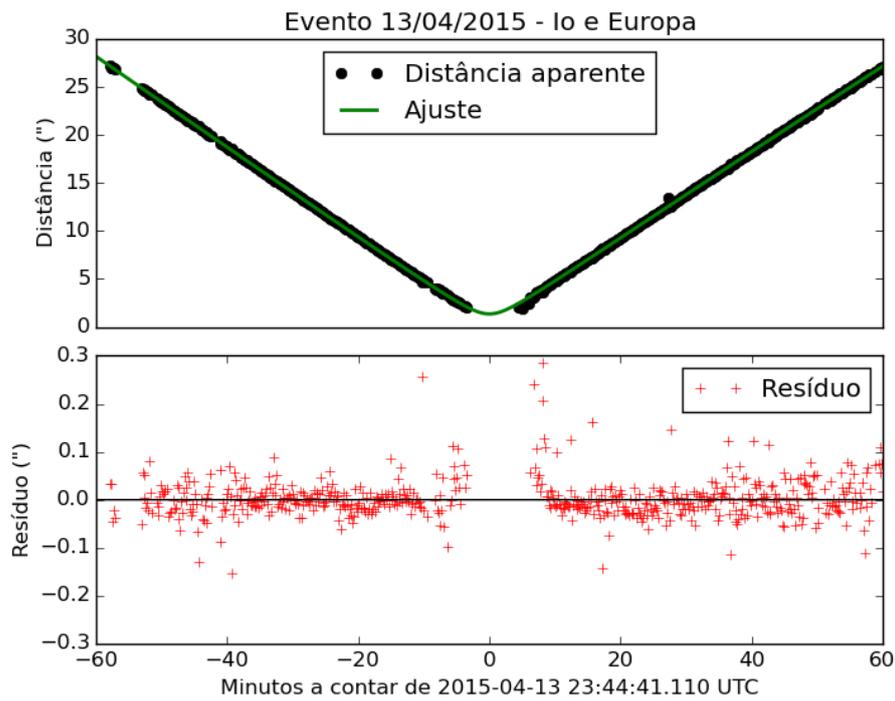


(a) Distância

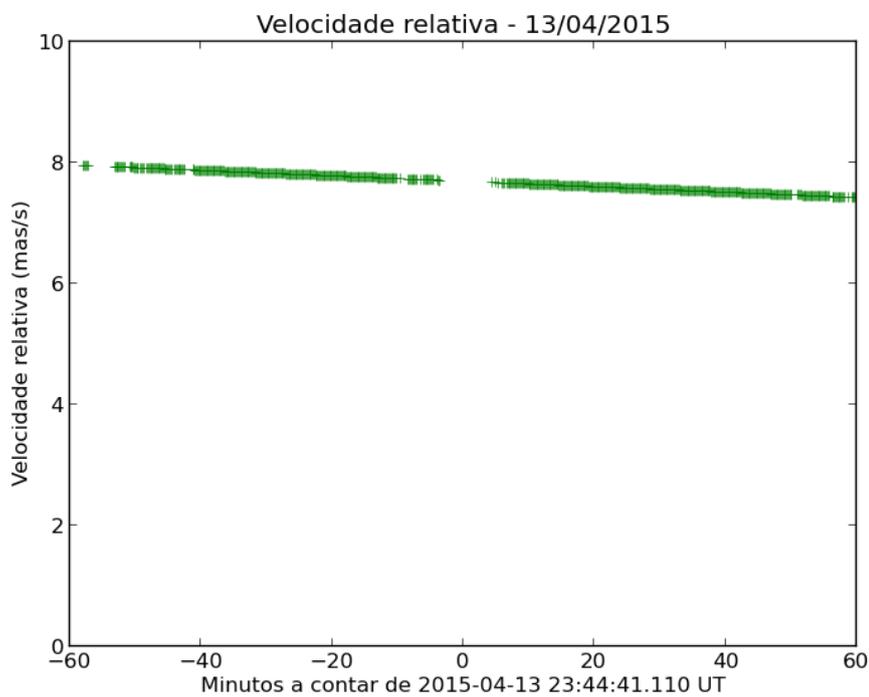


(b) Velocidade

Figura A.22: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 11 de Abril de 2015.

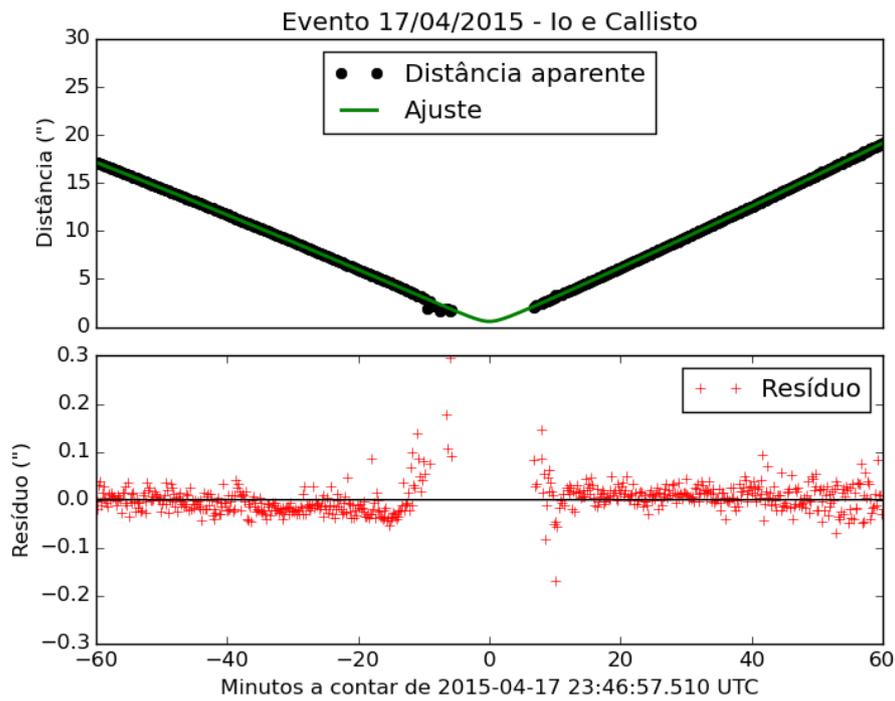


(a) Distância

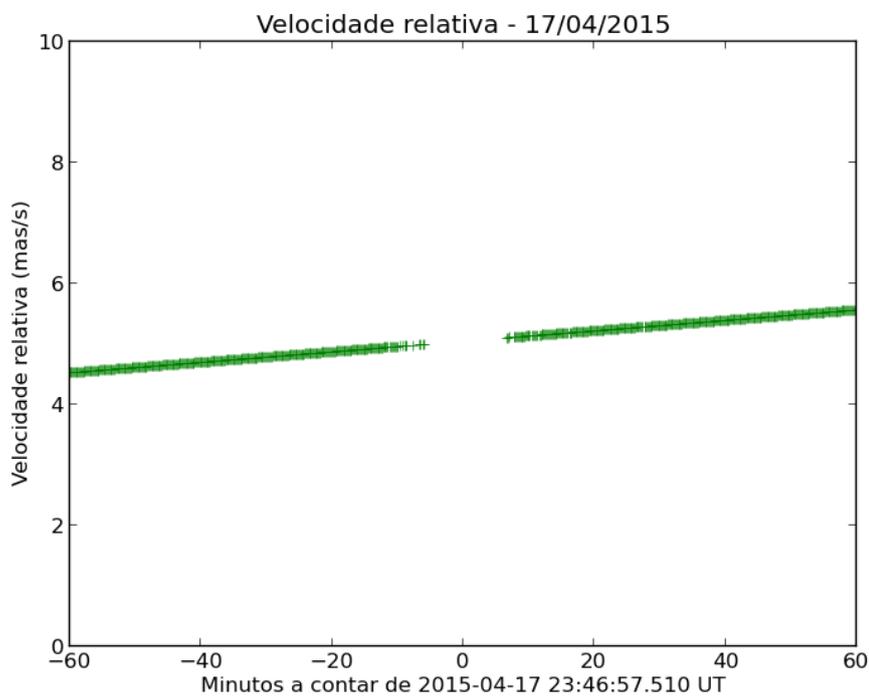


(b) Velocidade

Figura A.23: Aproximação entre Io e Europa em 13 de Abril de 2015.

