

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

G249s

Dissertação de Mestrado

Satélites Irregulares de Júpiter: Configurações propícias do processo de captura de asteróides binários

Helton da Silva Gaspar

Prof. Dr. Othon Cabo Winter (Orientador)

Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto (Co-Orientador)

Guaratinguetá

– 2009 –

HELTON DA SILVA GASPAR

SATÉLITES IRREGULARES DE JÚPITER: CONFIGURAÇÕES
PROPÍCIAS DO PROCESSO DE CAPTURA DE ASTERÓIDES BINÁRIOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, da Universidade Estadual Paulista, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física na área de Dinâmica Orbital & Planetologia.

Orientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter
Co-Orientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto

Guaratinguetá
2009

G249s Gaspar, Helton da Silva
Satélites Irregulares de Júpiter: Configurações propícias
do processo de captura de asteróides binários / Helton da Silva
Gaspar – Guaratinguetá: [s.n], 2009
44 f. :il
Bibliografia: f. 37

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2009
Orientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter
Co-Orientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto

1. Satélites 2. Asteróides I. Título

CDU 629.783

HELTON DA SILVA GASPAR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM FÍSICA”

PROGRAMA: FÍSICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo Batista Hott
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. OTHON CABO WINTER
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. TADASHI YOKOYAMA
Unesp-Rio Claro



Prof. Dr. FERNANDO VIRGILIO ROIG
Observatório Nacional - CNPq

Julho de 2009

DADOS CURRICULARES

HELTON DA SILVA GASPAR

NASCIMENTO	20.1.1981 – SÃO PAULO/SP
FILIAÇÃO	Antonio Gaspar Sobrinho Helena da Silva Gaspar
1996 – 2000	Técnico em Eletrônica CEETEPS - E.T.E. Albert Einstein – São Paulo
2003 – 2007	Bacharel em Física UNESP – Guaratinguetá
2008 – 2009	Mestre em Física UNESP – Guaratinguetá

In memoriam de meu grande amigo, e avô, Paulo Gaspar

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais *Antonio Gaspar Sobrinho* e *Helena da Silva Gaspar* pelo apoio eterno e incondicional.

À minha namorada *Ricely de Araujo Ramos* pela paciência e compreensão.

A todos os meus amigos pelos momentos de distração, sem os quais seríamos consumidos pelo trabalho.

Aos meus orientadores *Othon Cabo Winter* e *Ernesto Vieira Neto* pela confiança, compreensão, paciência e trabalho e tempo dedicados.

Apoio Financeiro

Agradeço o apoio do CNPq e da Capes concedido através da bolsa de mestrado, bem como o apoio da FAPESP concedido através do financiamento do projeto temático.

“ ...And you run and you run to catch up with the Sun, but it is sinking and racing around to come up behind you again.

The Sun is the same in a relative way, but you are older, shorter of breath and one day closer to death... ”

(WATERS, R.; GILMOUR, D.; MASON, R.; WRIGHT, R.)

GASPAR, H. S., **Satélites Irregulares de Júpiter: Configurações propícias do processo de captura de asteróides binários**, 2009, 44 f., Dissertação (Mestrado em Física) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

A existência de satélites irregulares é um tema de interesse científico há muito tempo devido às suas características peculiares, isto é, órbitas bem excêntricas, distantes do planeta e geralmente com altas inclinações em relação ao plano equatorial de seu planeta, chegando a ser em grande parte retrógradas. A existência de famílias de satélites irregulares, caracterizadas pela semelhança dos elementos orbitais dos satélites que as compõem é, ainda hoje, um fato não explicado. Tais características sugerem que os satélites irregulares não tenham sido formados juntamente com os planetas que estes orbitam, como se acredita ser o caso dos satélites regulares. Deste modo, uma explicação coerente para a existência dos mesmos é a captura gravitacional de corpos, formados em outras regiões, a partir de órbitas heliocêntricas após a ocorrência de um encontro próximo com o planeta. Entretanto, sob a dinâmica do Problema Circular Restrito de Três Corpos - PCR3C - capturas gravitacionais têm caráter temporário, o que torna necessária a existência de um mecanismo de captura auxiliar. Isto tem incentivado, por anos, à proposição de vários modelos para explicar a existência dos satélites irregulares através da captura gravitacional, dentre os quais três se destacam na literatura: Dissipação por arrasto em gás, Pull-down capture – captura por puxão, interação colisional ou por encontros próximos com satélites pré-existentes, capturas de planetesimais durante encontros planetários e captura de asteróides binários. Considerando a dinâmica de 4-Corpos, investigamos numericamente a viabilidade de um modelo no qual um ente de um asteróide binário é capturado após sofrer um encontro próximo com um Júpiter, avaliando as condições que propiciam a captura de cada um dos membros, realizando um mapeamento dos parâmetros de modo a identificar as configurações mais favoráveis. Dentre os principais resultados, destaca-se uma probabilidade considerável do menor asteróide permanecer capturado quando a ruptura do asteróide binário ocorre em uma configuração propícia de “quadratura” com Sol e Júpiter, resultado que reflete a importância da presença do Sol na dinâmica de captura. Finalmente, verificamos que o mecanismo de captura pode ser explicado através das trocas de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Satélites Irregulares – Asteróides binários – Captura gravitacional – Encontros próximos

GASPAR, H. S., **Jupiter Irregular Satellites: Suitable configurations of binary asteroids capture process**, 2009, 44 f., Dissertation (Master's degree in Physics) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

The existence of irregular satellites has been the focus of scientific interest for many years. That is due to their peculiar orbital features, i.e., highly eccentric orbits, large distance from the planet and, usually, with high inclination and many of them are retrograde. There are very well characterized families of irregular satellites, whose origin were not explained yet. These features suggest that irregular satellites were not formed together with the planet, during its formation stage, as were the regular ones. Therefore, an explanation for their existence is the gravitational capture of asteroids, originally in heliocentric orbits, that had a close encounter with the planet. However, considering only the Restrict Three Body Problem dynamics, it is not possible to accomplish permanent captures, being necessary the existence of an auxiliary mechanism. Then, several models were proposed in order to generate a permanent capture. Among the most important we found Gas drag dissipation, Pull-down capture, collisional and close encounters interactions with regular satellites, capture during planetary encounters and capture of binary asteroids. The current research had assessed how viable is a 4-body mechanism in which a member body of a binary asteroid remain captured after a close encounter with Jupiter. In order to accomplish that, we have mapped a set o parameters in order to find the proper conditions to yield the capture of one member. From the main results it is shown a very well permanent capture probability of the minor member when the primordial binary asteroid disrupts at a suitable “quadrature” configuration. Finally, it is also shown that this capture mechanism is well explained through energy exchanges.

KEYWORDS: Irregular Satellites – Binary Asteroids – Gravitational Capture – Close encounters.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Satélites Naturais	1
1.1.1	Satélites Regulares	2
1.1.2	Satélites Irregulares	2
1.2	Origens dos satélites planetários	5
1.3	Modelos de mecanismos de captura	6
1.3.1	Captura por arrasto em gás	6
1.3.2	Captura por “Puxão”	7
1.3.3	Interação por encontros próximos	7
1.3.4	Captura de asteróides binários	8
1.3.5	Captura durante encontros planetários	8
1.4	Asteróides binários	8
2	Modelo de captura	13
2.1	Método	14
2.1.1	Condições iniciais propícias	14
2.2	Modelo de asteróide binário	19
2.3	Simulações de Captura de asteróides binários	20
3	Resultados do estudo inicial - Caso Planar progrado	22
3.1	Resultados da análise do instante T_1	22
3.2	Resultados da análise do instante T_2	26
3.3	Results at T_3	28
3.4	Capturas de asteróides binários em números	30
4	Resultados do estudo generalizado - Casos inclinados	31
4.1	Resultados da análise do instante T_1	31
4.2	Resultados da análise do instante T_2	32
4.3	Resultados da análise do instante T_3	32
4.4	Configuração final dos asteróides capturados	33
5	Conclusões e considerações finais	35

Lista de Figuras

1	Famílias de satélites irregulares de Júpiter	5
2	Dactyl & Ida - Primeiro Binário	13
3	Trajatória de escape na integração reversa.	15
4	Mapas de tempos de captura	16
5	Histogramas condições iniciais propícias	18
6	Condições iniciais propícias em termos de $(a, e$ e $I)$	19
7	Esboço da grade de condições iniciais do binário	20
8	Diagrama $a \times \Delta a$ no instante T_1 - caso planar	22
9	Exemplo de trajetória de captura	24
10	Diagrama $a \times e$ do instante T_1 - caso planar	25
11	Diagrama $a \times e$ do instante T_2 - caso planar	26
12	Esboço da configuração angular entre os corpos.	27
13	Histogramas angulares - caso planar	28
14	Diagrama $a \times e$ do instante T_3 - caso planar	29
15	Mapas de tempos de captura - casos especiais	30
16	Diagrama $a \times \Delta a$ no instante T_1 - caso inclinado	31
17	Diagrama angular - caso inclinado	32
18	Diagrama $a \times e$ do instante T_3 - caso inclinado	33
19	Diagrama polar no instante T_3 - caso inclinado	34
20	Diagrama $a \times e$ da configuração final - caso inclinado	34
21	Diagrama polar da configuração final - caso inclinado	34
22	Condições iniciais propícias.	41
23	Mapa de tempo de captura para $I = 20^\circ, I = 40^\circ, I = 60^\circ$	42
24	Mapa de tempo de captura para $I = 80^\circ, I = 90^\circ, I = 100^\circ$	43
25	Mapa de tempo de captura para $I = 120^\circ, I = 140^\circ, I = 160^\circ$	44

Lista de Tabelas

1	Número de satélites planetários do Sistema Solar	1
2	Satélites irregulares de Júpiter.	3
3	Binários próximos à Terra (NEA)	10
4	Binários do Cinturão Principal	11
5	Binários Transnetunianos (TNO)	12
6	Números de simulações, capturas e colisões.	30

1 INTRODUÇÃO

Entender as origens do universo é, há muito tempo, uma grande curiosidade humana. A ciência, por sua vez, o faz através de seu método ortodoxo de estudar as partes com o objetivo de entender o todo. As origens do Sistema Solar é uma parte importante deste todo dada a “facilidade” com a qual podemos explorá-lo, uma vez que o habitamos, bem como seu vínculo com nossa existência. O estudo das origens do Sistema Solar, entretanto, é uma tarefa nada simples que, por sua vez, também é realizada por partes. Neste contexto insere-se nosso trabalho, o qual está relacionado com as origens dos satélites irregulares dos planetas gigantes do Sistema Solar.

1.1 SATÉLITES NATURAIS

Ao tentar descrever de modo hierárquico nosso sistema, colocamos o Sol como o corpo central e os planetas, asteróides e cometas, entre outros que o orbitam, como corpos celestes primários. Seguindo esta hierarquia, satélites naturais, também chamados de luas, são corpos celestes que orbitam os corpos primários. Atualmente são conhecidos mais de 350 satélites naturais do Sistema Solar, dentre os quais cerca de 167 são satélites planetários (solarsystem.nasa.gov, 2009). No sistema solar, apenas os planetas Mercúrio e Vênus não possuem satélites. A Tabela(1) apresenta o número de satélites planetários conhecidos atualmente. Os satélites planetários são classificados como Regulares e Irregulares (Kuiper, 1956; Peale, 1999), sendo a primeira classe subdividida em dois tipos: satélites regulares clássicos e destroços colisionais. Estudos de estabilidade ao redor de planetas mostram que satélites têm órbitas estáveis quando confinadas dentro de uma região esférica cujo raio é uma fração do raio de Hill r_H do mesmo. A definição

Tabela 1: Número de satélites planetários do Sistema e solar, e algumas constantes relacionadas. Adaptado de (Murray & Dermott, 1999). As colunas m_P , r_P , a_P , r_H e J_2 são a massa, o raio médio equatorial, o semi-eixo maior, o raio de Hill e coeficiente de achatamento do planeta, respectivamente

Planeta	m_P (kg)	r_P ($\times 10^3$ km)	a_P (UA)	r_H (UA)	J_2	Regulares	Irregulares
Terra	$5,97 \times 10^{24}$	6,38	1,00	$1,00 \times 10^{-2}$	1083	1	0
Marte	$6,42 \times 10^{23}$	3,39	1,52	$7,23 \times 10^{-3}$	1960	2	0
Jupiter	$1,90 \times 10^{27}$	71,40	5,20	$3,55 \times 10^{-1}$	14736	8	55
Saturno	$5,68 \times 10^{26}$	60,33	9,54	$4,36 \times 10^{-1}$	16298	22	39
Urano	$8,68 \times 10^{25}$	26,20	19,19	$4,68 \times 10^{-1}$	3343	18	9
Netuno	$1,02 \times 10^{26}$	25,23	30,07	$7,75 \times 10^{-1}$	3411	6	7

do raio de Hill, como encontrada em (Murray & Dermott, 1999), é dada por:

$$r_H = \left(\frac{m_p}{3M} \right)^{1/3} a_p \quad (1)$$

em que M , a_p , e m_p , são a massa do Sol, o semi-eixo maior e a massa do planeta, respectivamente. Os valores, em unidades astronômicas, do raio de Hill dos planetas do Sistema Solar estão contidos na Tabela (1).

1.1.1 Satélites Regulares

Os satélites regulares conhecidos atualmente estão confinados em uma região de até $0,05r_H$. Suas órbitas são aproximadamente circulares, prógradas e com baixas inclinações (Sheppard, 2006; www.dtm.ciw.edu, 2009). Titã, um dos 22 satélites regulares de Saturno, é o satélite regular com maior excentricidade ($e = 0,029$) do Sistema Solar. O também saturniano Iapetus, é o satélite regular com maior inclinação orbital ($I = 7,570^\circ$). Os regulares clássicos, em geral, são relativamente grandes variando de centenas a milhares de quilômetros, ao passo que destroços colisionais são muito menores e atingem poucas centenas de quilômetros de diâmetro.

1.1.2 Satélites Irregulares

Os satélites irregulares, por sua vez, caracterizam-se por suas órbitas excêntricas, com valores de semi-eixo maiores, superiores a $0,05r_H$, chegando a atingir distâncias de até $0,65r_H$ no apocentro (Sheppard, 2006). Destacam-se também suas altas inclinações. No Sistema Solar, todos os satélites irregulares têm inclinações maiores que ($I = 25^\circ$), sendo única exceção o netuniano Nereide com pouco mais 7° de inclinação. Grande parte dos satélites irregulares atualmente conhecidos é retrógrada, isto é, têm inclinações superiores à 90° . Altas excentricidades também os caracterizam. Com exceção do netuniano Tritão, todos os satélites irregulares do Sistema Solar têm excentricidades maiores que ($e = 0,112$), excentricidade do joviano Lysithea.

Tabela 2: Relação dos satélites irregulares de Júpiter conhecidos atualmente. As linhas separam as famílias de satélites. Extraído de (www.dtm.ciw.edu, 2009). As colunas a , e , I , Ω e ω são semi-eixo maior, excentricidade, inclinação, longitude do nodo ascendente e argumento do pericentro do satélite em relação à Júpiter, respectivamente.