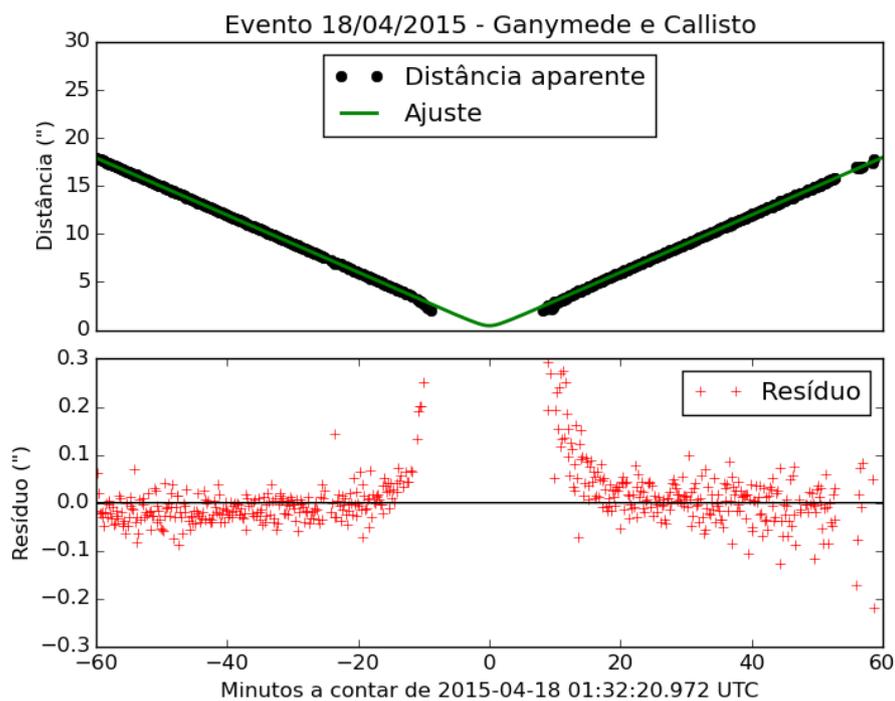


(a) Distância

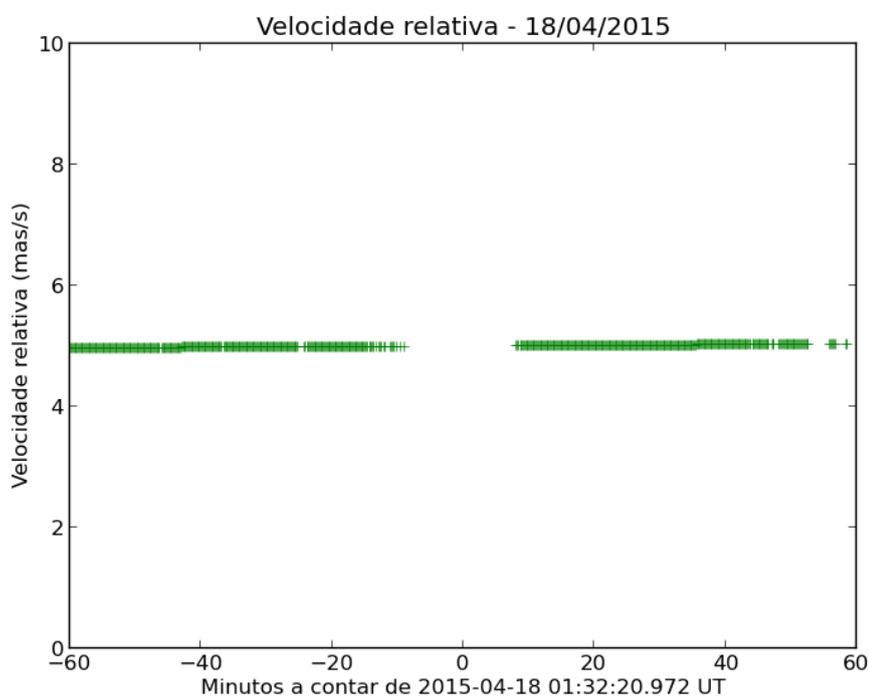


(b) Velocidade

Figura A.24: Aproximação entre Io e Callisto em 17 de Abril de 2015.

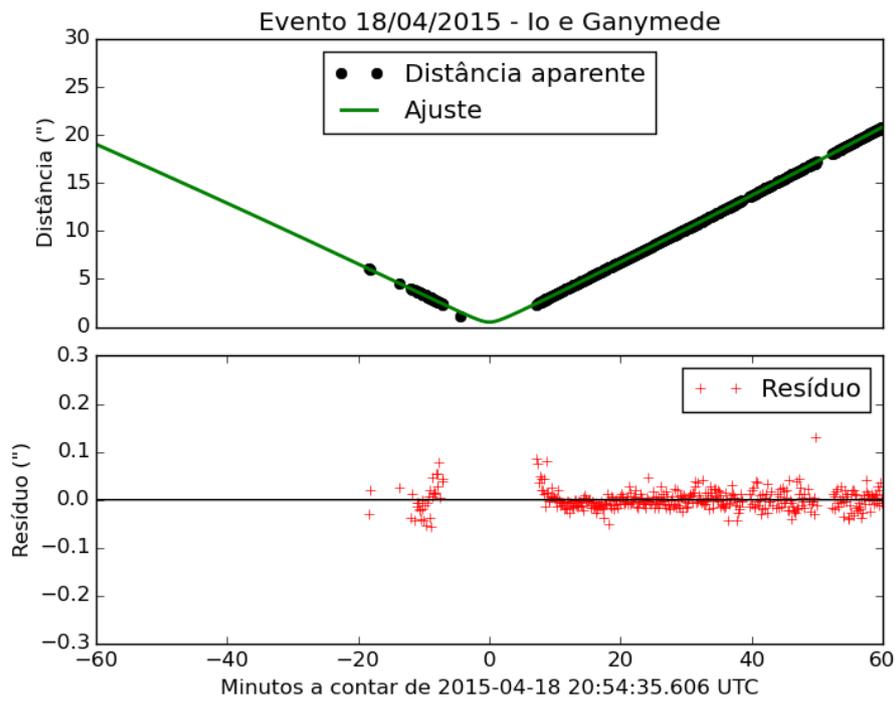


(a) Distância

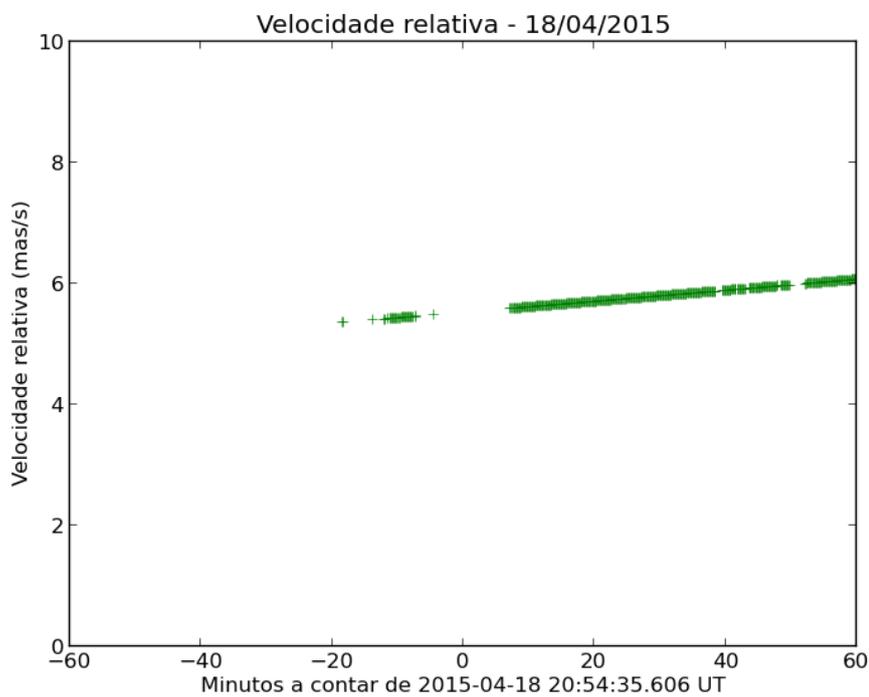


(b) Velocidade

Figura A.25: Aproximação entre Ganymede e Callisto em 18 de Abril de 2015.

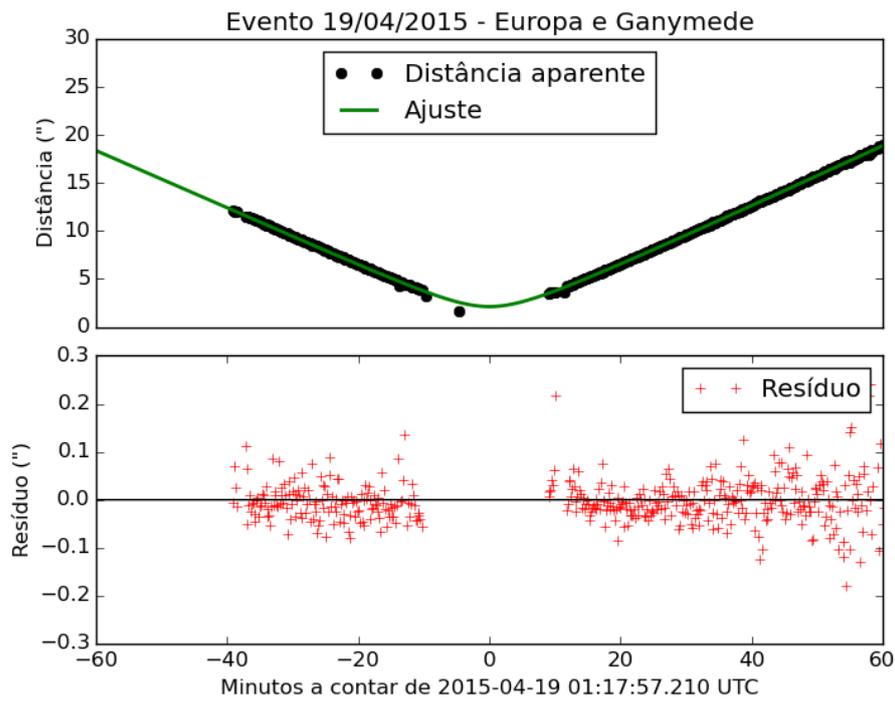


(a) Distância

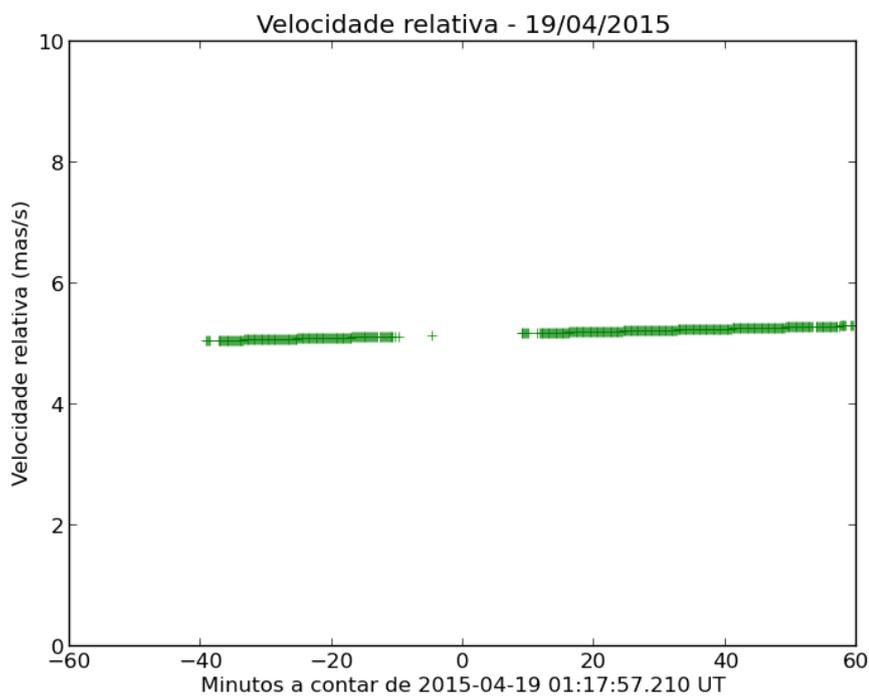


(b) Velocidade

Figura A.26: Aproximação entre Io e Ganymede em 18 de Abril de 2015.