Nome	a ($\times 10^{-1} r_H$)	e ($\times 10^{-1}$)	I (graus)	Ω (graus)	ω (graus)	Raio (km)	Descoberta (ano)
Themisto	1,41	2,42	43,08	201,50	240,70	4,50	2000
Carmo	3,20	4,30	51,40	60,90	90,00	1,50	2003
Leda	2,10	1,64	27,46	217,10	272,30	9,00	1974
Himalia	2,16	1,62	27,50	57,20	332,00	80,00	1904
Lysithea	2,21	1,12	28,30	5,50	49,50	19,00	1938
Elara	2,21	2,17	26,63	109,40	143,60	39,00	1905
S/2000 J11	2,36	2,48	28,30	290,90	178,00	2,00	2000
Euporie	3,63	1,44	145,80	64,90	74,60	1,00	2001
Orthosie	3,90	2,81	145,90	223,60	230,50	1,00	2001
Euanthe	3,92	2,32	148,90	271,00	316,00	1,50	2001
Thyone	3,94	2,29	148,50	243,00	89,10	2,00	2001
Mneme	3,97	2,27	148,60	18,10	41,70	1,00	2003
Harpalyke	3,97	2,26	148,60	40,00	129,90	2,00	2000
Hermippe	3,98	2,10	150,70	347,20	298,70	2,00	2001
Praxidike	3,98	2,30	149,00	285,20	209,70	3,50	2000
Thelxinoe	3,98	2,21	151,40	206,20	179,80	1,00	2003
Iocaste	4,00	2,16	149,40	271,30	80,00	2,50	2000
Ananke	4,01	2,44	148,90	7,60	100,60	14,00	1951
Arche	4,32	2,59	165,00	350,70	161,10	1,50	2002
Pasithee	4,35	2,67	165,10	338,70	253,30	1,00	2001
Chaldene	4,36	2,51	165,20	148,70	282,50	2,00	2000
Kale	4,37	2,60	165,00	56,40	44,40	1,00	2001
Isonoe	4,37	2,46	165,20	149,80	145,60	2,00	2000
Aitne	4,37	2,64	165,10	24,50	122,20	1,50	2001
Erinome	4,38	2,66	164,90	321,70	356,00	1,50	2000
Taygete	4,40	2,52	165,20	313,30	241,10	2,50	2000
Carme	4,41	2,53	164,90	113,70	28,20	23,00	1938
Kalyke	4,44	2,45	165,20	38,70	216,60	2,50	2000
Eukelade	4,45	2,72	165,50	206,30	325,60	2,00	2003

Continua na próxima página...

Tabela 2 – Continuação

Nome	a	e	I	Ω	ω	Raio	Descoberta
Kallichore	4,53	2,64	165,50	41,50	18,50	1,00	2003
Helike	4,00	1,56	154,80	100,30	314,70	2,00	2003
Eurydome	4,30	2,76	150,30	307,40	241,60	1,50	2001
Autonoe	4,34	3,34	152,90	275,60	60,20	2,00	2001
Sponde	4,42	3,12	151,00	129,10	79,10	1,00	2001
Pasiphae	4,45	4,09	151,40	313,00	170,50	29,00	1908
Megaclite	4,48	4,21	152,80	304,60	302,30	3,00	2000
Sinope	4,51	2,50	158,10	303,10	346,40	19,00	1914
Hegemone	4,51	3,28	155,20	327,60	235,40	1,50	2003
Aoede	4,51	4,32	158,30	187,10	74,50	2,00	2003
Callirrhoe	4,54	2,83	147,10	281,10	49,30	3,50	1999
Cyllene	4,58	3,19	149,30	266,40	214,00	1,00	2003
Kore	4,62	3,25	145,00	324,70	152,40	1,00	2003
S/2003J2	5,38	3,80	151,80	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J3	3,45	2,41	143,70	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J4	4,38	2,04	144,90	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J5	4,53	2,10	165,00	0,00	0,00	2,00	2003
S/2003J9	4,22	2,69	164,50	0,00	0,00	0,50	2003
S/2003J10	4,56	2,14	164,10	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J12	3,58	3,76	145,80	0,00	0,00	0,50	2003
S/2003J15	4,14	1,10	140,80	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J16	3,95	2,70	148,60	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J17	4,14	1,90	163,70	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J18	3,90	1,19	146,50	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J19	4,29	3,34	162,90	0,00	0,00	1,00	2003
S/2003J23	4,53	3,09	149,20	0,00	0,00	1,00	2003

Uma característica bastante peculiar destes satélites, ainda não explicada, é a existência de famílias, isto é, grupos de satélites irregulares com órbitas semelhantes. A Tabela (2), relaciona os satélites irregulares de Júpiter, destacando as famílias. A Figura (1) ilustra as famílias de satélites irregulares de Júpiter através de um diagrama polar.

Embora não exista uma definição exata de satélites irregulares, encontramos na literatura um semi-eixo maior crítico, $a_{crit} \approx (2\mu J_2 r_P^2 a_P^3)^{1/5}$ (Goldreich, 1966), em que μ é a razão entre as massas do planeta e do Sol. Classificam-se como irregulares, satélites cujo semi-eixo maior excede ao valor crítico.

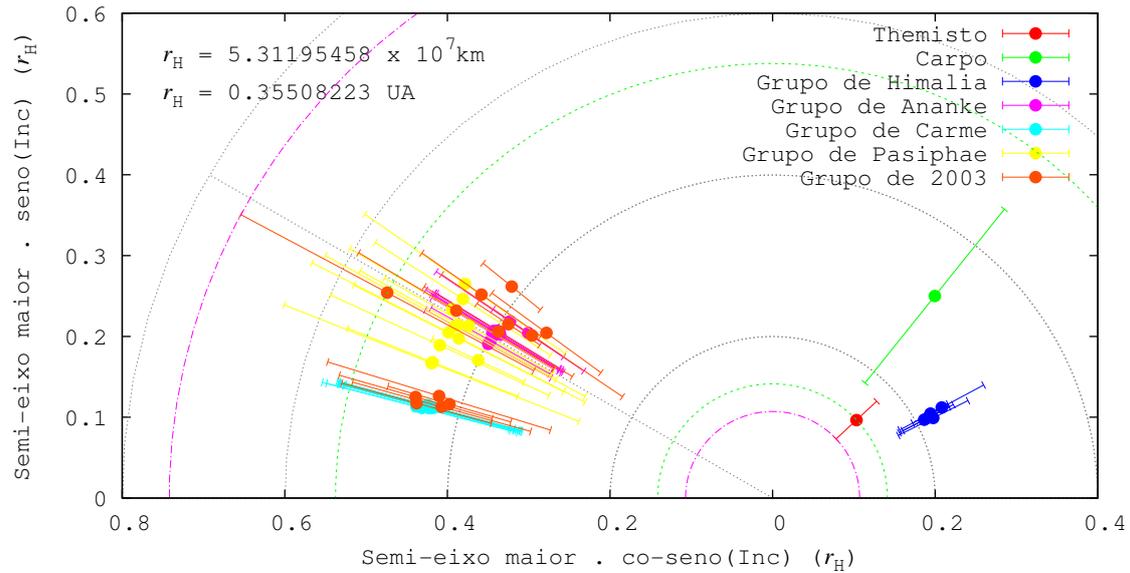


Figura 1: Famílias de satélites irregulares de Júpiter. As extremidades das barras mais próximas e mais afastadas da origem representam o pericentro e o apocentro da órbita, e as inclinações das mesmas representam as inclinações orbitais.

1.2 ORIGENS DOS SATÉLITES PLANETÁRIOS

Características dos satélites regulares, como valores relativamente pequenos de semi-eixo maior e baixas excentricidades e inclinações, são fatores que corroboram com a teoria de formação local, isto é, a hipótese de que os mesmos formaram-se através da acreção de matéria do disco circumplanetário equatorial na mesma época de formação de seus planetas pais (Vieira Neto & Winter, 2001; Sheppard & Jewitt, 2003).

Por outro lado, os satélites irregulares apresentam características exatamente opostas, indicando que os mesmos não se formaram ao redor dos planetas que hoje orbitam, através do processo de acreção de matéria do disco circumplanetário. A hipótese mais coerente é que estes são objetos formados em outras regiões do Sistema Solar, que foram gravitacionalmente capturados a partir de órbitas heliocêntricas (Kuiper, 1956). Estudos apontam que tais capturas ocorreram, muito provavelmente, durante o estágio final de formação dos planetas durante o período de colapso da nuvem de gás do disco circumplanetário (Pollack et al., 1979; Vieira Neto et al., 2004). Modelos atuais de formação planetária, como por exemplo o modelo de Nice (Tsiganis et al., 2005; Morbidelli et al., 2005; Gomes et al., 2005), admitem a hipótese de que ao final do período de formação planetária, capturas temporárias de corpos sofrendo encontros próximos com os planetas eram frequentes. Entretanto, capturas gravitacionais sob a dinâmica do problema restrito de três corpos têm caráter temporário (Everhart, 1973; Heppenheimer & Porco, 1977; Carusi & Valsecchi, 1979; Benner & Mckinnon, 1995; Vieira Neto & Winter, 2001; Winter & Vieira Neto, 2001), fazendo-se necessária a atuação de um mecanismo para tornar permanente uma captura temporária. Este fato, há anos, motiva pesquisadores a estudar modelos auxiliares de captura compatíveis com as observadas características orbitais dos satélites irregulares existen-

tes. Kuiper (1956), inicialmente propôs que tais corpos eram satélites regulares que em algum momento puderam escapar da esfera de Hill devido a uma diminuição de massa do planeta e passaram a orbitar o Sol em uma órbita similar à do mesmo. Isto possibilitaria um encontro posterior entre os mesmos, resultando em uma “recaptura” deste satélite perdido em um tipo de órbita irregular. Atualmente, esta hipótese está descartada devido ao argumento de que nunca houvera uma perda de massa significativa para possibilitar tais escapes dos satélites regulares. Outra hipótese, também já descartada, propunha uma transição de uma captura temporária para uma permanente através da dissipação de energia por efeitos de maré. Entretanto, os efeitos de maré sobre corpos tão pequenos e tão afastados do planeta, como são os satélites irregulares, não são suficientes para dissipar a energia necessária e torná-los permanentemente capturados (Sheppard, 2006).

1.3 MODELOS DE MECANISMOS DE CAPTURA

Dentre os modelos de captura gravitacional atualmente conhecidos, existem cinco mecanismos que explicam de maneira dinamicamente eficaz a origem dos satélites irregulares. Dedicaremos, aqui, uma seção para cada um dos mesmos.

1.3.1 Captura por arrasto em gás

Baseado na idéia de dissipar energia do corpo temporariamente capturado de modo a tornar a captura permanente, isto é, fazer com que a energia do corpo capturado torne-se menor que a energia mínima de escape, é proposto o mecanismo de arrasto em gás. Diminuir a velocidade do corpo é uma forma de dissipar sua energia, e uma maneira de tornar isto possível, é através do arrasto gasoso. Este mecanismo sustenta a hipótese de que o corpo ao ser temporariamente capturado imerge no disco circumplanetário remanescente, composto por gás e poeira, e sofre tal arrasto (Pollack et al., 1979; Čuk & Burns, 2004). Esta força de arrasto, contrária ao movimento, é responsável pela diminuição da velocidade do objeto, e funciona como um filtro:

- Para corpos muito massivos o gás não oferece resistência suficiente para dissipar a energia necessária para torná-lo um satélite, ao passo que;
- A resistência oferecida para corpos pequenos é demasiadamente grande, fazendo com que estes espiralem e sejam conduzidos a uma rápida colisão com o planeta.

Assim, apenas corpos de uma determinada faixa de tamanho/massa sofrem a dissipação ideal para se tornarem permanentemente capturados (Pollack et al., 1979). Este mecanismo restringe o período de ocorrência de tais capturas ao período final de formação do planeta, durante o colapso do disco circumplanetário gasoso. Isto porque que as mesmas deveriam ocorrer em

poucos milhares de anos após a captura para que o então satélite não entrasse em uma órbita espiralada, o que lhe conduziria a uma colisão com o planeta.

1.3.2 Captura por “Puxão”

Um segundo mecanismo, conhecido por “*Pull-Down capture*” – captura por “Puxão” – (Heppenheimer & Porco, 1977) baseia-se na idéia de que um corpo temporariamente capturado poder tornar-se um satélite devido ao aumento do raio de Hill do planeta. Este aumento na extensão da esfera de Hill torna a região de estabilidade maior, de modo a abranger a região onde se encontram os corpos temporariamente capturados. Um aumento do raio de Hill pode ocorrer devido a um aumento da massa do planeta, diminuição da massa Solar e/ou migração planetária para distâncias mais afastadas do Sol (Brunini, 1995). Pollack et al. (1996), argumentaram que a viabilidade deste mecanismo dependeria de uma variação de massa de aproximadamente 40%, entretanto, estudos mais recentes, como por exemplo (Vieira Neto et al., 2004, 2006), mostram que uma variação da ordem de 10% torna tal mecanismo viável. Por outro lado, a hipótese do um aumento do raio de Hill ser devido à migração planetária para distâncias mais afastada do Sol é pouco provável dado que tal migração deveria ser grande e ocorrer em um pequeno intervalo de tempo, processo que acarretaria em uma desestabilização dos satélites existentes (Beaugé et al., 2002).

1.3.3 Interação por encontros próximos

Outro mecanismo, estudado por Colombo & Franklin (1971); Tsui (2000); Astakhov et al. (2003); Funato et al. (2004), trata, não exatamente de dissipação de energia, mas sim de interações de trocas. O modelo propõe que os elementos orbitais de um corpo temporariamente capturado podem ser alterados devido a interações com corpos existentes no interior da esfera de Hill do planeta. Deste modo, devido a trocas de energia e momento, este se torna permanentemente capturado. Tais interações podem ocorrer devido a encontros entre asteróides temporariamente capturados ou entre um asteróide temporariamente capturado e satélites do planeta já existentes. Este modelo considera a dinâmica de quatro corpos, em que o Sol e o planeta são corpos primários, e o asteróide capturado bem como o satélite já existente do planeta, são partículas de massa negligenciável em relação aos primários. Dada a base na dinâmica de quatro corpos, o modelo agrega a vantagem de não ser necessário supor migrações planetárias, variações de massa, ou a presença de discos de gás, o que torna o viável em qualquer período da formação do Sistema Solar.

1.3.4 Captura de asteróides binários

Desde 2006, quando Agnor & Hamilton apresentaram um novo modelo de captura, em particular para o netuniano Tritão (Agnor & Hamilton, 2006), o mecanismo de captura a partir de asteróides binários tem sido bastante estudado (Vokrouhlický et al., 2008, e.g.). Este modelo é baseado na dinâmica do problema de três corpos considerando, entretanto, um único corpo primário (o planeta), e duas partículas de massas negligenciáveis em relação ao primeiro. Ele propõe um mecanismo de captura no qual um asteróide binário sofre um encontro próximo com o planeta, e se rompe devido a forças de maré que atuam sobre o par durante a passagem. Na ruptura, um dos membros sofre uma variação de velocidade negativa de modo que, ao final do processo, sua velocidade em relação ao planeta é menor que a velocidade de escape o que o mantém capturado. Outra forma de visualizar este processo, consiste em perceber que o membro capturado sofre uma troca de par, isto é, como se este formasse com o planeta um novo par binário. Neste modelo, o asteróide binário aproxima-se do planeta através de uma trajetória hiperbólica sem perturbação solar. A ausência de perturbação solar favorece a captura dos corpos uma vez que qualquer órbita com velocidade de pericentro inferior à velocidade de escape permanecerá fechada. Este fator, entretanto, torna o modelo pouco robusto, apesar de dinamicamente eficaz.

1.3.5 Captura durante encontros planetários

Nesvorný et al. (2007), em seu trabalho, apresentam um modelo de captura bem diferente dos modelos, até então, conhecidos. Este mecanismo de captura considera o cenário de migração planetária do modelo de Nice (Tsiganis et al., 2005; Morbidelli et al., 2005; Gomes et al., 2005), o qual postula que os planetas se formaram em um sistema compacto (entre 5 e 18 UA), e alcançaram a configuração atualmente conhecida através de migrações em um disco de planetesimais. Sob este cenário de migrações planetárias devido à interações com um disco de planetesimais, o autor mostra que planetesimais do mesmo são capturados no instante em que dois planetas sofrem um encontro próximo. O mecanismo de captura explica, satisfatoriamente, a origem dos satélites irregulares de Saturno, Urano e Netuno. Contudo, como o próprio autor argumenta, no modelo de Nice típico, Júpiter não sofre encontros próximos com outros planetas, o que torna necessária a existência de outro mecanismo para explicar a origens dos satélites irregulares do mesmo.