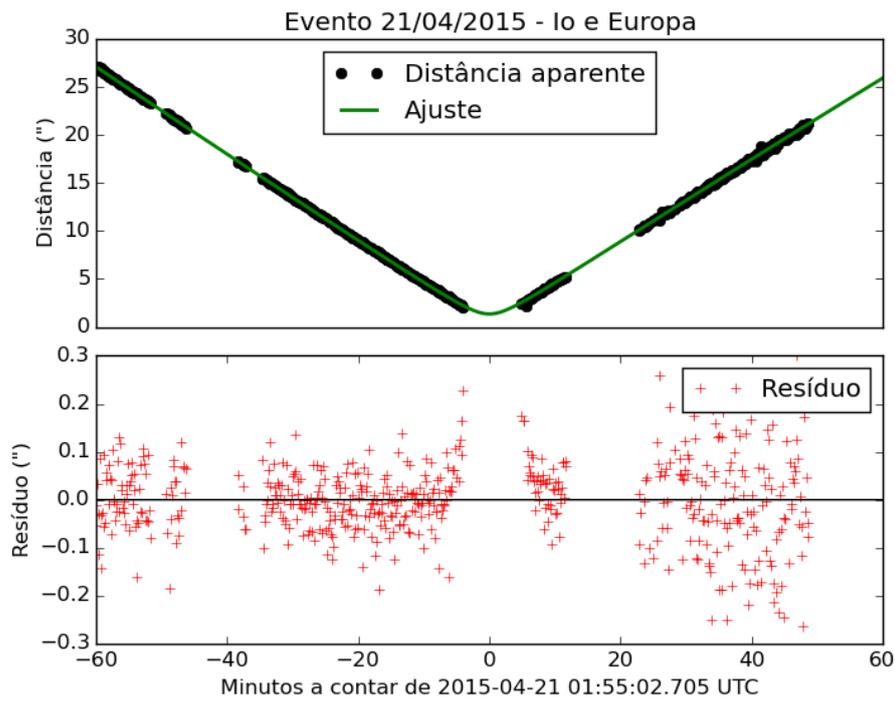


(a) Distância

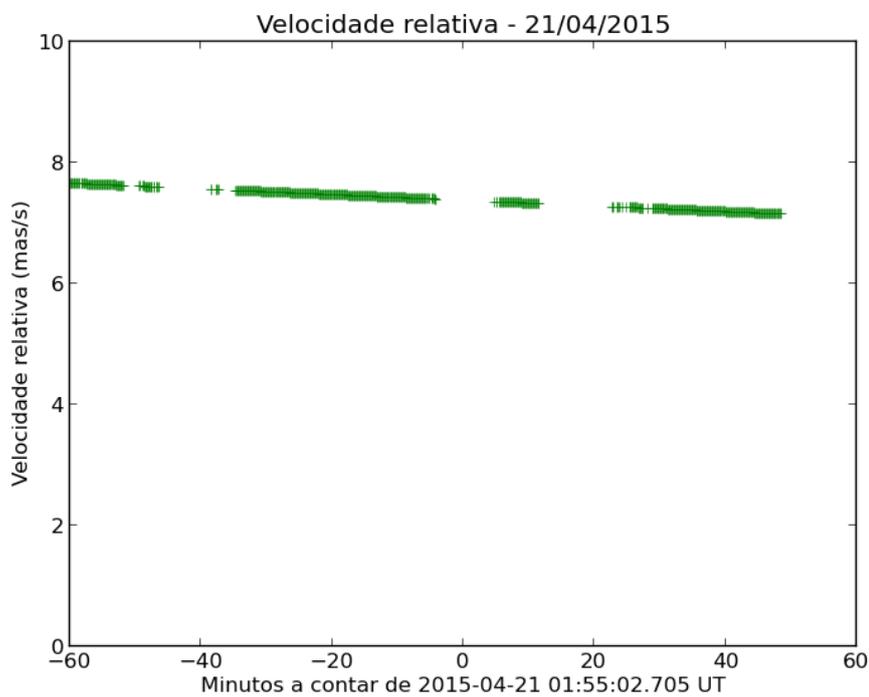


(b) Velocidade

Figura A.27: Aproximação entre Europa e Ganymede em 19 de Abril de 2015.

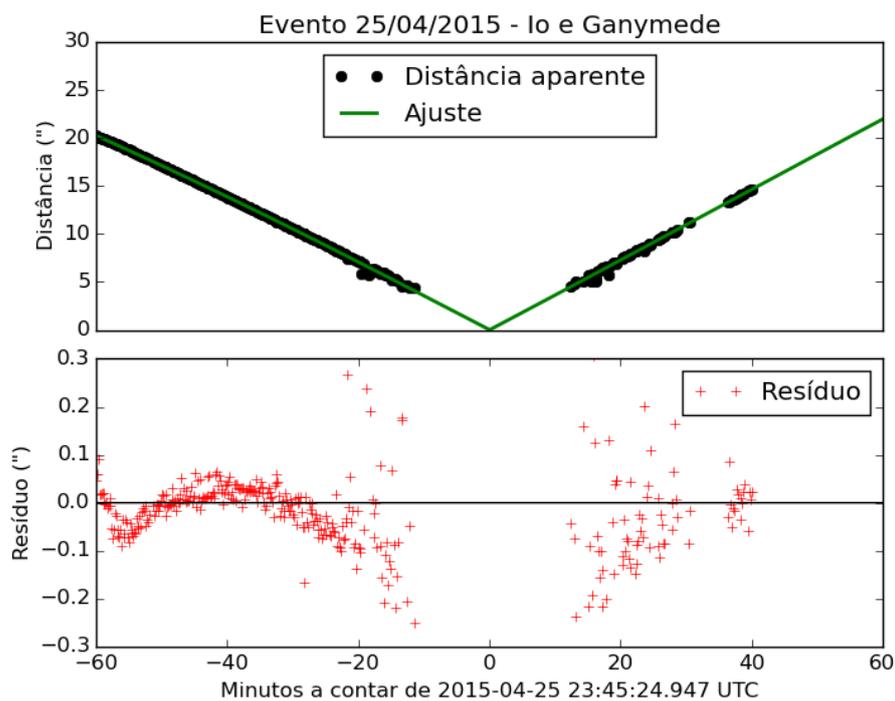


(a) Distância

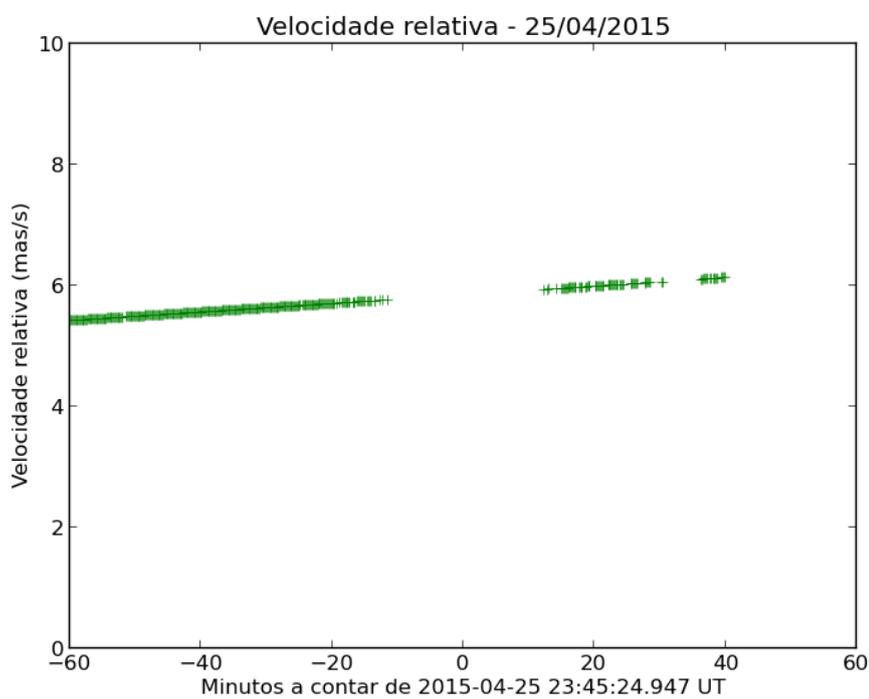


(b) Velocidade

Figura A.28: Aproximação entre Io e Europa em 21 de Abril de 2015.