1.4 ASTERÓIDES BINÁRIOS

O termo “asteróide binário” basicamente refere-se a um sistema no qual um par de asteróides orbita seu baricentro comum, ou ainda um asteróide que possui um pequeno satélite. No pri-

meiro caso, em que as massas são equivalentes utilizam-se também os termos asteróides duplos e asteróides dubletos (Noll, 2006). Dois séculos de história de busca por eventuais por asteróides binários estão atualmente resumidos em dois trabalhos principais (Merline et al., 2002; Richardson & Walsh, 2006). Estas buscas começaram imediatamente após a descoberta de (1) Ceres em 1801, a primeira evidência de existência de asteróides binários. Durante aproximadamente dois séculos, observadores procuraram sem sucesso por asteróides binários até que em 1993, através da sonda Galileu, foi possível detectar um satélite de (243)Ida batizado de Dactyl (Belton & Carlson, 1994). A Figura (2.a) mostra a primeira imagem de um asteróide binário, trata-se de (243) Ida/Dactyl obtida pela sonda Galileu. A Figura (2.b) mostra uma concepção artística⁵ do asteróide dubleto (90) Antiope (www.eso.org, www.eso.org). A Figura (2) destaca a diferença entre um asteróide dubleto e um asteróide com um satélite. Os asteróides binários atualmente conhecidos do Sistema Solar são encontrados nas três principais populações de corpos menores:

- Cinturão principal de asteróides: Asteróides cujas órbitas são externas à órbita de Marte e Internas à órbita de Júpiter;
- NEA “Near Earth Asteroids” - Asteróides próximos à Terra: Asteróides que orbitam as regiões próximas à órbita terrestre;
- TNO “Trans-Neptunian Objects” - Objetos Trans-Netunianos: Objetos cujas órbitas são mais distantes do Sol que a órbita de netuno;

As Tabelas (3), (4) e (5) relacionam os asteróides binários conhecidos atualmente que se encontram entre os NEA’s, no Cinturão Principal de asteróides e entre os TNO’s, respectivamente.

Tabela 3: Asteróides binários próximos à Terra (NEA). FONTE: (Noll, 2006). Nas colunas, a_B , r_{P1} e r_{P2} são semi-eixo maior do binário e os raios médios dos asteróides primário e secundário, respectivamente.

Nome	a_B (km)	a_B/r_{P1}	r_{P2}/r_{P1}	Período (horas)
2000 DP ₁₀₇	2,6	6,5	0,41	42,2
2000 UG ₁₁	0,3	2,6	0,36	18,4
(66391) 1999 KW ₄			0,3 – 0,4	17,44
1998 ST ₂₇	<7	<9	0,15	
2002 BM ₂₆			0,2	<72
2002 KK ₈			0,2	
(5381) Sekhmet	1,54	3,1	0,3	12,5
2003 SS ₈₄			0,5	24
(69230)Hermes	0,6	2,5 – 4	0,9	13,894
1990 OS	>0,6	>4	0,15	18 – 24
2003 YT ₁	2,7	5	0,29	30
2002 CE ₂₆	5	3	0,05	16
1994 AW ₁			0,49	22,33
(35107) 1991 VH	6,5	5,4	0,37	32,66
(3671) Dionysus		4,5	0,20	27,74
1996 FG ₃		3,2	0,29	16,135
(5407) 1992 AX			0,2	13,520
(31345) 1998 PG			0,3	14,005
(88710) 2001 SL ₉			0,28	16,40
1999 HF ₁		4,0	0,22	14,02
(66063) 1998 RO ₁			0,48	14,54
(65803) Didymos	1,1	2,9	0,22	11,91
(85938) 1999 DJ ₄	0,7	3	0,5	17,73
2005 AB			≥0,24	17,9

Tabela 4: Asteróides binários próximos no Cinturão Principal. FONTE: (Noll, 2006). Nas colunas, a_B , r_{P1} e r_{P2} são semi-eixo maior do binário e os raios médios dos asteróides primário e secundário, respectivamente.

Nome	a_B (km)	a_B/r_{P1}	r_{P2}/r_{P1}	Período (horas)
(243) Ida	108	7,0	0,045	1,54
(45) Eugenia	1196	11,1	0,06	4,7244
(90) Antiope	170	3,1	0,99	0,68862
(762) Pulcova	810	11,6	0,14	4,0
(87) Sylvia	1356	17,6	0,12	3,6496
(107) Camilla	1235	11	0,040	3,710
(22) Kalliope	1065	11,8	0,22	3,590
(3749) Balam	310	52	0,22	110
(121) Hermione	768	7,4	0,06	2,582
(1509) Escalona			0,33	
(283) Huenna	596	8	0,08	3,360
(130) Elektra	1252	13,5	0,02	3,92
(22899) 1999 TO ₁₄			0,3	
(17246) 2000 GL ₇₄			0,4	
(4674) Pauling			0,3	
(3782) Celle			0,42	1,5238
(1089) Tama			0,7	0,6852
(1313) Berna				1,061
(4492) Debussy				1,108
(854) Frostia			0,4	1,565
(5905) Johnson			0,40	0,907708
(76818) 2000 RG ₇₉			0,37	0,5885
(3982) Kastel				
(809) Lúndia			1	0,64
(9069) Hovland			0,3	
(617) Patroclus	685	11	0,92	2,391 ou 4,287

Tabela 5: Asteróides binários Trans-netunianos (TNO). FONTE: (Noll, 2006). Nas colunas, a_B , e_B , r_{P1} , r_{P2} são semi-eixo maior e excentricidade do binário, e os raios médios dos asteróides primário e secundário, respectivamente.

Nome	a_B (km)	a_B/r_{P1}	r_{P2}/r_{P1}	e_B	Período (horas)
(88611) 2001 QT ₂₉₇	27,300	410	0,72	0,240	825
1998 WW ₃₁	22,300	300	0,83	0,82	574
(58534) 1997 CQ ₂₉	8,010	200	0,91	0,45	312
(66652) 1999 RZ ₂₅₃	4,660	56	1,0	0,460	46,263
2001 QW ₃₂₂			1,0		
2000 CF ₁₀₅			0,73		
2000 CQ ₁₁₄			0,81		
2003 UN ₂₈₄			0,76		
2003 QY ₉₀			0,95		
2005 EO ₃₀₄			0,58		
(80806) 2000 CM ₁₀₅			0,5		
2000 OJ ₆₇			0,69		
(79360) 1997 CS ₂₉			0,95		
1999 OJ ₄			0,54		
2003 EL ₆₁	49,500		0,22	0,050	49,12
2001 QC ₂₉₈	3,690		0,79		19,2
(82075) 2000 YW ₁₃₄			0,55		
(48639) 1995 TL ₈			0,46		
2003 UB ₃₁₃			0,13		
PLUTÃO/CARONTE	19,636	16,7	0,53	0,0076	6,38722
(26308) 1998 SM ₁₆₅	11,310		0,42		130
(47171) 1999 TC ₃₆	7,640		0,39		50,4

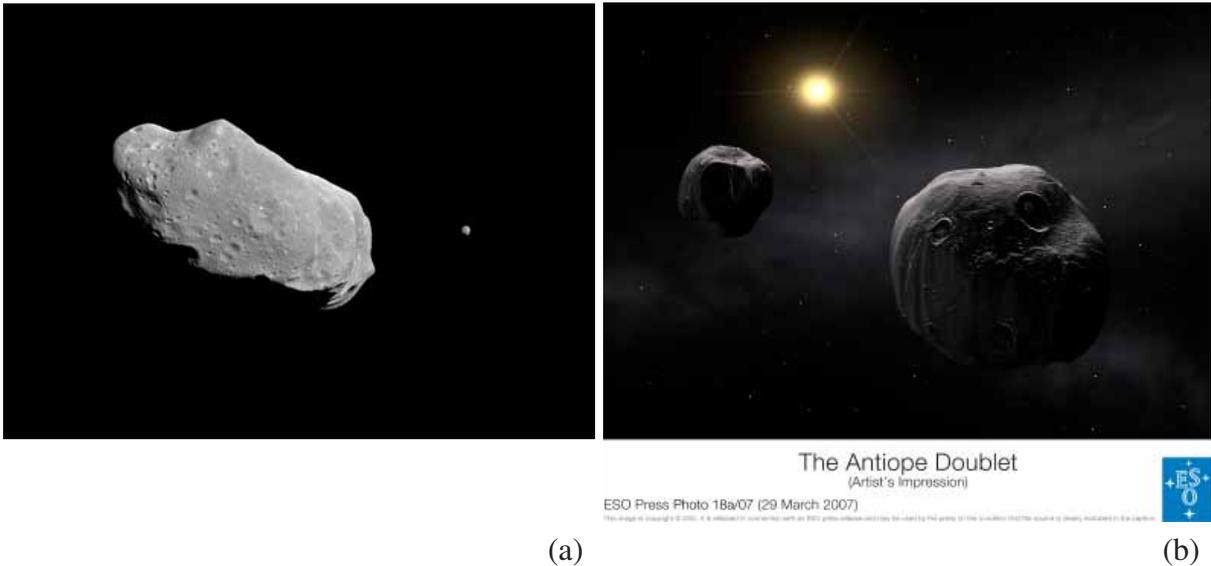


Figura 2: Em (a), (243)Ida e seu satélite Dactyl, imagem do primeiro asteróide binário descoberto no Sistema Solar obtida pela sonda Galileu em 1994. FONTE: (NASA/JPL). Em (b), Concepção artística do asteróide dubleto (90) Antiope. Credits: Copyright European Southern Observatory.

2 MODELO DE CAPTURA

Dada a característica temporária da captura gravitacional sob a dinâmica do problema de Três Corpos, optamos por realizar nosso estudo sob a dinâmica do problema de Quatro Corpos, considerando Sol e Júpiter, como corpos primários, e um par de asteróides, com massas menores porém não negligenciáveis, constituindo um asteróide binário. Este estudo propõe, basicamente, um modelo de captura no qual um asteróide binário torna-se temporariamente capturado por Júpiter, em um primeiro momento, se rompe, em um segundo momento, e tem um de seus membros permanentemente capturado por Júpiter ao final do processo, enquanto o outro membro escapa das vizinhanças de Júpiter. Para estudar este modelo, concentramo-nos primeiramente na obtenção de condições iniciais apropriadas que resultassem em capturas temporárias do asteróide binário por Júpiter. Capturas temporárias, bem como encontros próximos com o planeta, são características intrínsecas das teorias de formação planetárias (Pollack et al., 1996; Tsiganis et al., 2005; Morbidelli et al., 2005; Gomes et al., 2005). Estudar um modelo de captura de asteróides binários considerando a captura temporária inicial dos mesmos, agrega a vantagem do tempo de interação entre o binário e o planeta ser maior comparado ao curto tempo proporcionado por uma simples passagem em um encontro próximo. Na seção seguinte, 2.1, descrevemos em detalhes o método adotado. Em contrapartida, focamos este estudo na análise do processo de captura a fim de compreender que fatores inerentes ao mesmo caracterizam condições propícias para que um asteróide, membro de um asteróide binário primordial, se torne um possível satélite planetário. Este enfoque acarreta a desvantagem de não ser possível estimar a probabilidade real dos satélites irregulares serem provenientes da captura de asteróides

binários.

2.1 MÉTODO

O método adotado neste estudo pode, basicamente, ser descrito em três passos: i) Primeiramente, realizamos um estudo de tempos de captura no sistema Sol-Júpiter-asteróide, através do qual obtivemos as, de agora em diante chamadas, *condições iniciais propícias*. Estas, são condições iniciais do problema de Três Corpos que resultam em capturas temporárias de um asteróide por Júpiter. ii) Uma vez obtidas as condições propícias, adicionamos outro asteróide ao problema, orbitando o primeiro, de modo a produzir um asteróide binário. Estas novas condições iniciais, as quais chamaremos simplesmente de *condições iniciais*, são condições iniciais, do problema de Quatro Corpos, utilizadas para realizar o estudo de capturas de asteróides binários. Finalmente, iii) realizamos o estudo de capturas de asteróides binários, sob a dinâmica do problema de Quatro Corpos, considerando o sistema Sol-Júpiter-asteróide binário adotando diferentes condições iniciais do asteróide binário derivadas de cada condição inicial propícia.

2.1.1 Condições iniciais propícias

A obtenção das condições iniciais propícias resultou de um estudo de tempos de captura que realizamos seguindo o método descrito por Vieira Neto & Winter (2001). O método consiste, basicamente, em integrar a trajetória de um asteróide, reversamente no tempo, sob a dinâmica do problema de três corpos considerando Sol e Júpiter como corpos primários. O sistema é configurado de maneira que o asteróide esteja, inicialmente, orbitando as vizinhanças de Júpiter. O tempos, inicial e final, de integração são ajustados para 0 e -10^3 anos, respectivamente, de modo a resultar na integração reversa do sistema. Esta integração resulta em três possíveis resultados: i) O asteróide colide com Júpiter. ii) O asteróide permanece orbitando Júpiter até o final da integração (-10^3 anos), o que caracteriza uma condição inicial estável, i.e., a condição inicial primárias resulta em uma órbita estável. iii) O asteróide escapa das vizinhanças de Júpiter e passa a orbitar o Sol.

Considerando que o estudo é realizado com integração reversa no tempo, as condições iniciais que resultam em (iii) nos são de interesse particular para obtenção das condições iniciais propícias. Isto é, dada a reversibilidade das leis de Newton, trajetórias de escape em integrações reversas no tempo, são trajetórias de captura quando consideradas na ordem temporal normal. A rigor, dada a imprecisão numérica do integrador, bem como comportamento caótico das simulações, as órbitas não são exatamente reversíveis, i.e., as trajetórias, resultantes das integrações diretas e indiretas no tempo, não são idênticas. Contudo, é bastante razoável esperar que a trajetórias resultantes de integrações diretas no tempo, de órbitas do tipo (iii), sejam, ao menos, trajetórias de encontros próximos do asteróide com Júpiter. Deste modo, tomamos, então, a con-

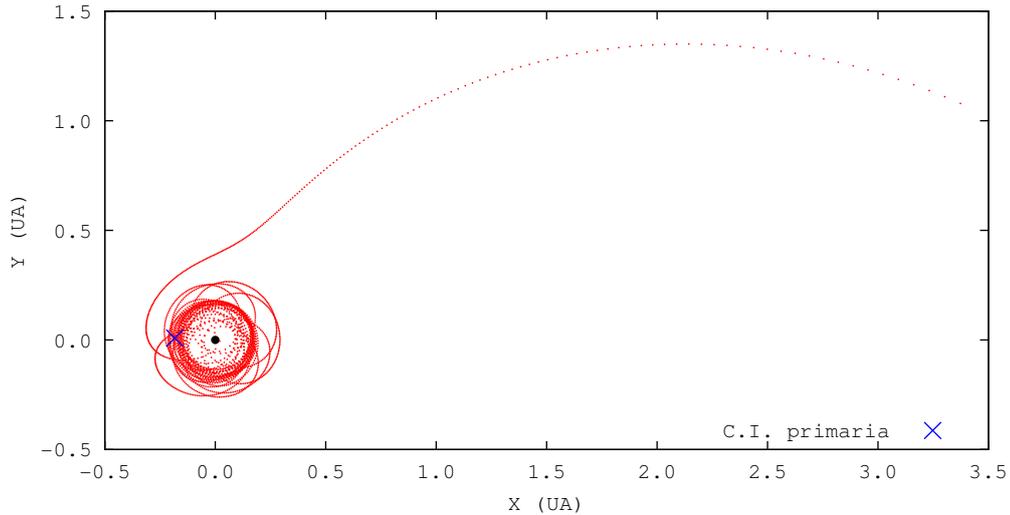


Figura 3: Exemplo de uma trajetória de escape na integração reversa. A trajetória tem sentido horário e Júpiter está localizado na origem. O ponto inicial, indicado pelo 'x' azul corresponde à condição inicial primária (ao redor de Júpiter). O ponto final, denotado por '+' laranja, corresponde à condição inicial propícia.

figuração do sistema após o escape¹ como sendo as condições iniciais propícias já mencionadas. Na prática, adotamos os elementos orbitais de Júpiter e do asteroide em relação ao Sol, determinados após o escape, como condições iniciais propícias. A Figura (3) ilustra o mencionado em termos da configuração espacial. A fim de facilitar a compreensão do texto, denominaremos as condições iniciais, tomadas nas vizinhanças de Júpiter, cujas integrações resultam em escape por *condições iniciais primárias*. Resumindo:

- Condições iniciais primárias: Condições iniciais do problema de três corpos que são integradas reversamente no tempo para obtenção das *condições iniciais propícias*;
- Condições iniciais propícias: Condições iniciais do problema de três corpos que resultam em uma captura temporária do asteroide por Júpiter. Adicionando ao um segundo asteroide em órbita do primeiro, de modo a caracterizar um asteroide binário obtemos as *condições iniciais*;
- Condições iniciais: Condições iniciais do problema de Quatro Corpos, considerando Sol, Júpiter e o asteroide binário, utilizadas para realizar o estudo de captura de asteroides binários;

O resultado completo do estudo de tempos de captura (método dado em (Vieira Neto & Winter, 2001)) é apresentado na forma de um mapa, como ilustra a Figura (4.a). Este mapa consiste na relação das condições iniciais de uma trajetória, dadas em função dos elementos orbitais

¹A configuração do sistema é tomada em um instante de tempo, posterior ao escape, menor que um ano. Isto é dado por considerarmos o escape do asteroide quando a energia, do problema de dois corpos, da mesma em relação à Júpiter se torna positiva, e esta energia, por sua vez, ser calculada em intervalos de integração de um ano.

variáveis (a e e), com o tempo de captura resultante da integração da mesma. Os elementos orbitais restantes (I, Ω, ϖ e f) são sempre tomados como constantes, bem como os elementos orbitais Júpiter em relação ao Sol. No caso particular da Figura (4.a), estudo do caso plano prógrado, os elementos orbitais constantes foram inicialmente tomados iguais à zero, ao passo que os elementos variáveis foram configurados ajustados para gerar uma grade ($a \times e$) com $0,1 r_H \leq a \leq 1,0 r_H$, de largura $\Delta a = 0,005 r_H$ e $0 \leq e \leq 1,0$, de largura $\Delta e = 0,005$. A região amarela do diagrama é uma região de estabilidade, isto é, região das condições iniciais cujas integrações resultaram na permanência do asteroide capturado por Júpiter durante todo o tempo de integração. O trabalho de Domingos et al. (2006), apresenta uma expressão que delimita esta região de estabilidade para o caso plano. Esta expressão, denominada pelos autores por valor crítico de semi-eixo maior, é dada por:

$$a_E \approx 0,4895(1,0000 - 1,0305e_P - 0,2738e_{\text{sat}}); \quad e_{\text{sat}} \leq 0,5 \quad (2)$$

em que e_P e e_{sat} são as excentricidades do planeta e do satélite, respectivamente. Em nosso estudo tomamos $e_P = 0$. Para obter esta expressão, os autores seguiram o mesmo procedimento dado por Vieira Neto & Winter (2001), e também ajustaram os elementos orbitais iniciais constantes para zero.

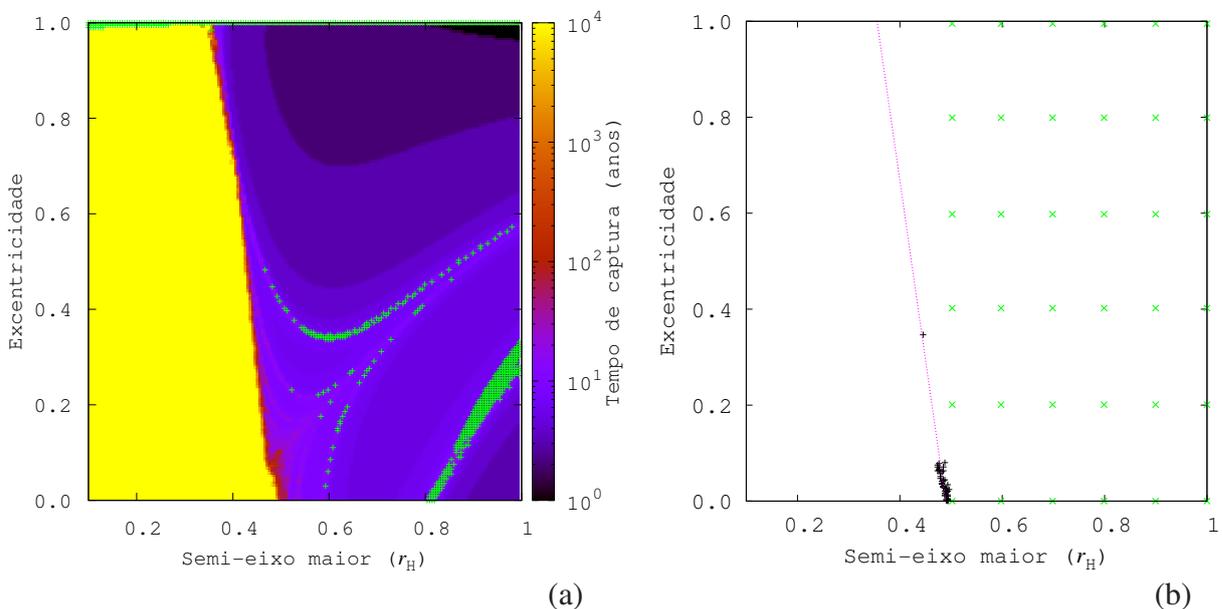


Figura 4: (a) Mapa de tempos de captura. A escala de cores relaciona as condições iniciais dada pelos elementos orbitais variáveis, a e e , ao tempo de captura resultante da integração da trajetória. Para gerar este mapa, todos os elementos orbitais constantes, (I, Ω, ϖ, f), foram ajustados para zero. Os pontos denotados por '+' são condições iniciais que resultam em colisões. A região amarela, indica as condições iniciais de estabilidade. As regiões não amarelas, indicam as condições iniciais que resultam em escape. (b) Diagrama das condições iniciais primárias utilizadas para obter as condições iniciais propícias. Os pontos denotados por 'x' verde e '+' preto, são casos cujos tempos de capturas são menores e maiores que 10^3 anos, respectivamente.

Concluindo a análise do mapa da Figura (4.a), as regiões não amarelas relacionam as condições iniciais primárias que resultam no escape do asteroide. Destas regiões são tomadas as condições iniciais primárias, as quais integradas reversamente no tempo permitem a obtenção das condições propícias. Dada grande quantidade de trajetórias simuladas na realização deste estudo, é inviável tomar todas as trajetórias de escape como condições iniciais propícias. Contudo, notamos que o número de trajetórias de escape com tempo de captura superior à 10^3 era perfeitamente factível de ser estudado. Para o caso planar progrado², estudo inicial, constatamos 45 casos com tempo de captura superior à 10^3 anos. Estas, entretanto, são originadas de condições iniciais primárias situadas em uma região bem específica do mapa $a \times e$, isto é, a borda da região de estabilidade, como ilustram os pontos denotados com ‘+’ preto na Figura (4.b). Deste modo, a fim de obter um conjunto de condições iniciais propícias mais representativo, selecionamos outras 36 condições iniciais primárias, de modo a abranger a região $a \times e$ de tempos curtos com pontos igualmente espaçados, como denotam os ‘x’ verdes na Figura (4.b). A reta pontilhada lilás na Figura (4.b) representa o semi-eixo maior crítico dado por Domingos et al. (2006), como mostra a equação Equação (2).

Generalizando o estudo, aplicamos o mesmo procedimento aos casos não planares, i.e., casos cuja órbita do asteroide não é coplanar à órbita de Júpiter. A análise revelou que o número de trajetórias de escape com tempos longos³ de captura variam amplamente com a inclinação como mostra o gráfico da Figura (5), resultado que está de acordo com (Vieira Neto & Winter, 2001). Visando realizar o estudo dos casos inclinados de maneira compatível ao estudo inicial do caso planar progrado, selecionamos, uniformemente, 50 condições iniciais primárias oriundas de trajetórias tempos longos. Excepcionalmente para os casos com inclinação $I = 90^\circ$ e $I = 100^\circ$, utilizamos todos os casos oriundos de trajetórias de tempos longos dado que os mesmos eram inferiores a 50. As condições primárias relativas às trajetórias de tempos curtos⁴ foram, da mesma maneira, selecionadas tomando pontos igualmente espaçados. O histograma da Figura (5) indica o número de condições primárias selecionadas para as respectivas inclinações. Neste texto, apresentaremos os resultados dos estudos feitos para as inclinações $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 140^\circ$ e 160° . O Apêndice A contém os mapas de tempo de captura, bem como os diagramas com as condições iniciais primárias para os casos das inclinações citadas. O gráfico da Figura (6) mostra as condições iniciais propícias, em termos dos elementos orbitais a, e e I , do asteroide em relação à Júpiter. No mesmo, também estão plotadas as curvas do pericentro e apocentro da partícula, as quais indicam que as capturas do asteroide por Júpiter ocorrem, preferencialmente, quando o este se aproxima do planeta, através do ponto lagrangiano L_1 , pelo apocentro de sua órbita ou, através do ponto lagrangiano L_2 , pelo pericentro de sua órbita. No Apêndice A, o gráfico da Figura (22) mostra as condições propícias em termos dos elementos orbitais, a, Ω, ϖ e i .

²Casos cujas órbitas dos asteroides são coplanares à órbita de Júpiter.

³Tempo de captura superior, ou igual, à 10^3 anos.

⁴Tempos de captura inferior à 10^3 anos.

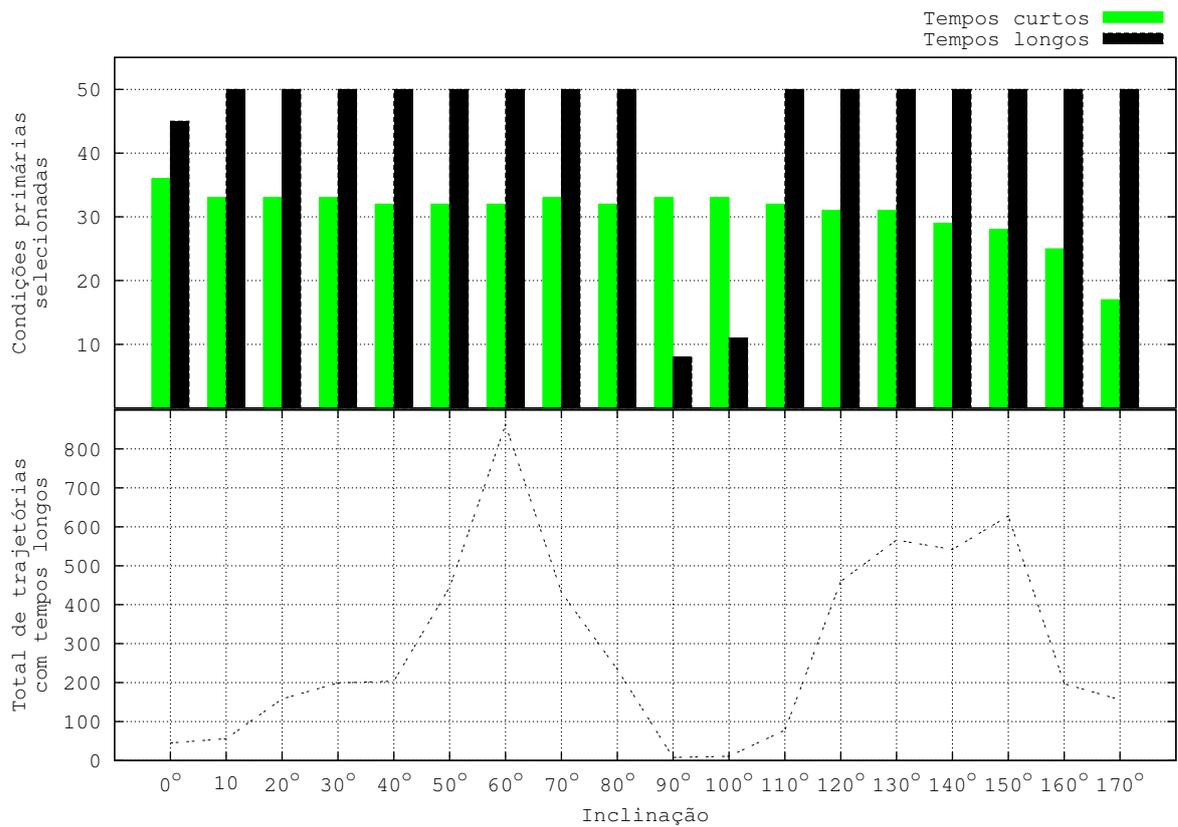


Figura 5: No gráfico inferior, número total de trajetórias com tempos de captura superiores à 10^3 anos, para as respectivas inclinações. No gráfico superior, número de condições iniciais primárias selecionadas para o estudo. Caixas verdes e pretas indicam o número de condições propícias com tempos curtos ($t < 10^3$ anos) e tempos longos ($t \geq 10^3$), respectivamente. Nestes mapas, adotamos o raio de Hill de Júpiter (r_H) como escala para o semi-eixo maior.

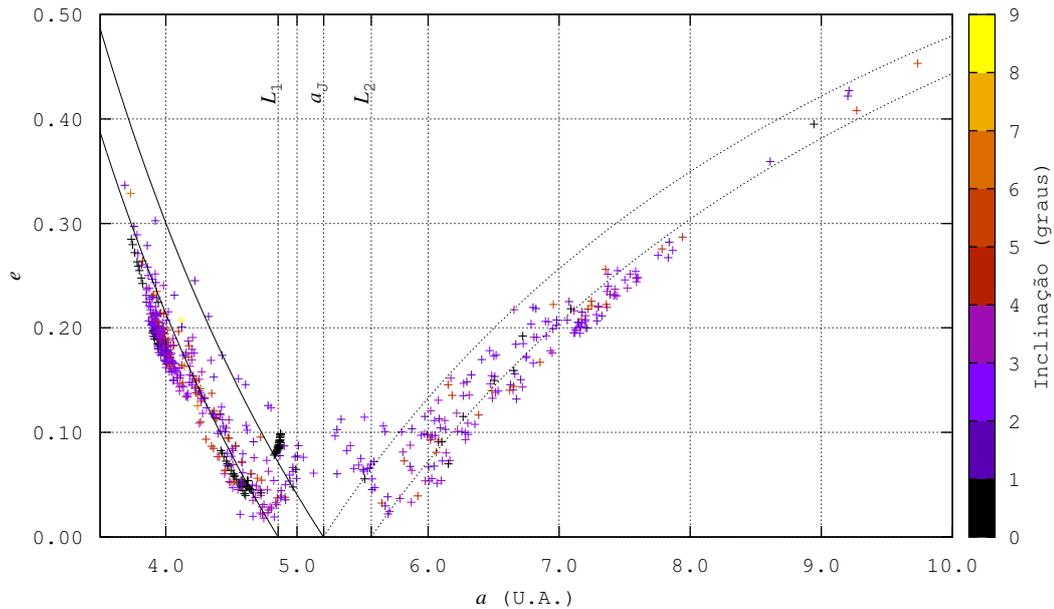


Figura 6: Diagrama ($a \times e$) das condições iniciais propícias, em relação ao Sol, adotadas para o asteróide principal. As curvas cheias e pontilhadas, em preto, denotam o apocentro e o pericentro do asteróide, respectivamente. Estas curvas indicam que as capturas ocorrem, preferencialmente, quando o asteróide se aproxima de Júpiter, através do ponto lagrangiano L_1 , pelo apocentro de sua órbita ou, através do ponto lagrangiano L_2 , pelo pericentro de sua órbita.

2.2 MODELO DE ASTERÓIDE BINÁRIO

Como já mencionado, para criar um asteróide binário a partir das condições iniciais propícias, adicionamos ao problema um segundo asteróide orbitando o primeiro. Chamaremos, de agora em diante, os asteróides principal e secundário de P1 e P2, respectivamente. Isto é, P1 é o asteróide primordial com condições iniciais propícias, e P2 o novo asteróide que orbita P1. Para tornar mais simples a modelagem do asteróide binário, definimos sua órbita, em termos de seus elementos orbitais, ao redor de P1. Os elementos orbitais de P2 em relação à P1, serão referenciados, de agora em diante, por elementos orbitais do asteróide binário, ou simplesmente *elementos do binário*. Para cada condição inicial propícia, geramos 108 condições iniciais do binário. Para tanto, variamos a anomalia verdadeira f_B inicial do binário de 0 a 330° , a cada 30° , e o semi-eixo maior inicial do mesmo, de $0,1r_h$ a $0,5r_h$ a cada $0,05r_h$. Aqui, ' r_h ' é escrito com h minúsculo para diferenciar de ' r_H ', escrito com H maiúsculo. A unidade ' r_h ' representará o raio de Hill do asteróide P1 em relação ao Sol no instante inicial da integração, ao passo que ' r_H ' representa o raio de Hill de Júpiter. Para todos os casos estudados, a excentricidade inicial do binário foi inicialmente ajustada em zero ($e_B = 0$). A inclinação do binário, dada em relação ao plano orbital de Júpiter, foi também inicialmente ajustada para 0 ($I = 0$). A Figura (7) esboça, geometricamente, a distribuição das condições iniciais do binário.