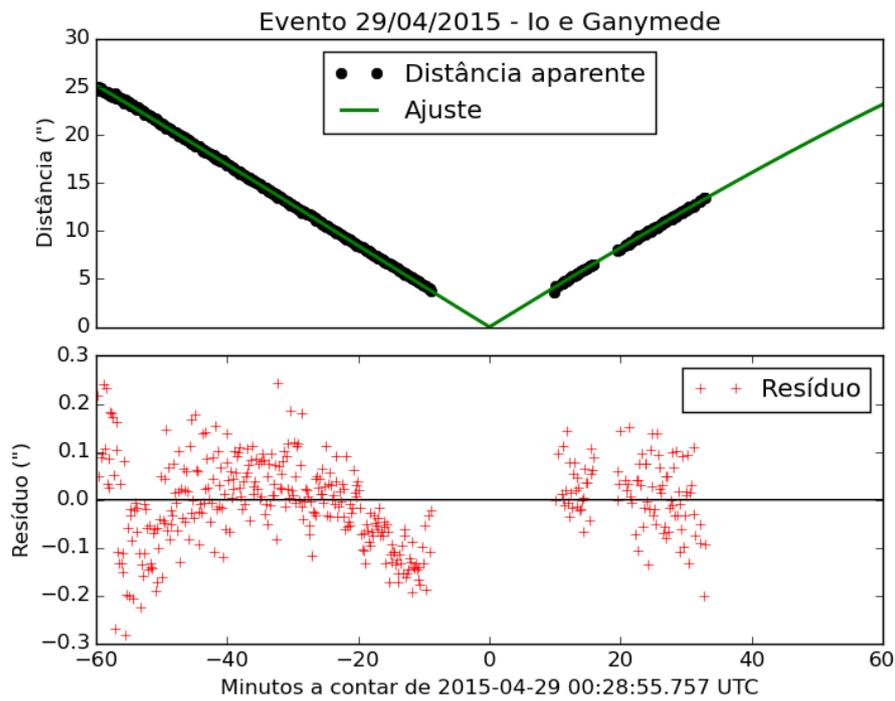


(a) Distância

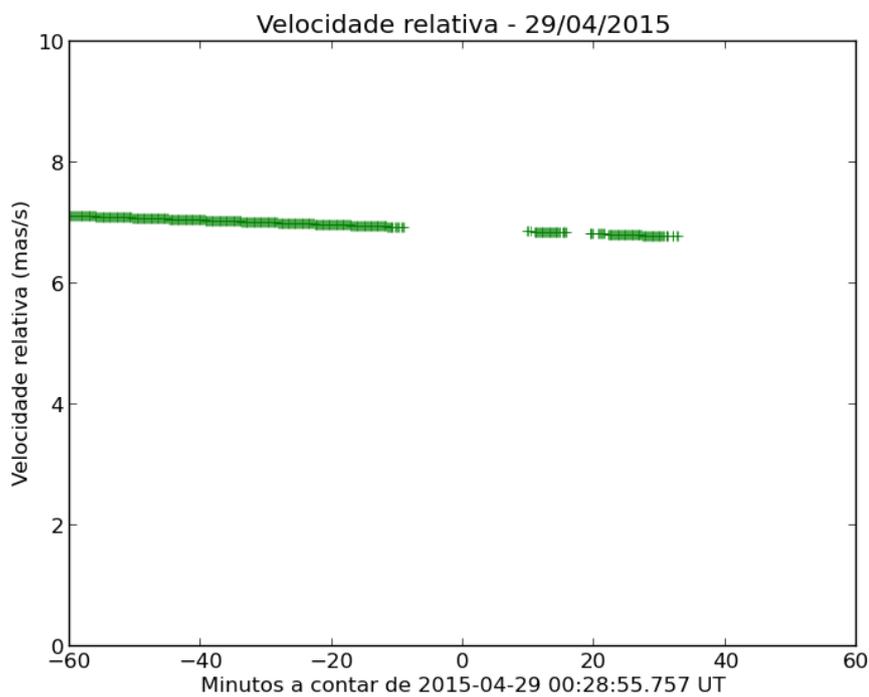


(b) Velocidade

Figura A.29: Aproximação entre Io e Ganymede em 25 de Abril de 2015.

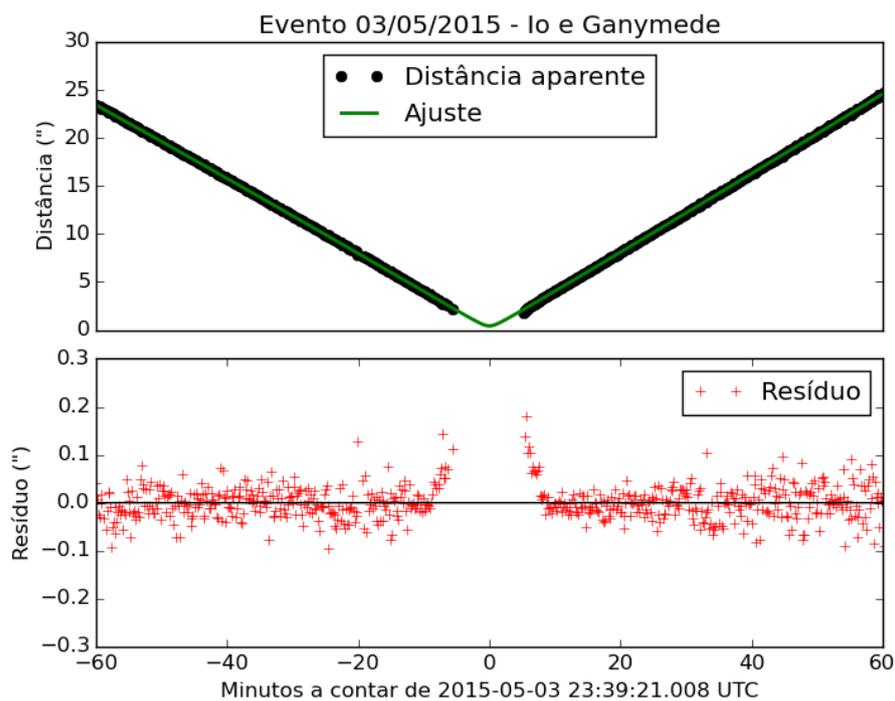


(a) Distância

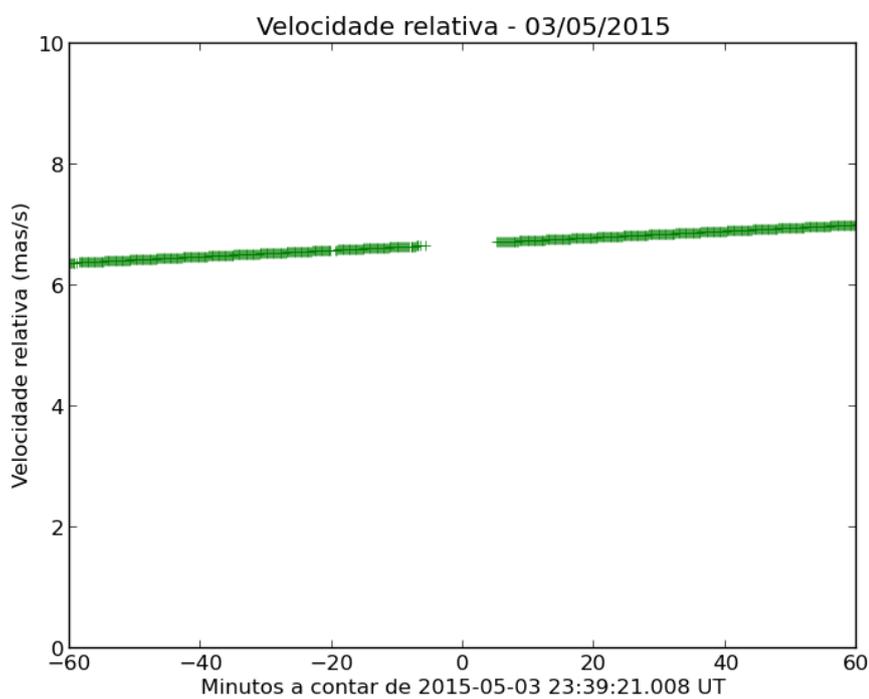


(b) Velocidade

Figura A.30: Aproximação entre Io e Ganymede em 29 de Abril de 2015.



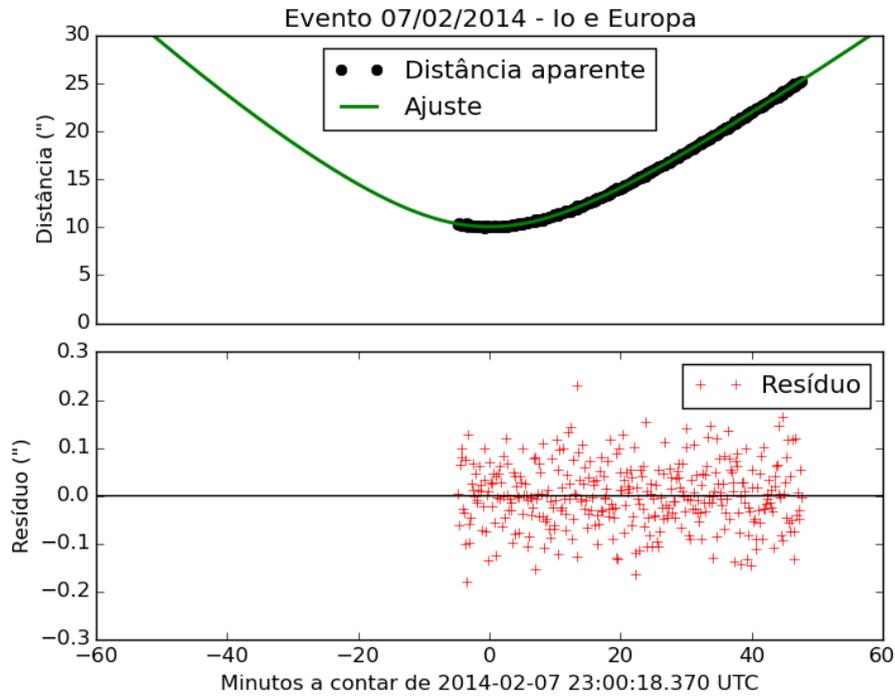
(a) Distância



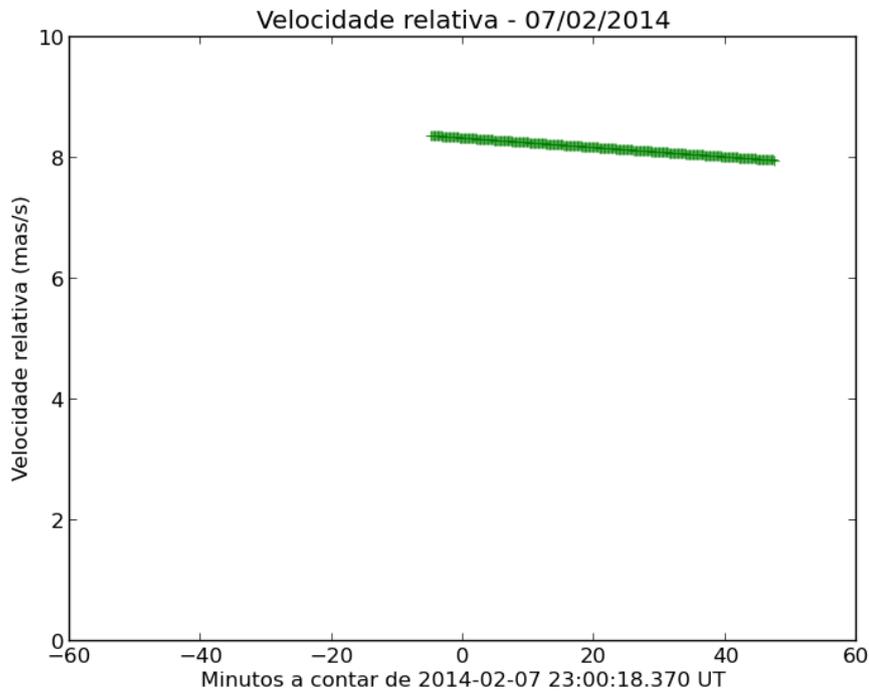
(b) Velocidade

Figura A.31: Aproximação entre Io e Europa em 03 de Maio de 2015.

A.3 Aproximações de baixa precisão

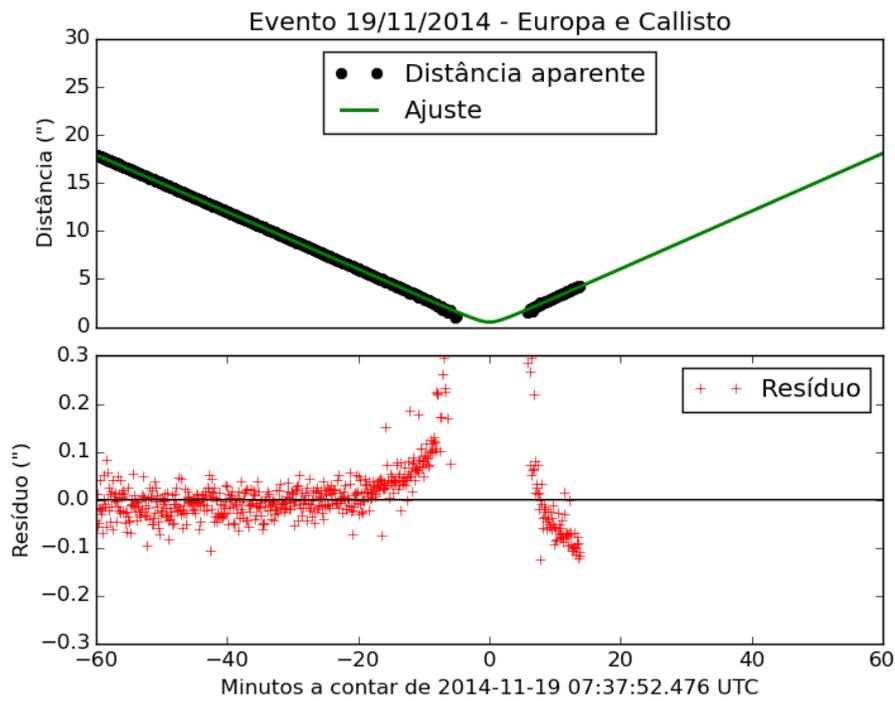


(a) Distância

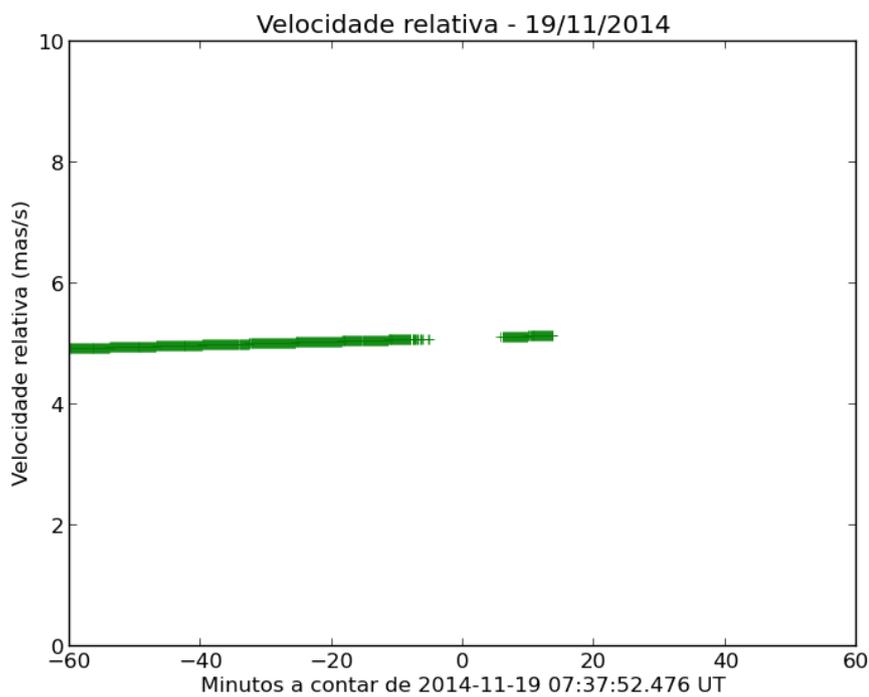


(b) Velocidade

Figura A.32: Aproximação entre Io e Europa em 07 de Fevereiro de 2014.

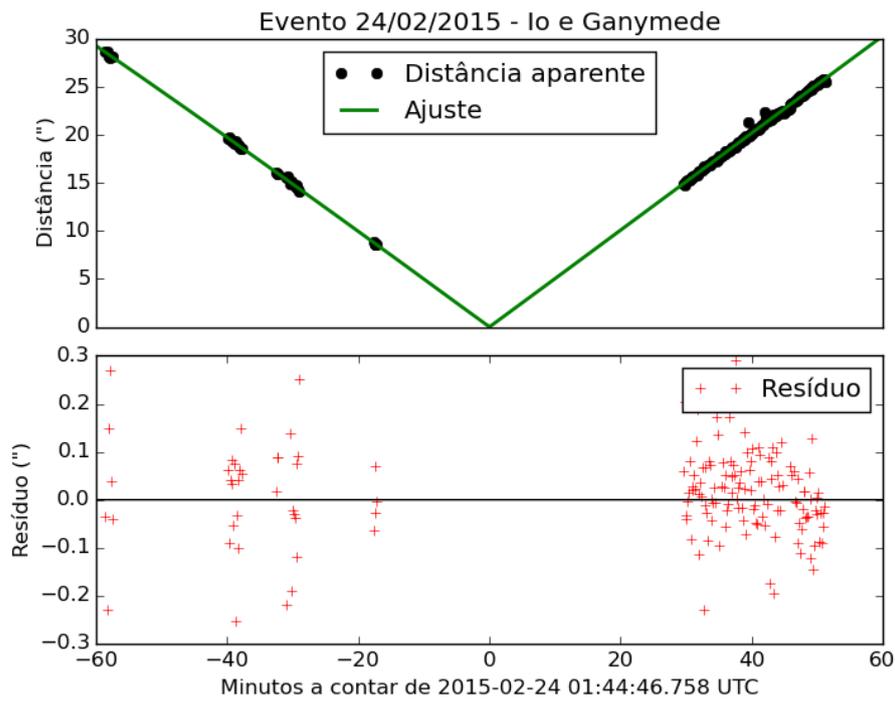


(a) Distância

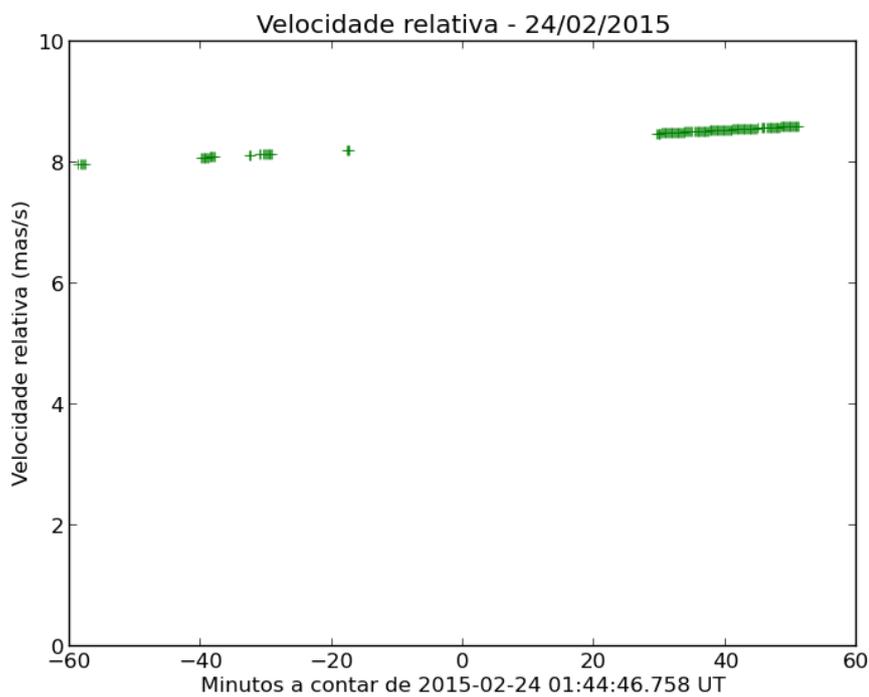


(b) Velocidade

Figura A.33: Aproximação entre Europa e Callisto em 19 de Novembro de 2014.