Dado nosso interesse particular nos satélites irregulares de Júpiter, ajustamos a massa do asteróide P2 como $m_2 = 10^{19} \text{ kg}$, baseado na massa de Himalia, o maior satélite irregular de Júpiter

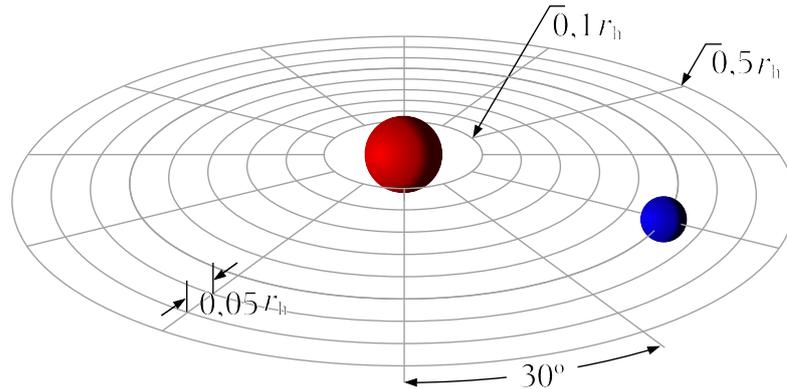


Figura 7: Esboço em perspectiva, fora de escala, da grade de condições iniciais de P2 em relação à P1. As posições iniciais do asteróide P2, em azul, em relação ao asteróide P1, em vermelho, são dadas pelas intersecções entre os raios e as circunferências.

(Emelyanov, 2005). A massa do asteróide P1 foi ajustada, com base no trabalho de Agnor & Hamilton (2006), como $m_1 = 10 m_2 = 10^{20} \text{ kg}$.

2.3 SIMULAÇÕES DE CAPTURA DE ASTERÓIDES BINÁRIOS

Para realizar nossos estudos numéricos, utilizamos um integrador com espaçamento tipo Gauss-Radau (Everhart, 1985). O tempo de integração de cada trajetória foi ajustado para 10^4 anos e o passo de saída para 10 horas. Para evitar o armazenamento da grande quantidade de dados oriundos das integrações desenvolvemos um algoritmo para identificar e armazenar apenas os dados dos principais estágios de cada trajetória integrada. Definiremos os instantes de integração referentes a cada um dos principais estágios como segue:

T_1 : instante em que o asteróide binário se torna capturado por Júpiter;

T_2 : instante em que o asteróide binário se rompe;

T_3 : instante em que um dos membros do asteróide binário primordial escapa das vizinhanças de Júpiter⁵;

Ao identificar cada um dos três instantes, as configurações de todos os corpos são armazenadas em três arquivos distintos. Pelas diferenças entre T_1 e T_3 ou T_f , o tempo final de integração, obtemos o tempo de captura para cada trajetória. O algoritmo adotado para identificar os principais instantes de integração consiste, basicamente, em analisar a energia de dois corpos, a cada passo de integração, como descrito abaixo:

O asteróide binário se aproxima de Júpiter através de uma órbita quase-hiperbólica, dado que o mesmo inicialmente orbita o Sol. Deste modo, as energias de dois corpos individuais de ambos

⁵ T_3 é um instante crucial da integração dado que após o mesmo as interações entre P1 e P2 serão totalmente negligenciáveis.

os asteróides P1 e P2 com relação à Júpiter são positivas. No instante em que ambas se tornam negativas, o instante T_1 é identificado.

De modo similar, dado que P2 orbita P1, a energia mútua entre mesmos é inicialmente negativa. Assim, no instante em que esta se tornar positiva, o instante T_2 é identificado, dado que P2 não tem mais uma órbita fechada em torno de P1.

Por final, dado que a ruptura, de modo geral, ocorre sempre após a captura inicial do asteróide binários, o sistema apresenta-se em um estado no qual ambas as energias de dois corpos de P1 e P2 em relação à Júpiter são negativas, e energia mútua, do problema de dois corpos de P1 e P2 é positiva. Isto é, P1 e P2 orbitam Júpiter individualmente, de maneira que as interações mútuas entre os mesmos são negligenciáveis, o que lhes permitem escapar, individualmente, das vizinhanças de Júpiter. Assim, no instante em que a energia de dois corpos de P1 ou P2 em relação à Júpiter se torna positiva, enquanto a energia de dois corpos de P2 ou P1, respectivamente em relação à Júpiter, se mantém negativa, o instante T_3 é identificado.

Após a instante T_3 , a órbita do asteróide remanescente ao redor de Júpiter, pode ser instável. Deste modo, três possíveis resultados sucedem o instante:

1. O asteróide remanescente colide com Júpiter, caracterizando uma *colisão*;
2. O asteróide remanescente escapa das vizinhanças de Júpiter, caracterizando um *escape duplo*;
3. O asteróide remanescente se mantém capturado durante todo o tempo de integração, caracterizando uma *captura permanente*;

3 RESULTADOS DO ESTUDO INICIAL - CASO PLANAR PROGRADO

Nesta seção apresentamos alguns gráficos gerados a partir dos dados armazenados nos instantes T_1 , T_2 e T_2 em três subseções respectivas. Também discutiremos alguns dados estatísticos na quarta subseção.

3.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DO INSTANTE T_1

Os gráficos da Figura (8) comparam a separação do asteróide binário no instante T_1 com sua variação, através dos valores de semi-eixo maior do mesmo a_B nos instantes inicial e T_1 . No gráfico (a) estão plotados os casos que resultaram em captura permanente de P1 ou P2, em vermelho e azul, respectivamente. No gráfico (b) estão plotados os casos que resultaram em escapes duplos ou colisões, em verde e laranja, respectivamente. Estes gráficos nos permitem compreender mais sobre a evolução do asteróide binário desde o instante inicial da integração até o instante T_1 .

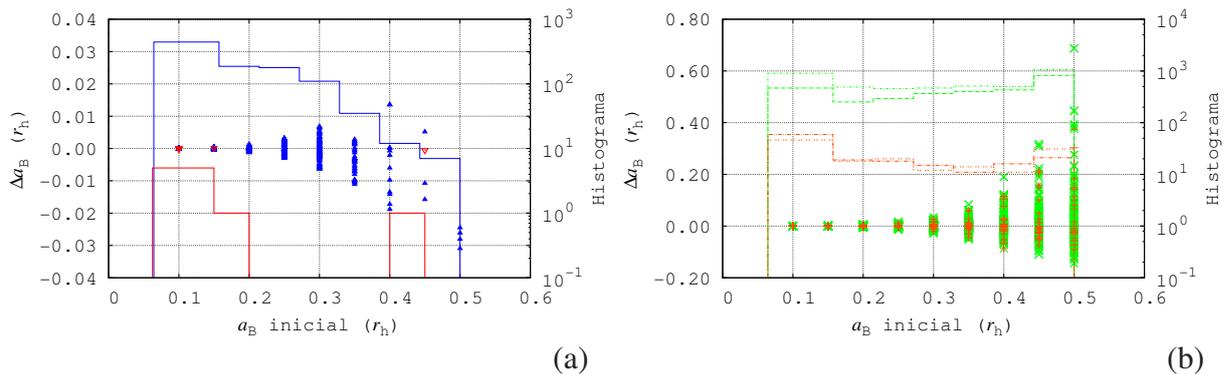


Figura 8: Semi-eixo maior do binário pela variação do mesmo no instante T_1 . O gráfico (a) representa os casos que resultaram em captura permanente de P1 ou P2, em vermelho ou azul, respectivamente. O gráfico (b) representa os casos que resultaram em escapes duplos ou colisões, em verde e laranja, respectivamente. As linhas cheias são histogramas com valores relacionados na escala à direita.

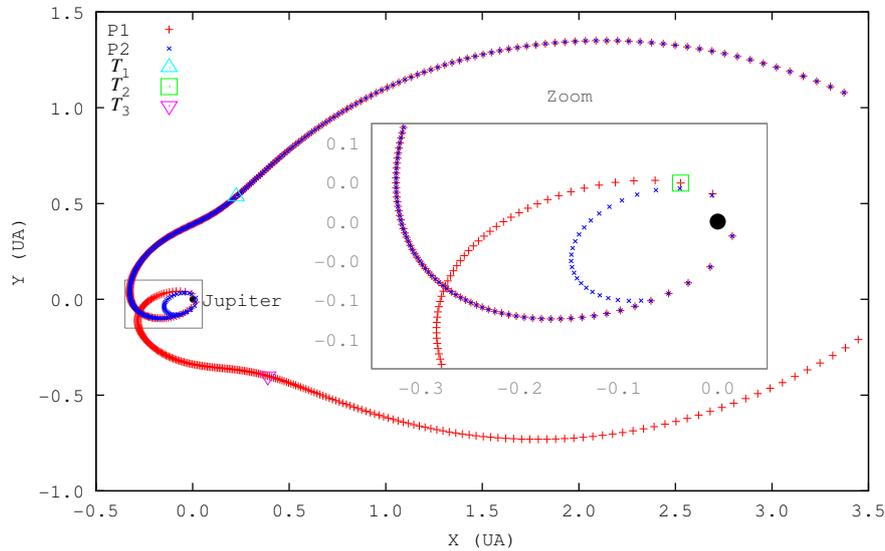
As linhas cheias vermelhas e azuis são histogramas dos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Estes histogramas revelam que i) a probabilidade de ocorrência de captura permanente é muito maior para o asteróide P2. De modo mais geral, o membro menor do asteróide binário tem maior probabilidade de captura. Os histogramas ainda nos permitem concluir que, asteróides binários mais próximos são mais suscetíveis as capturas permanentes que os asteróides com grandes separações. Comparando os gráficos (a) e (b), notamos que para valores de semi-eixo maior do binário superiores à $a_B = 0,35r_h$ o número de capturas permanentes para variações positivas de semi-eixo maior diminui ao contrário do número de escapes duplos com variações também positivas de semi-eixo maior. Conseqüentemente, verificamos que iii) a separação do asteróide binário, dada em termos de seu semi-eixo maior, tende ao li-

mite bem estabelecido $a^* \approx 0,5r_h$, além do qual as órbitas são instáveis. Isso significa que é possível classificar os binários suscetíveis à captura através de sua separação no instante T_1 , ou seja, através do semi-eixo maior do binário no instante em que ele é capturado.

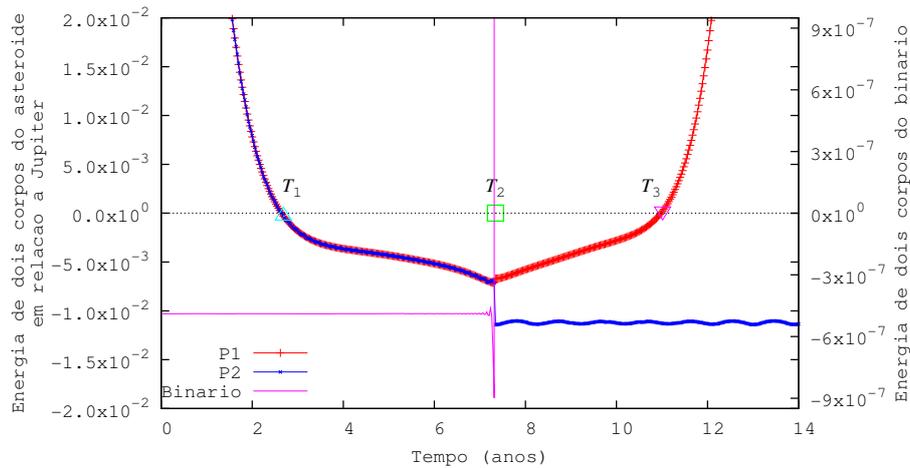
Com base nos resultados de Tsui (1999, 2000), os quais mostram que um asteroide pode se tornar permanentemente capturado devido a reações de troca com um satélite do planeta, podemos, a partir destes resultados, explicar o mecanismo de captura através de trocas de energia, como segue:

1. Consideremos um asteroide binário, inicialmente em órbita heliocêntrica, que será capturado por Júpiter. Uma vez que este asteroide binário está inicialmente orbitando o Sol, a energia individual de cada um de seus membros é maior que a energia de escape ε_0 , isto é, a energia mínima necessária para permitir que um asteroide, individualmente, escape de uma captura por Júpiter;
2. Entretanto, dado que os asteroides orbitam a uma distância muito pequena de seu bari-centro comum, trocas de momento angular e energia ocorrem constantemente. Por outro lado, após ser capturado por Júpiter (T_1), o asteroide binário passa a sofrer fortes perturbações do planeta. Conseqüentemente, as reações de trocas de tornam mais intensas;
3. Devido às perturbações de Júpiter, o binário irá se romper (T_2). Entretanto, as trocas de energia ocorridas até então, entre os asteroides resultaram em estados de energia nos quais a energia de um membro é inferior à energia de escape ε_0 . Nestas condições, este membro de menor energia permanecerá capturado, uma vez que, após a ruptura as interações de troca entre os asteroides serão negligenciáveis;

O gráfico (b) da Figura (9) ilustra este processo de troca de energias para a trajetória mostrada no gráfico (a). Ambos os gráficos denotam os instantes T_1 , T_2 e T_3 através de um triangulo azul claro, um quadrado verde e um triangulo lilás, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 9: Um exemplo de um processo de captura. No gráfico (a), '+' vermelho e 'x' azul, representam a trajetória de P1 e P2, respectivamente, no sistema de referência de Júpiter (círculo preto). O asteroide binário é temporariamente capturado por Júpiter (triângulo azul claro), se rompe (quadrado verde) e tem, finalmente, seu menor membro permanentemente capturado enquanto o maior escapa das vizinhanças de Júpiter (triângulo lilás). O gráfico (b) mostra a evolução da energia para a trajetória do gráfico (a). '+' vermelho e 'x' representam a energia de dois corpos de P1 e P2 em relação à Júpiter, respectivamente, ao passo que a linha lilás representa a energia de dois corpos do binário, isto é, de P2 em relação à P1.

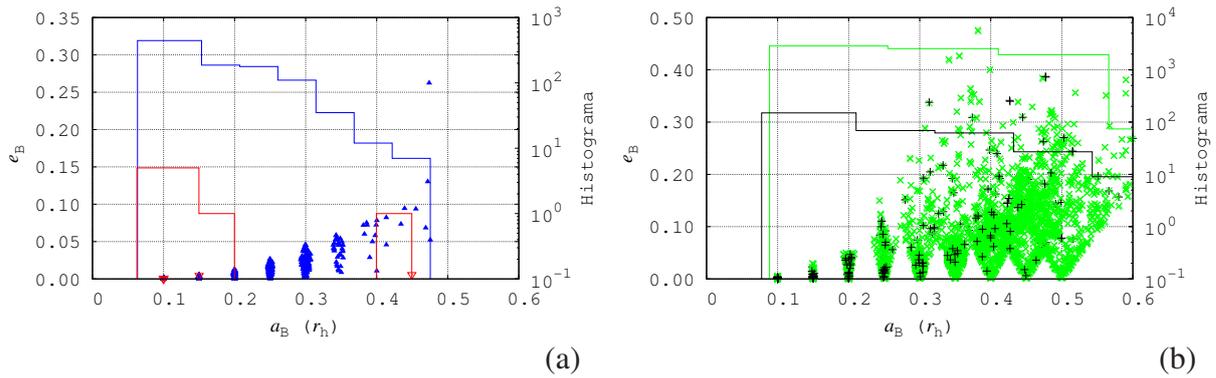


Figura 10: Diagramas de semi-eixo maior versus excentricidade do binário no instante T_1 . O gráfico (a) apresenta os casos que resultaram em captura permanente de P1 ou P2, em vermelho e azul, respectivamente. No gráfico (b), 'x' verde e '+' preto representam os casos que resultaram em escapes duplos e colisões, respectivamente. As linhas cheias são histogramas, com valores na escala à direita

Note que estas conclusões concordam com os resultados: Elas concordam com a maior probabilidade de captura do menor membro do asteróide binário uma vez que, menor massa significa menor inércia, então, conseqüentemente é mais fácil para o asteróide menor perder a energia necessária para permanecer capturado. A maior probabilidade de ocorrência de captura permanente para asteróides mais próximos também concorda com estas conclusões dado que as interações de trocas entre corpos mais próximos são mais intensas que para corpos com maior separação. Finalmente, o limite de separação, dados por $a_B^* \approx 0,5r_h$, também concorda com as conclusões pois a separação do binário é proporcional à energia de ligação entre os mesmos, a qual, por sua vez, está relacionada com a máxima energia que os asteróides podem trocar. Em outras palavras, binários com grandes separações não conseguem trocar energia suficiente para produzir capturas permanentes.