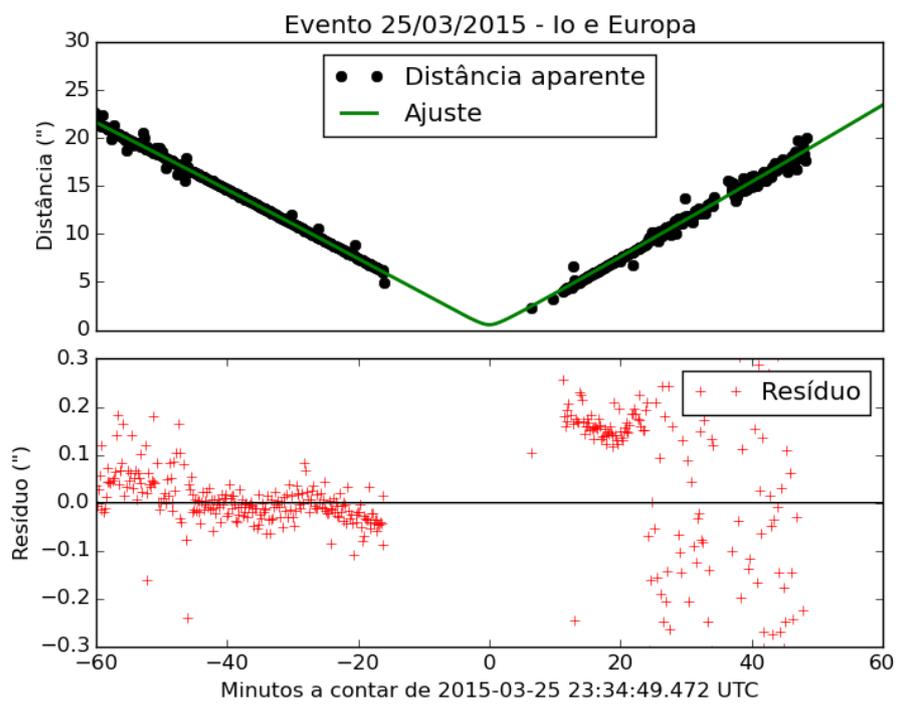


(a) Distância

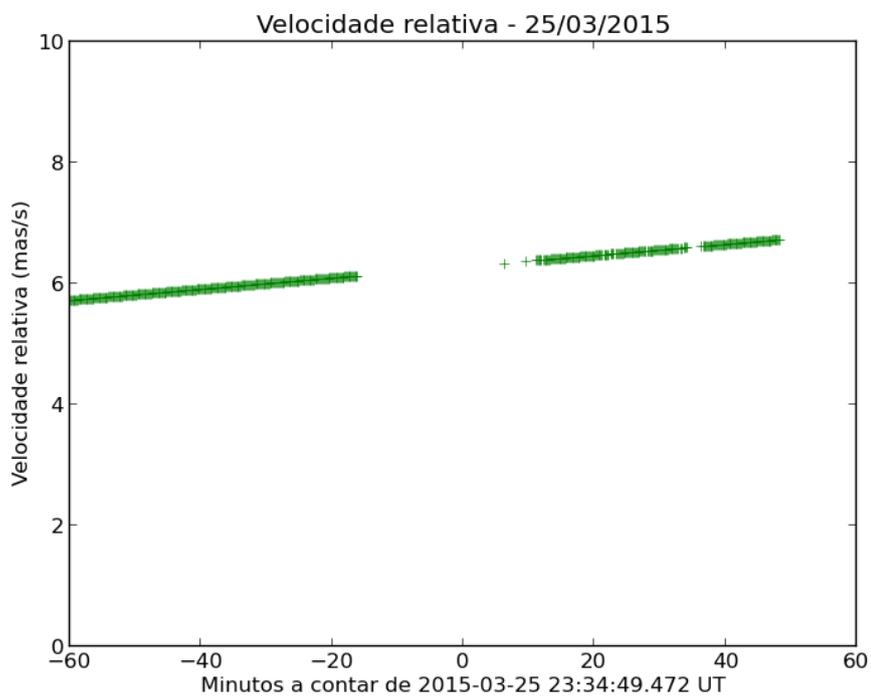


(b) Velocidade

Figura A.34: Aproximação entre Io e Ganymede em 24 de Fevereiro de 2015.

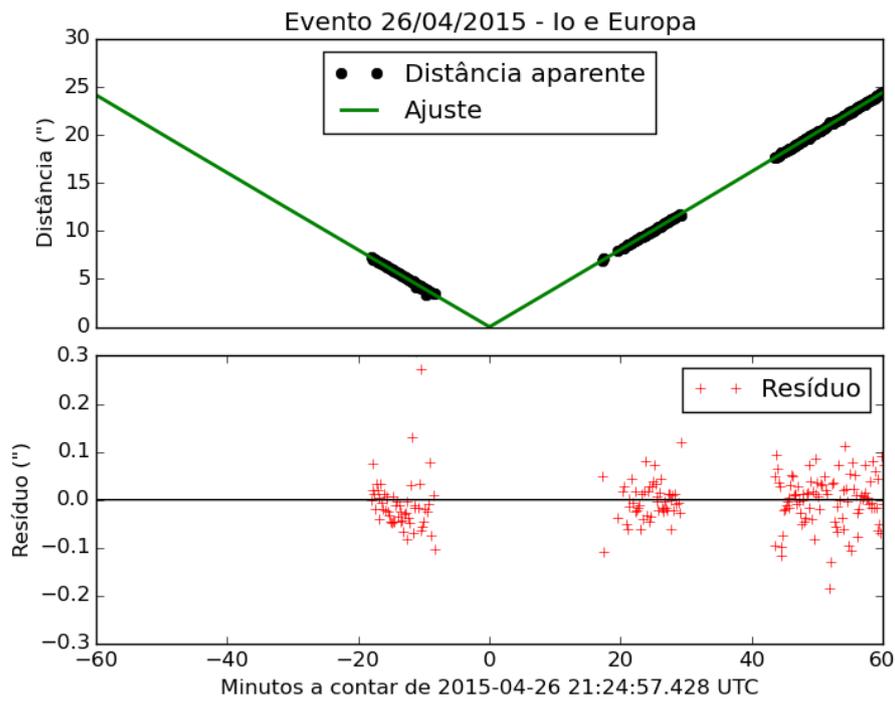


(a) Distância

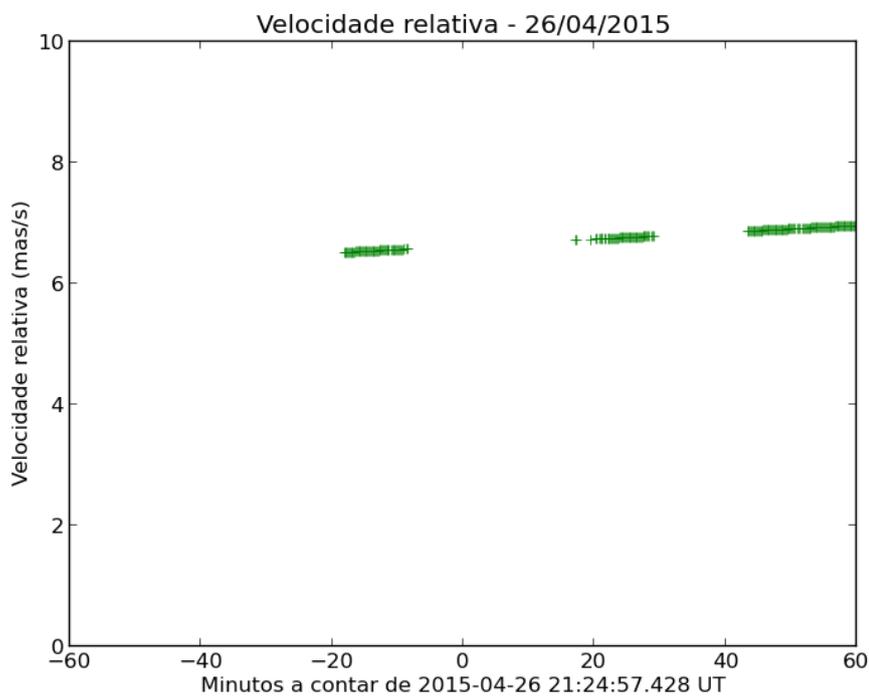


(b) Velocidade

Figura A.35: Aproximação entre Io e Europa em 25 de Março de 2015.



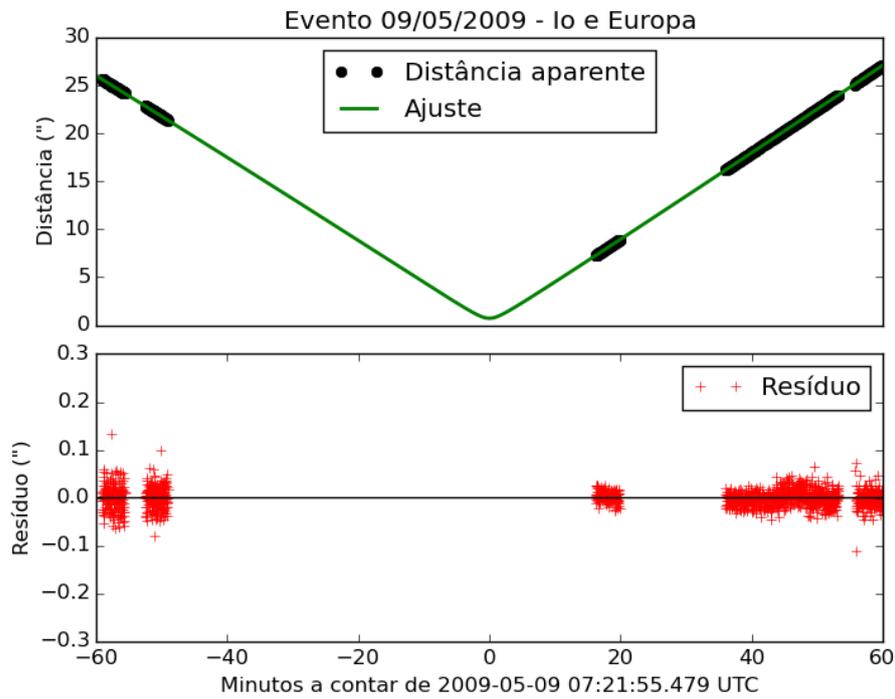
(a) Distância



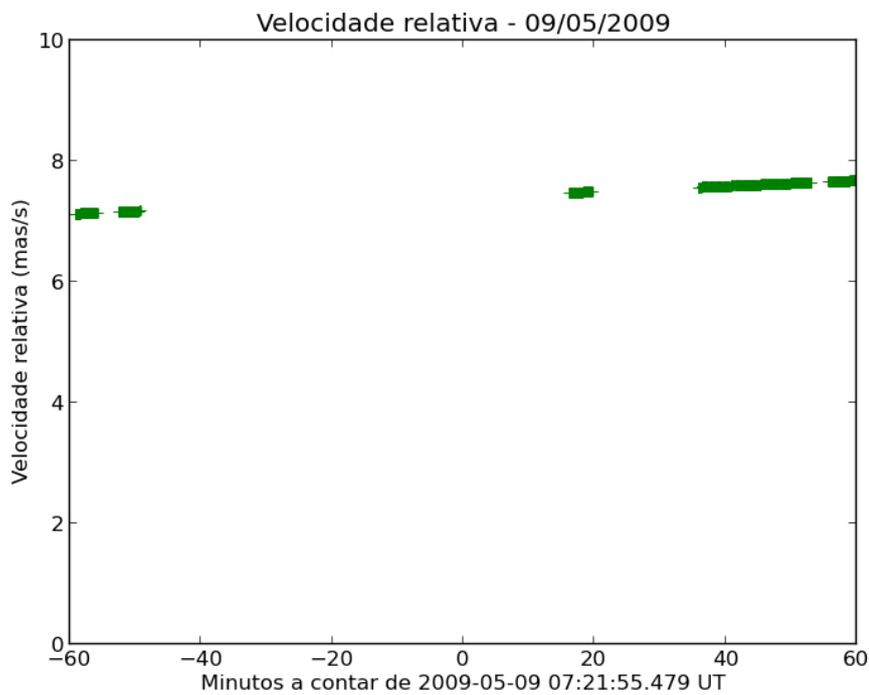
(b) Velocidade

Figura A.36: Aproximação entre Io e Europa em 26 de Abril de 2015.

A.4 Comparações com as ocultações de 2009

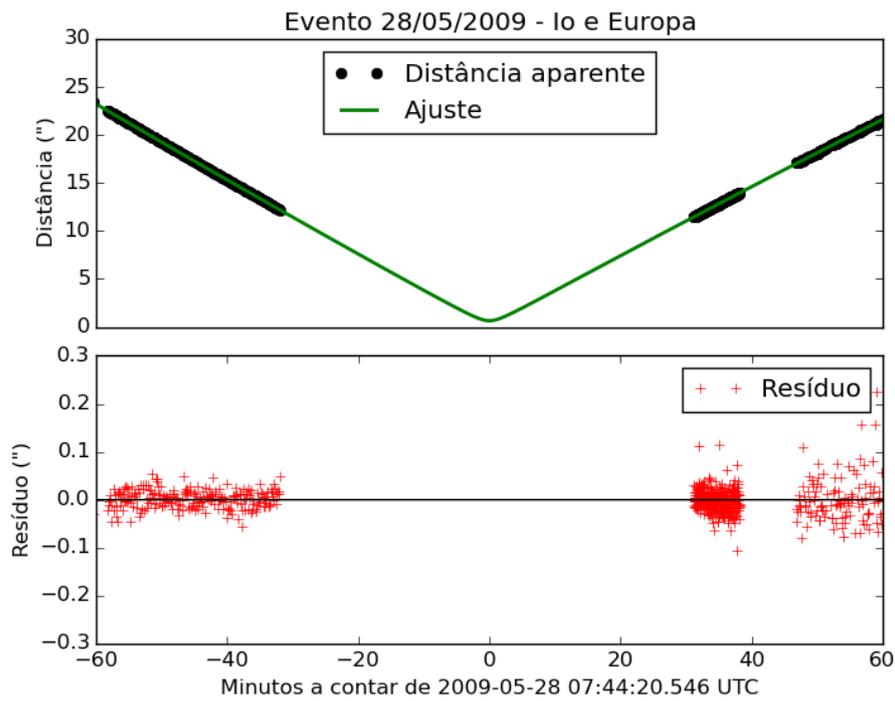


(a) Distância

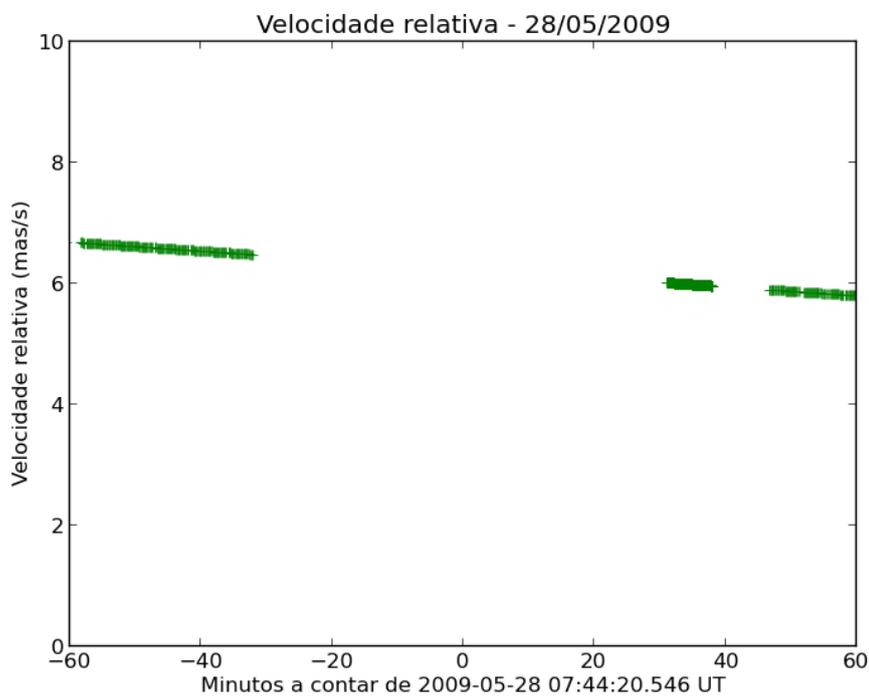


(b) Velocidade

Figura A.37: Aproximação entre Io e Europa em 09 de Maio de 2009.

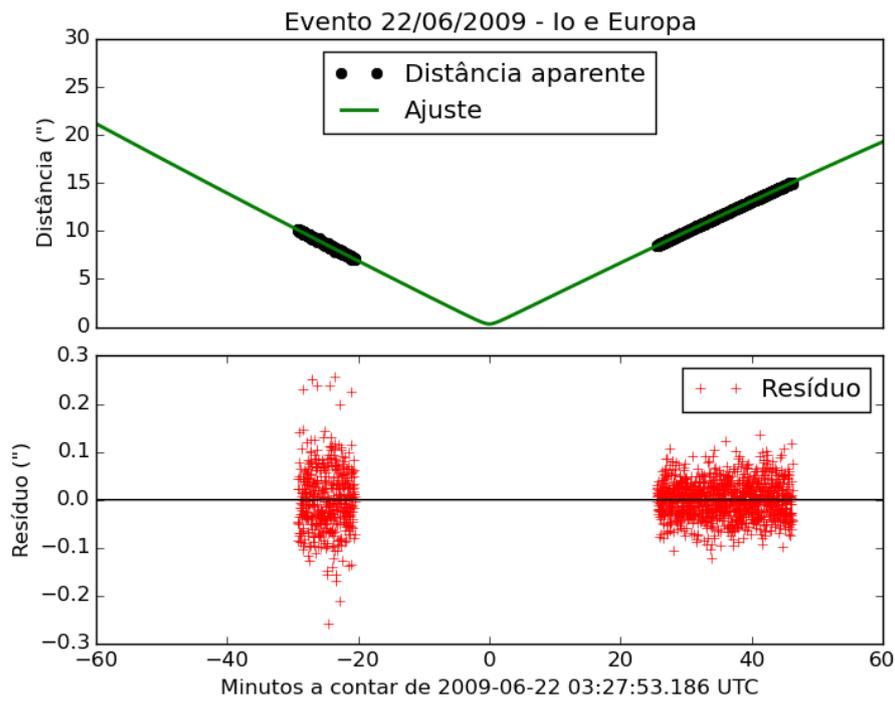


(a) Distância

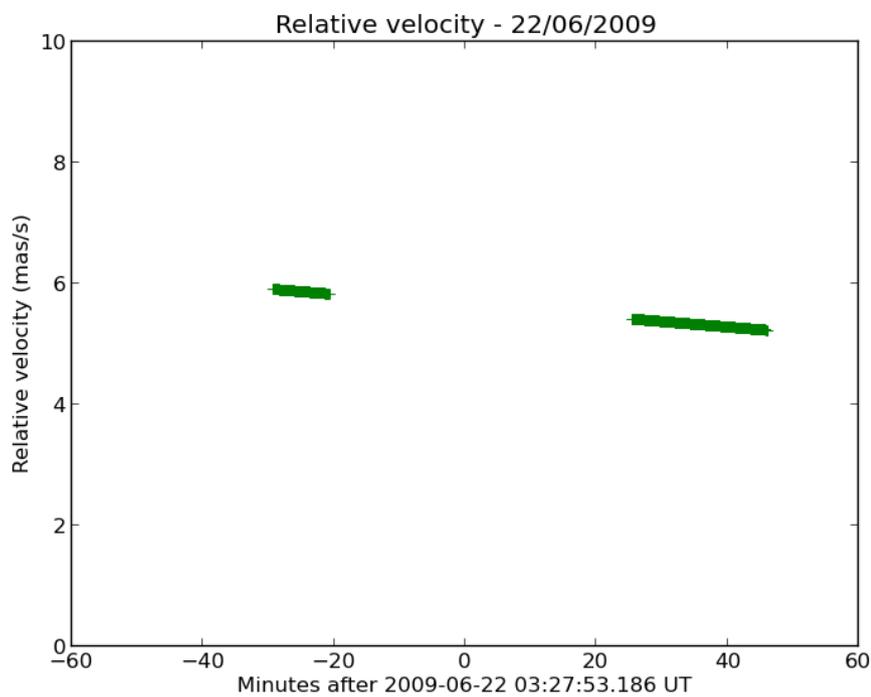


(b) Velocidade

Figura A.38: Aproximação entre Io e Europa em 28 de Maio de 2009.