Os gráficos (a) e (b) na Figura (10) são diagramas $a_B \times e_e$ do instante T_1 . O gráfico (a), relaciona os caos que resultaram em captura permanente de P1 (vermelho) ou P2 (azul). No gráfico (b), 'x' verde indicam casos que resultaram em escapes duplos e '+' preto casos que resultaram em colisões. As linhas cheias são histogramas.

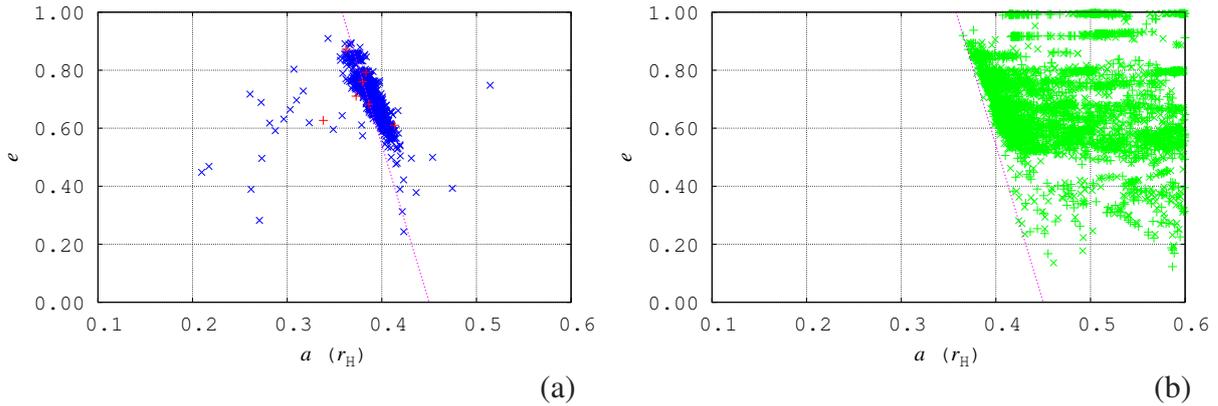


Figura 11: Diagramas de semi-eixo maior versus excentricidade dos asteróides no instante T_2 . O gráfico (a) mostra os casos que resultaram em captura permanente de P1 ou P2, em vermelho e azul, respectivamente. O gráfico (b) mostra os casos que resultaram em escapes duplos. Pontos denotados por ‘+’ verde representam os asteróides que escaparam após o instante T_3 . A linha lilás é o semi-eixo maior crítico encontrado por Domingos et al. (2006) (veja Equação (2)) para $e_p = 0$.

Comparando os gráficos (a) e (b) da Figura (10), confirmamos o valor limite de semi-eixo maior, $a_B^* \approx 0,5r_h$, uma vez que o gráfico (b) apresenta um quantidade notável de casos de escapes duplos nos quais o semi-eixo maior do binário excede a_B^* . O principal resultado deste gráfico, entretanto, é a relação da excentricidade com o semi-eixo maior do binário. Comparando os gráficos(a) e (b), notamos, que mesmo para pequenos valores de semi-eixo maior, a captura permanente não ocorre se a excentricidade estiver acima de um limite associado ao respectivo valor de semi-eixo maior.

3.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO INSTANTE T_2

Com já definido antes, o instante T_2 é caracterizado pela ruptura do asteróide binário. Deste modo, os gráficos desta subseção apresentam os elementos individuais de cada asteróide em relação à Júpiter. O gráfico (a) da Figura (11) é um diagrama $a \times e$, no instante T_2 , dos asteróides que permaneceram capturados por Júpiter. O gráfico (b) mostra o mesmo diagrama para o último asteróide a escapar de Júpiter nos casos de escapes duplos. Da comparação de (a) e (b), encontramos uma região no espaço $a \times e$ na qual um asteróide permanece capturado no instante da ruptura T_2 . Ajustando uma expressão para esta região do espaço $a \times e$ encontramos um limite de semi-eixo maior dado em termos da excentricidade, com segue:

$$a^*(e) = 0.4500(1.0000 - 0.2046e) \quad (3)$$

Em outras palavras, no instante da ruptura, podemos prever se o asteróide permanecerá capturado verificando se o semi-eixo maior do mesmo obedece $a < a^*(e)$. Contudo, não afirmamos que probabilidade de ocorrência de captura permanente fora dessa região é nula.

O segundo gráfico do instante T_2 é um histograma angular. Este nos permite determinar a probabilidade ocorrência de captura permanente de P2 para uma dada configuração angular do sistema no instante da ruptura. Para tornar esta análise mais fácil, definimos um sistema conveniente que nos permite determinar as posições angulares dos asteróides através de dois ângulos, como ilustra a Figura (12). O θ_1 mede o ângulo entre as direções Sol-Júpiter e Júpiter-P1, ao passo que, θ_2 mede o ângulo entre as direções Júpiter-P1 e P1-P2. Note que neste sistema, P1 orbita Júpiter no sentido anti-horário e P2 orbita P1 também no sentido anti-horário. Os gráficos da Figura (13) apresentam os histogramas de probabilidade da seguinte forma: Os círculos vermelhos representam a posição angular de P1 em relação à direção Sol-Júpiter (θ_1) com intervalos de 30° . As seções angulares ao redor de cada círculo vermelho representam a posição angular de P2 em relação à direção Júpiter-P1 (θ_2), também, para intervalos de 30° . As cores das seções relacionam as porcentagens de captura permanente ou escapes através das escalas de cores nos histogramas (a) e (b), respectivamente. As seções brancas representam um número nulo absoluto de eventos. O gráfico (a) mostra as porcentagens em relação ao total de capturas de P2, e o gráfico (b) a porcentagem de escapes em relação número total de casos de escapes.

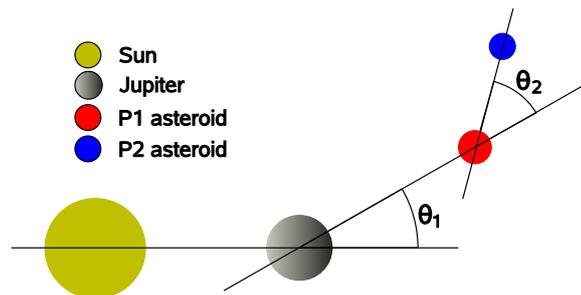


Figura 12: Esboço da configuração angular entre os corpos.

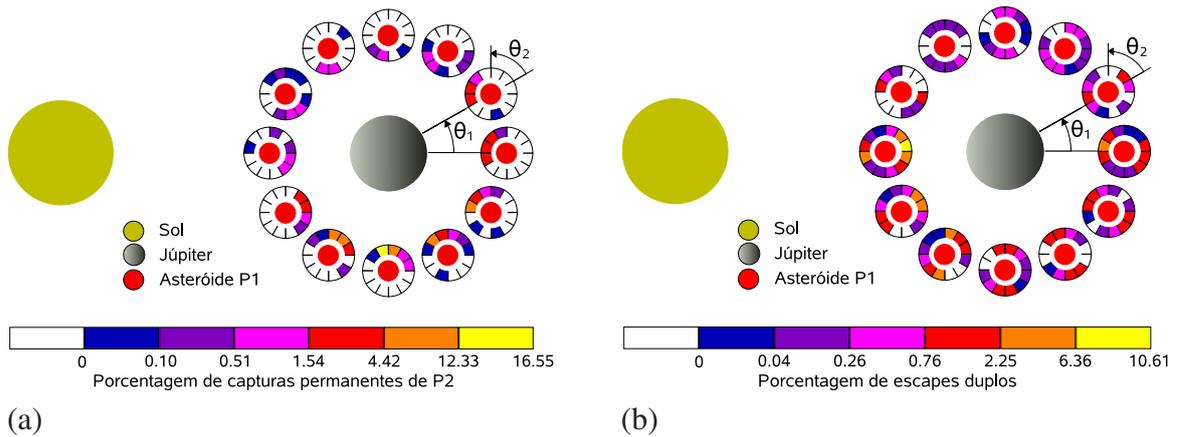


Figura 13: Histograma angular do instante T_2 . Os círculos vermelhos indica a posição de P1 em relação à Júpiter (θ_1). As seções angulares ao redor de cada círculo vermelho indicam a posição de P2 em relação à P1 (θ_2). As cores das seções relacionam as probabilidades de captura permanente de P2 através da escala em (a). Analogamente, em (b) as seções relacionam a probabilidade de escape duplo.

Observando os histogramas notamos que: i) as rupturas ocorrem preferencialmente quando Júpiter, P1 e P2 estão aproximadamente alinhados, isto é, $\theta_2 \approx 0$ ou $\theta_2 180^\circ$. A maior probabilidade observada para $\theta_1 \approx 180^\circ$ no histograma de escapes duplos (b), comparada com a pequena probabilidade para $\theta_1 \approx 180^\circ$ no diagrama de capturas permanentes (a) indicam que ii) rupturas que ocorrem quando o asteróide binário está alinhado entre Júpiter e o Sol, muito provavelmente, resultam em escapes duplos. Por outro lado, o histograma (a) mostra que iii) capturas permanentes de P2 resultam com grande probabilidade de asteróides binários que se rompem em uma posição angular de aproximadamente 90° após cruzar a direção Sol-Júpiter ($\theta_1 \approx 270^\circ$). Finalmente, do histograma de captura (a) também observamos que as capturas permanentes de P2 sucedem de rupturas que ocorrem qual P2 está em conjunção inferior com P1, visto de Júpiter ($\theta_2 \approx 180^\circ$).

Estes resultados reforçam a importância da presença do Sol na dinâmica de captura de asteróides binários dado que estas posições angulares características estão intrinsecamente vinculadas à posição de Júpiter em relação ao Sol, isto é, a linha da direção Sol-Júpiter.

3.3 RESULTS AT T_3

Os dados armazenados no instante T_3 , mostram a configuração final do asteróide capturado, dados que este não irá sofrer interações com o outro asteróide. O gráfico da Figura (14), é um diagrama $a \times e$ dos asteróides permanentemente capturados no instante T_3 . Pontos denotados por ‘+’ vermelho e ‘x’ azul relacionam os casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os círculos pretos representam os satélites irregulares progrados reais de Júpiter. A linha lilás é o semi-eixo maior crítico encontrado por Domingos et al. (2006), dado pela Equação (2). O contorno lilás é uma borda de uma de uma região de estabilidade estendida

obtida através de um estudo mais geral de tempos de captura.

Este estudo mais geral consistiu em seguir os mesmos passos desenvolvidos por Vieira Neto & Winter (2001), considerando, entretanto, valores iniciais diferentes para longitude do pericentro ϖ_0 e anomalia verdadeira f_0 . Dos resultados deste estudo, mostrados em Figura (4), descobrimos que para os pares de valores iniciais $(\varpi_0 = 0, f_0 = 180^\circ)$ e $(\varpi_0 = 180^\circ, f_0 = 180^\circ)$, os mapas de tempo de captura têm regiões de estabilidade maiores. Combinando as bordas das regiões de estabilidade dos mapas (a) e (b) da Figura (4), de modo a obter uma região mais abrangente, obtivemos a borda de estabilidade mais geral mostrada na Figura (14).

Os pontos no gráfico Figura (14) mostram que os elementos orbitais a e e dos asteróides permanentemente capturados abrangem uma larga região do espaço $a \times e$. Apesar deste estudo só ter considerado o caso planar, alguns asteróides permaneceram capturados com órbitas similares, em semi-eixo e excentricidade, as órbitas reais dos satélites irregulares progrados de Júpiter.

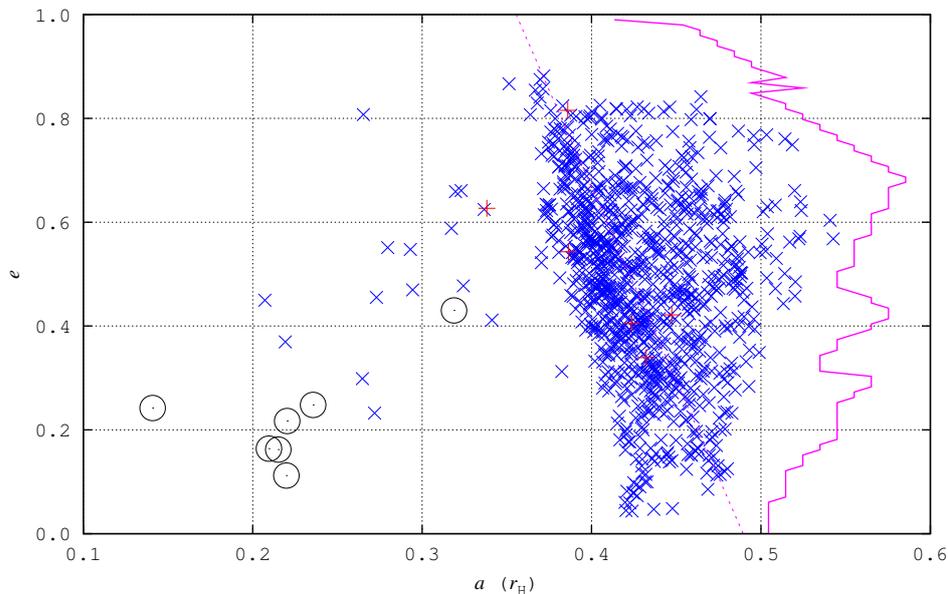


Figura 14: Mesmo gráfico da Figura (11.1) para os dados do instante T_3 . Os pontos denotados por '+' vermelho e 'x' azul representam os casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. As circunferências pretas representam os satélites irregulares progrados reais de Júpiter. O contorno lilás é a borda de uma região de estabilidade mais geral

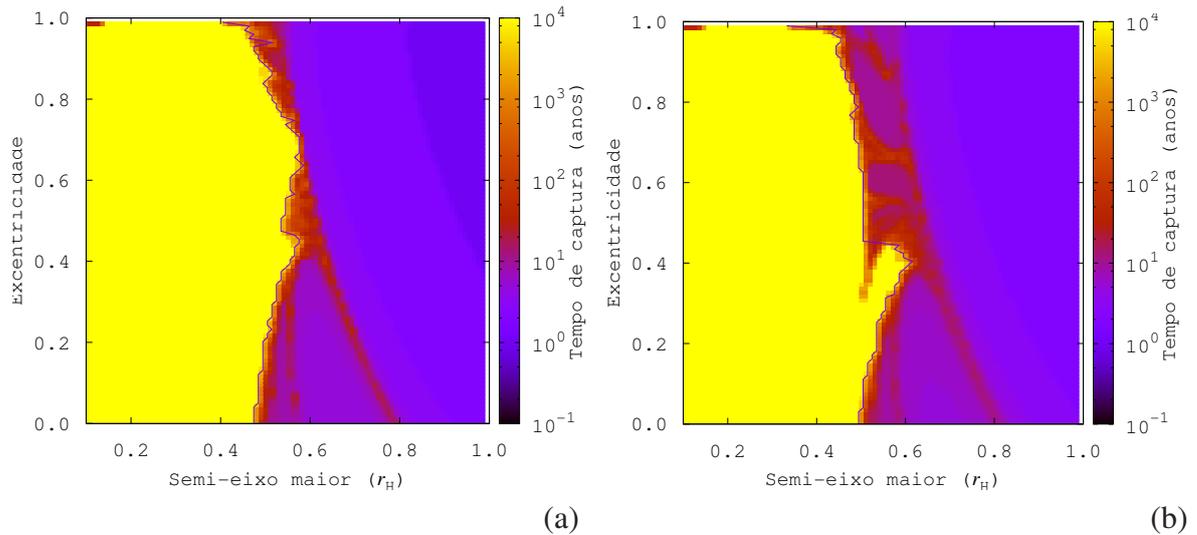


Figura 15: Mesmo mapa da figura Figura (4), gerado para diferentes pares de condições iniciais. Mapa (a) $\omega_0 = 0$ e $\lambda_0 = 180^\circ$ e mapa (b) $\omega_0 = 180^\circ$ e $\lambda_0 = 180^\circ$.

3.4 CAPTURAS DE ASTERÓIDES BINÁRIOS EM NÚMEROS

Das 8 748 trajetórias simuladas, 4 860 foram provenientes de condições iniciais primárias de tempos longos e 3 888 de tempos curtos. Tabela (6) apresenta as quantidades de capturas permanentes e colisões. A segunda e a terceira colunas mostram os valores com relacionados às trajetórias de condições iniciais provenientes de tempos curtos e longos, respectivamente. Como mostrado na Tabela (6), apesar da probabilidade de captura permanente para os casos derivados das condições de tempos curtos ser baixa, a probabilidade de captura permanente para trajetórias provenientes de condições de tempos longos é bastante expressiva (20%). As probabilidades de colisões, para ambos os casos tem a mesma ordem.

Tabela 6: Números de simulações, capturas e colisões.

Descrição	Tempos curtos de captura	Tempos longos de captura
Simulations	3 888	4 860
Captures	7	972
Captures of P1	1	5
Captures of P2	6	966
Double captures ⁶	0	1
Collisions	180	143

4 RESULTADOS DO ESTUDO GENERALIZADO - CASOS INCLINADOS

Nesta seção apresentaremos os gráficos dos resultados do estudo mais geral, no qual estudamos os casos não planares. Os gráficos serão dispostos, como na seção anterior, em três subseções relativas aos instantes T_1 , T_2 e T_3 . Adicionalmente, uma quarta subseção apresenta os gráficos relativos às configurações no instante final da integração.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DO INSTANTE T_1

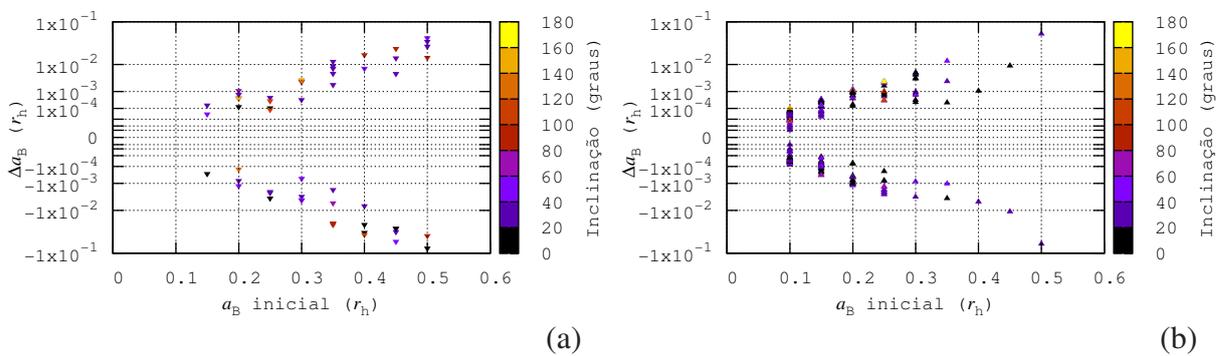


Figura 16: Semi-eixo maior inicial do binário versus a variação do mesmo no instante T_1 . Os gráficos (a) e (b) representam os casos que resultaram na captura permanente de P1 e P2, respectivamente. As cores dos pontos relacionam a inclinação do binário, no instante T_1 através da escala de cores.

Os gráficos da Figura (16), da mesma forma que os gráficos da Figura (8), comparam a separação do asteróide binário no instante inicial da integração com sua variação até o instante T_1 , através dos valores de semi-eixo maior do mesmo a_B nos instantes inicial e T_1 . Os gráficos (a) e (b) da Figura (16) representam os casos que resultaram na captura permanente do asteróide P1 e P2, respectivamente. Primeiramente, notamos que, da mesma forma que no caso planar prógrado, a probabilidade de captura do asteróide de menor massa é maior. Entretanto, a probabilidade de captura do asteróide P1 para caso inclinado, é ligeiramente maior que a probabilidade de captura do mesmo para o caso planar prógrado. Um resultado novo surge da comparação dos gráficos da Figura (16) com o gráfico (a) da Figura (8). Isto é, o último aponta a existência de um limite no valor de semi-eixo maior ($a_B \approx 0,35r_h$), acima do qual a probabilidade de captura diminuía expressivamente. Entretanto, os gráficos da Figura (16) mostram que este limite é válido apenas para os casos do asteróide de menor massa, P2. A distribuição dos pontos no gráfico (a), não indica uma queda apreciável da probabilidade de captura do asteróide P1 para valores superiores a $a_B \approx 0,35r_h$.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO INSTANTE T_2

O aumento dos graus de liberdade do problema proveniente da inclinação agrega dificuldade à análise dos resultados. Para fazer um estudo comparativo à análise dos histogramas angulares da Figura (13), optamos por estudar a projeção das distâncias angulares no plano orbital de Júpiter. Os gráficos (a) e (b) da Figura (17), são diagramas angulares dos casos que resultaram na captura permanente de P1 e P2, respectivamente. Estes gráficos confirmam os principais resultados obtidos da Figura (13.a). Isto é, a grande densidade de pontos na região da “quadratura” ($\theta_1 \approx 270^\circ$) no gráfico (b), indica a maior probabilidade de captura do asteróide P2 para esta configuração. Do mesmo modo, notamos que a configuração mais favorável é a conjunção inferior de P2 com P1, visto de Júpiter, isto é, $\theta_2 \approx 180^\circ$.

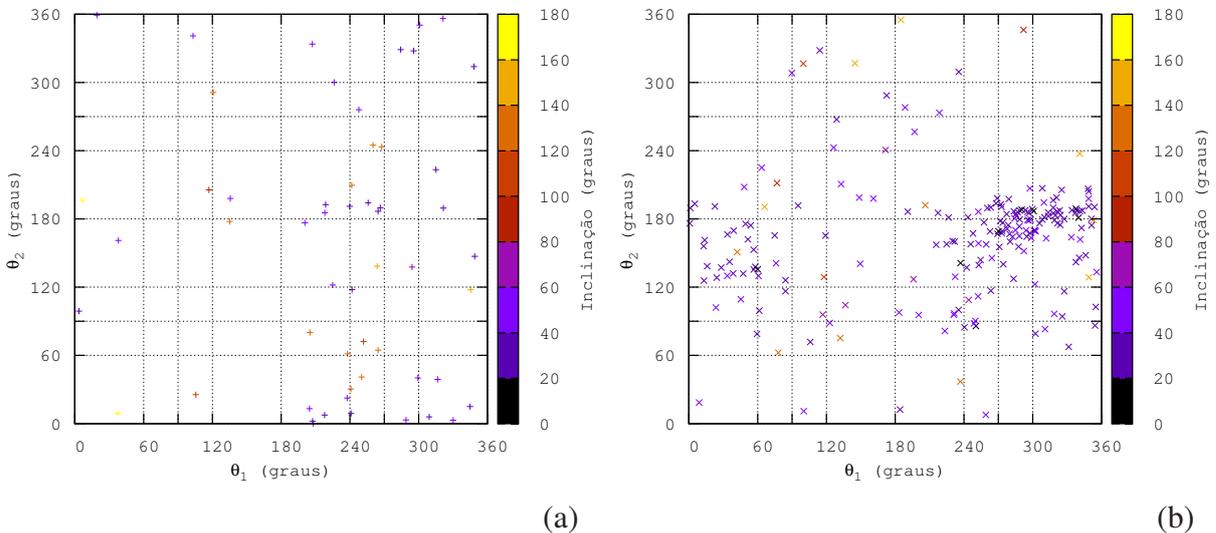


Figura 17: Projeção das distâncias angulares θ_1 versus θ_2 , conforme mostra o esboço da Figura (12). Os gráficos (a) e (b) representam os casos que resultaram na captura permanente de P1 e P2, respectivamente. As cores dos pontos relacionam a inclinação do binário, no instante T_2 , através da escala de cores.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DO INSTANTE T_3

A Figura (18) mostra os diagramas $a \times e$ com a configuração dos asteróides capturados no instante T_3 . Os gráficos (a) e (b) relacionam os casos que resultaram em captura permanente de P1 e P2, respectivamente. Os asteróides capturados em órbitas prógradas estão distribuídos de maneira semelhante aos casos observados no estudo inicial do caso planar prógrado. Os diagramas polares da Figura (19) apresentam a distribuição dos asteróides capturados com uma ênfase maior na inclinação. Como nas outras figuras, (a) e (b) representam os casos em que P1 e P2 ficaram permanentemente capturados, respectivamente. Estão destacados nos diagramas, com arcos verdes pontilhados, o máximo e o mínimo valor de semi-eixo maior dos satélites

irregulares reais de Júpiter. Estão destacados também, com arcos na cor lilás, o menor pericentro e o maior apocentro das órbitas dos satélites irregulares reais de Júpiter. Estes diagramas podem ser comparados ao diagrama da Figura (1), que mostra a distribuição dos satélites irregulares de Júpiter.

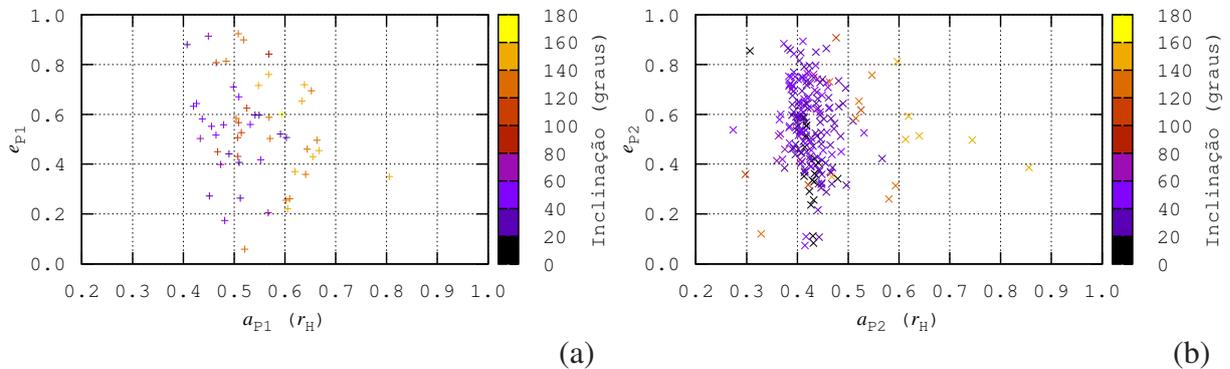


Figura 18: Semi-eixo maior versus excentricidade do asteróide no instante T_3 . Os gráficos (a) e (b) representam os casos que resultaram na captura permanente de P1 e P2, respectivamente. As cores dos pontos relacionam a inclinação do binário, no instante T_3 através da escala de cores.

Da Figura (19.b), notamos uma quantidade expressivamente maior de asteróides capturados em órbitas prógradas. Associando isto ao fato do número de condições iniciais simuladas para os casos progrados e retrógrados serem da mesma ordem, concluímos que o asteróide menor tem maior probabilidade de ser capturados em uma órbita prógrada. Por outro lado, notamos uma ligeira tendência do asteróide maior ser capturado em órbita retrógrada. Verificando os dados, pudemos constatar que entre os casos em que P1 permaneceu capturado, 56,36 % das órbitas são retrógradas, ao passo que entre os casos de captura permanente de P2, 91,42 % das órbitas são prógradas.

4.4 CONFIGURAÇÃO FINAL DOS ASTERÓIDES CAPTURADOS

No estudo inicial, caso planar prógrado, nos surgiu a dúvida de quão estável seria a órbita final do asteróide capturado, isto é, quão diferente seria a órbita ao final da integração em relação à órbita conhecida no instante T_3 . Isto não pode ser verificado dado que não havíamos armazenado as configurações do sistema no instante final da integração. Ao iniciar o estudo general com inclinações, tomamos então, o cuidado de também armazenar a configuração do sistema ao final da integração. A título de comparação, apresentamos nesta subseção a mesma análise gráfica da subseção anterior, 4.3, para as configurações finais dos asteróides capturados. Comparando os gráficos das figuras 20 e 21 com os gráficos das figuras 18 e 19, notamos que os valores médios não variam substancialmente.

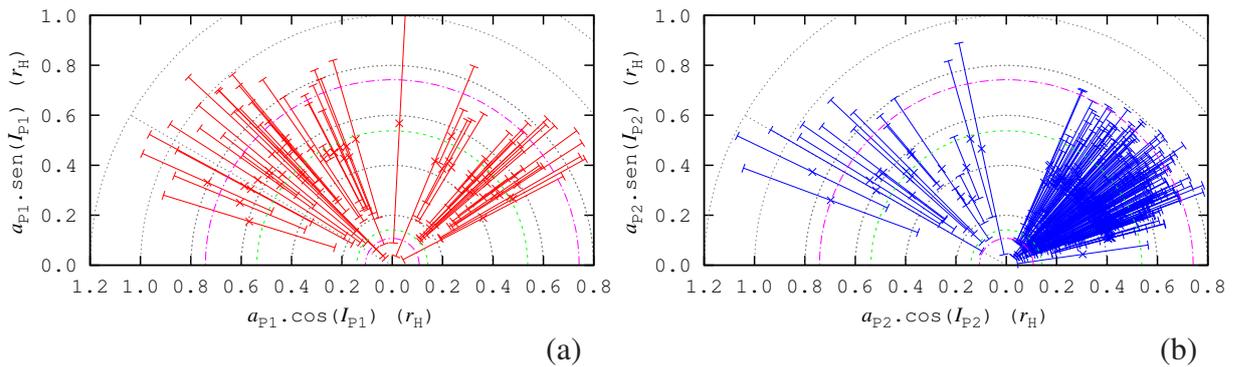


Figura 19: Diagrama polar da distribuição dos asteróides no instante T_3 . Os gráficos (a) e (b) representam os casos que resultaram na captura permanente de P1 e P2, respectivamente. As extremidades das barras representam o apocentro e o pericentro da órbita, e suas inclinações, contada a partir do eixo horizontal no sentido anti-horário, representam as inclinações orbitais. As semicircunferências verdes, a título de comparação, representam os valores mínimo e máximo de semi-eixo maior dos satélites irregulares reais de Júpiter. Também a título de comparação, as circunferências de cor lilás representam o menor pericentro e o maior apocentro das órbitas dos satélites irregulares reais de Júpiter.

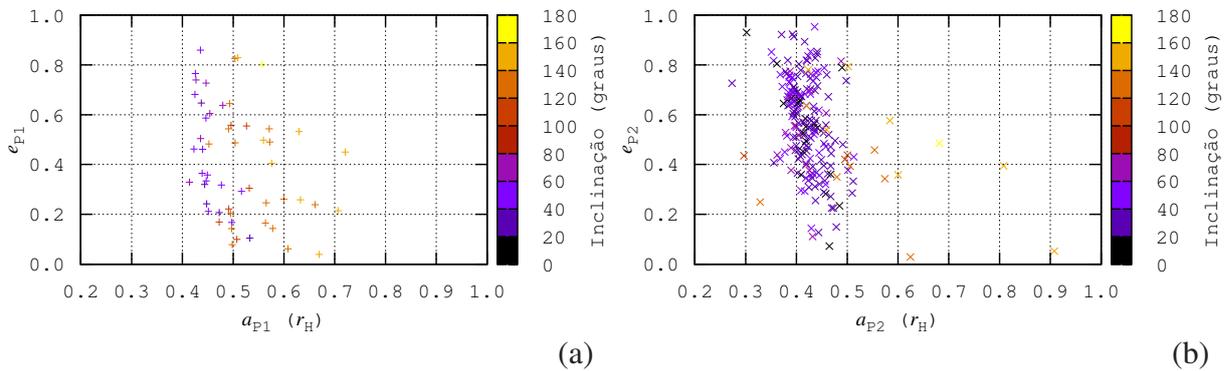


Figura 20: Mesma análise gráfica da Figura (18), para a configuração no instante final da integração.