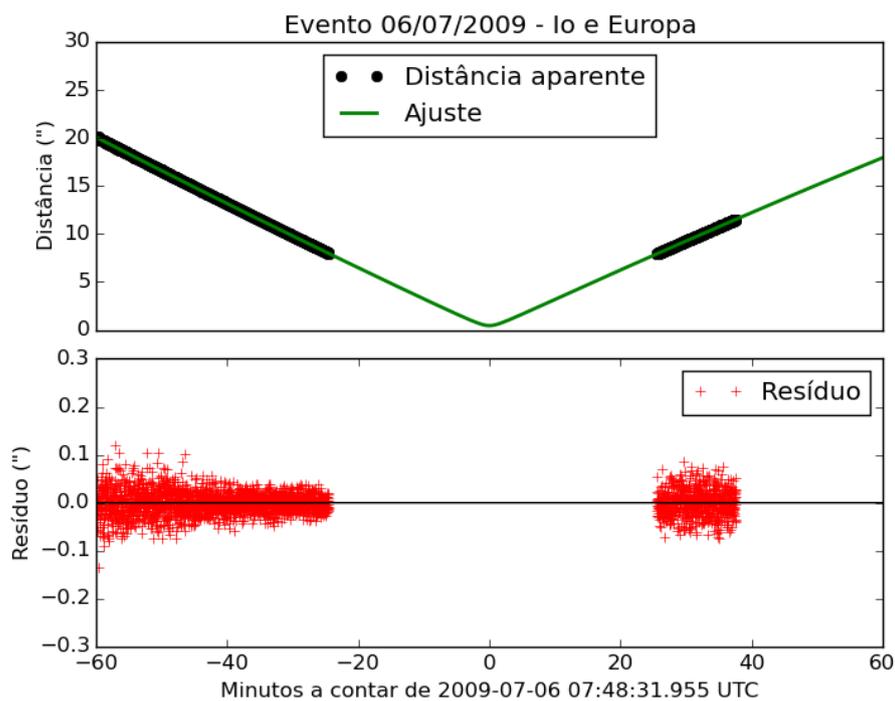


(a) Distância

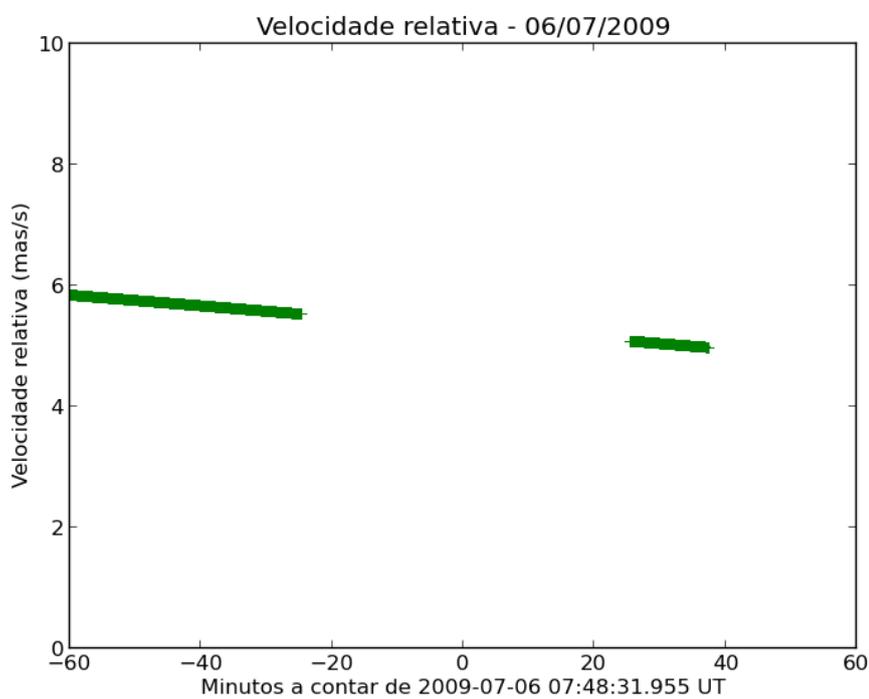


(b) Velocidade

Figura A.39: Aproximação entre Io e Europa em 22 de Junho de 2009.

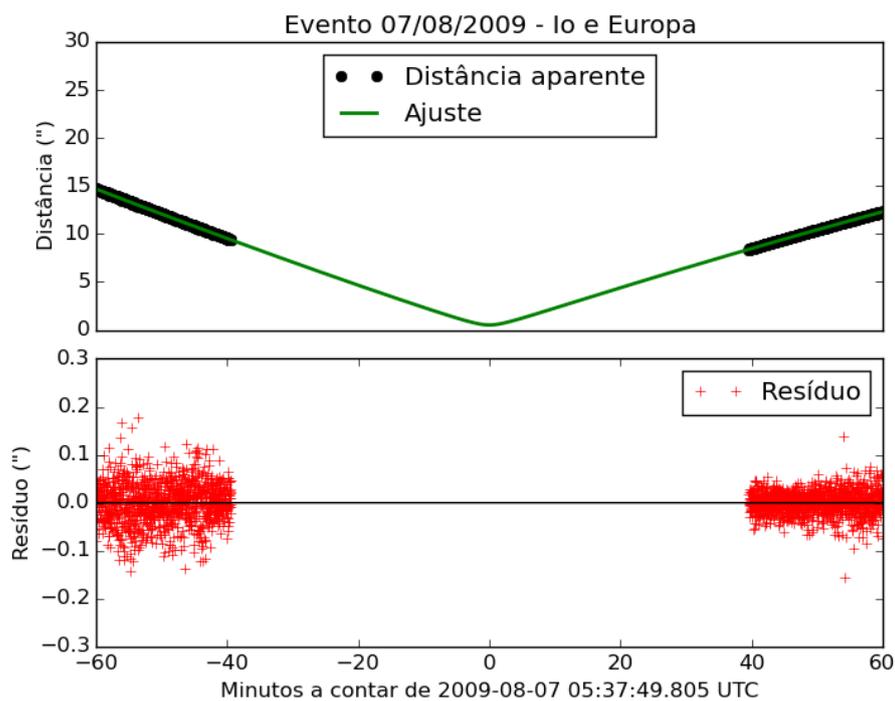


(a) Distância

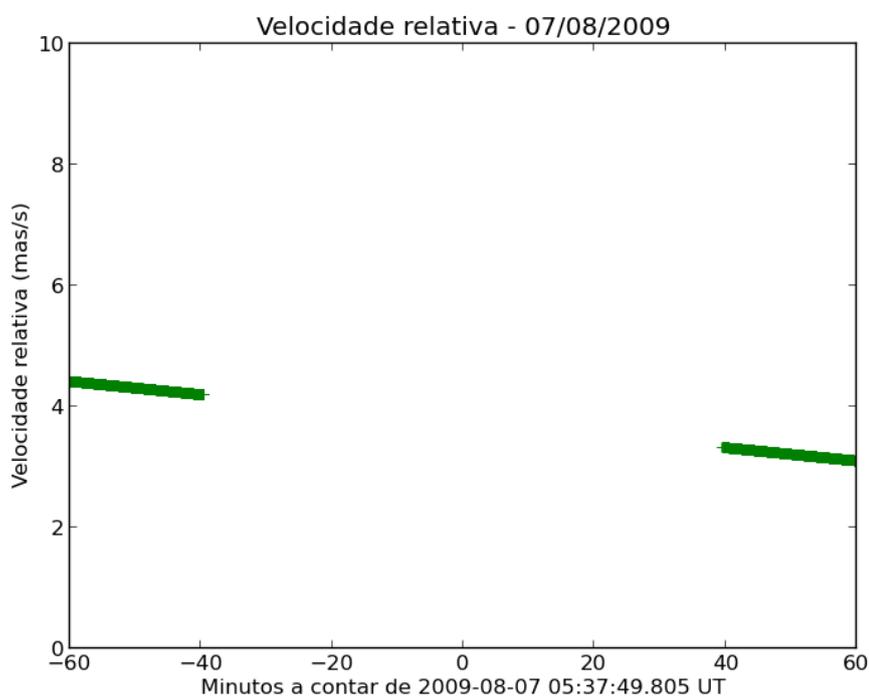


(b) Velocidade

Figura A.40: Aproximação entre Io e Europa em 06 de Julho de 2009.



(a) Distância



(b) Velocidade

Figura A.41: Aproximação entre Io e Europa em 07 de Agosto de 2009.