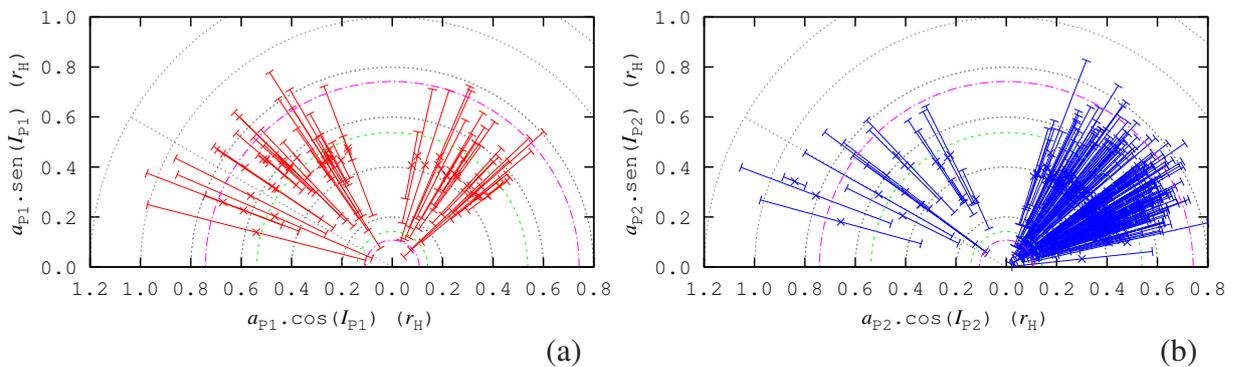


Figura 21: Mesma análise gráfica da Figura (19), para a configuração no instante final da integração.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, estudamos a dinâmica de captura de asteróides binários procurando pelas condições favoráveis que tornam uma captura permanente. Nossos resultados apresentam novas perspectivas a respeito do problema de captura de asteróides binários enfatizando a importância do papel do Sol na dinâmica. Os resultados obtidos nos permite compreender características intrínsecas do processo, bem como, características relativas à configuração do asteróide binário. Em uma primeira abordagem, na qual estudamos o caso planar prógrado, constatamos que asteróides binários com pequenas separações são mais suscetíveis a capturas permanentes que asteróides com maior separação. Contudo, considerando uma abordagem mais geral, na qual estudamos encontros de asteróides binários fora do plano orbital de Júpiter, constatamos que este resultado é um caso particular do resultado mais geral. Isto é, i) em asteróides binários com pequenas separações, o menor membro é mais suscetível à captura permanente. Entretanto, os novos resultados indicam que, ii) considerando capturas fora do plano orbital de Júpiter, asteróides binários com grandes separações resultam em uma maior susceptibilidade à captura permanente do seu maior membro. Contudo, a probabilidade global de captura permanente é maior para o menor membro do asteróide binário.

Ainda sobre as considerações dos membros do binário, os resultados indicam uma probabilidade expressivamente maior do menor membro do binário ser capturado em uma órbita prógrada, enquanto o maior membro tem uma probabilidade ligeiramente maior de ser capturado em uma órbita retrógrada. Estes resultados refletem a necessidade de se avaliar o modelo para diferentes valores e razões de massas do asteróide binário.

Em relação às características relativas ao processo de captura, o estudo mais geral concorda com os primeiros resultados, os quais indicam que à posição angular dos corpos no instante da ruptura tem forte influência na probabilidade de ocorrência de captura permanente. Resumindo: iii) Rupturas ocorrem preferencialmente quando ambos os asteróides, membros do binário, estão aproximadamente alinhados com Júpiter; Contudo, iv) rupturas que ocorrem quando P2 está entre Júpiter e P1 resultam mais freqüentemente em capturas permanentes; iv) A probabilidade de ocorrência de capturas permanentes é consideravelmente maior para rupturas que ocorrem em “quadratura ” com Júpiter, isto é, quando o binário se encontra em uma posição angular de aproximadamente 90° após sua passagem pela linha que une Sol-Júpiter.

Ponderando o estudo realizado e os resultados alcançados, concluímos que a dinâmica do modelo proposto é eficiente no que tange ao objetivo de se capturar permanentemente corpos a partir de órbitas heliocêntricas. Por outro lado, temos observado que cada novo resultado sugere novas hipóteses e a necessidade de se avaliar novos parâmetros, o que tende a ramificar consideravelmente o estudo. Dentre as perspectivas futuras, destacamos:

- A necessidade de se analisar as razões de massas;
- Um estudo considerando as inclinações relativas do binário, isto é, a inclinação de P2 em

relação à P1;

- Considerar um tratamento de colisões mútuas entre os membros do binário, dado que no presente estudo as integrações foram interrompidas em tais ocorrências. Colisões mútuas geram fragmentos que, de maneira semelhante aos binários, podem ser permanentemente capturados;
- Por fim, há de se considerar a possibilidade de se estudar a captura de grupos de asteróides;

Referências Bibliográficas

- Agnor C. B., Hamilton D. P., 2006, *Nature*, 441, 192
- Astakhov S. A., Burbanks A. D., Wiggins S., Farrelly D., 2003, *Nature*, 423, 264
- Beaugé C., Roig F., Nesvorný D., 2002, *Icarus*, 158, 483
- Belton M., Carlson R., 1994, *IAUC*, 5948, 2
- Benner L. A., Mckinnon W. B., 1995, *Icarus*, 118, 155
- Brunini A., 1995, *Earth Moon and Planets*, 71, 281
- Carusi A., Valsecchi G., 1979, *Numerical Simulations of Close Encounters Between Jupiter and Minor Bodies*, 2 edn. The University of Arizona Press, Tucson, pp 391–416
- Colombo G., Franklin F. A., 1971, *Icarus*, 15, 186
- Ćuk M., Burns J. A., 2004, *Icarus*, 167, 369
- Domingos R. C., Winter O. C., Yokoyama T., 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373, 1227
- Emelyanov N., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 438, L33
- Everhart E., 1973, *The Astronomical Journal*, 78, 316
- Everhart E., 1985, in Carusi A., Valsecchi G. B., eds, *Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*, Proceedings of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11-15, 1984. Edited by Andrea Carusi and Giovanni B. Valsecchi. Dordrecht: Reidel, *Astrophysics and Space Science Library*. Volume 115, 1985., p.185 An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. pp 185–+
- Funato Y., Makino J., Hut P., Kokubo E., Kinoshita D., 2004, *Nature*, 427, 518
- Goldreich P., 1966, *Reviews of Geophysics*, 4, 411
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A., 2005, *Nature*, 435, 466

- Heppenheimer T. A., Porco C., 1977, *Icarus*, 30, 385
- Kuiper G., 1956, *Vistas in Astronomy*, 2, 1631
- Merline W. J., Weidenschilling S. J., Durda D. D., Margot J. L., Pravec P., Storrs A. D., 2002, *Asteroid III*. p. 289
- Morbidelli A., Levison H. F., Tsiganis K., Gomes R., 2005, *Nature*, 435, 462
- Murray C. D., Dermott S. F., 1999, *Solar System Dynamics*, 1 edn. Cambridge University Press
- Nesvorný D., Vokrouhlický D., Morbidelli A., 2007, *The Astronomical Journal*, 133, 1962
- Noll K. S., 2006, in Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernández J. A., eds, *Proceedings of the International Astronomical Union: Asteroids, Comets, and Meteors Solar system binaries*. Cambridge University Press, pp 301–318
- Peale S. J., 1999, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 37, 533
- Pollack J. B., Burns J. A., Tauber M. E., 1979, *Icarus*, 37, 587
- Pollack J. B., Hubickyj O., Bodenheimer P., Lissauer J. J., Podolak M., Greenzweig Y., 1996, *Icarus*, 124, 62
- Richardson D. C., Walsh K. J., 2006, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 47
- Sheppard S. S., 2006, in Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernández J. A., eds, *Proceedings of the International Astronomical Union: Asteroids, Comets, and Meteors Outer irregular satellites of the planets and their relationship with asteroids, comets and kuiper belt objects*. Cambridge University Press, pp 319–334
- Sheppard S. S., Jewitt D. C., 2003, *Nature*, 423, 261
- solarsystem.nasa.gov, 2009, *Solar System Exploration*
- Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., Levison H. F., 2005, *Nature*, 435, 459
- Tsui K., 1999, *Planetary and Space Science*, 47, 917
- Tsui K., 2000, *Icarus*, 148, 139
- Vieira Neto E., Winter O. C., 2001, *The Astronomical Journal*, 122, 440
- Vieira Neto E., Winter O. C., Yokoyama T., 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 414, 727
- Vieira Neto E., Winter O. C., Yokoyama T., 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 452, 1091
- Vokrouhlický D., Nesvorný D., Levison H. F., 2008, *The Astronomical Journal*, 136, 1463

Winter O. C., Vieira Neto E., 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 377, 1119

www.dtm.ciw.edu, 2009, The Jupiter Satellite Page

www.eso.org, ESO - 2007

APÊNDICE

Apêndice A

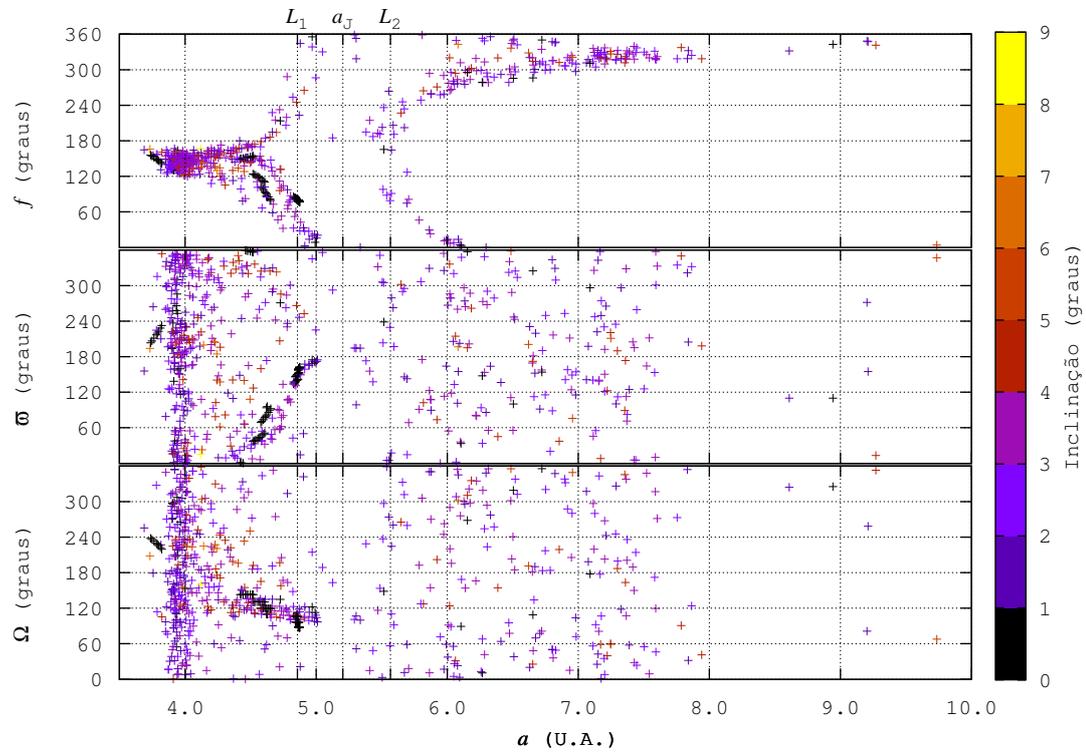


Figura 22: Condições iniciais propícias. Diagramas $(a \times \Omega)$, $(a \times \varpi)$ e $(a \times f)$, do asteróide P1 em relação ao Sol, de baixo para cima, respectivamente.

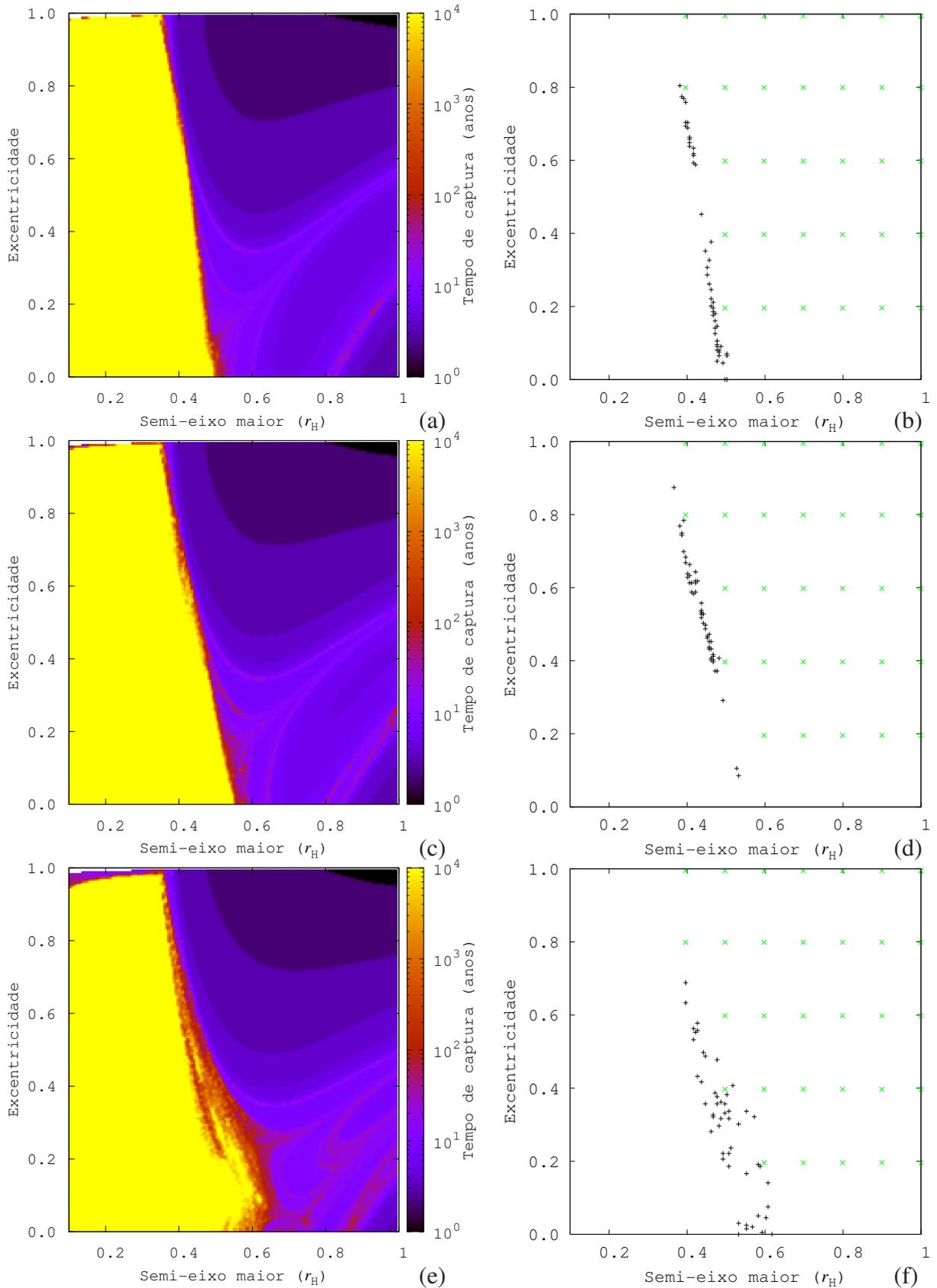


Figura 23: Mapas de tempo de captura na coluna à esquerda. Na coluna à direita, condições iniciais primárias selecionadas, em que pontos denotados por “x” verde e “+” preto representam os casos com tempos de captura menores e maiores que 10^3 anos. Do topo para baixo, os mapas são referentes às inclinações de 20° , 40° e 60° , respectivamente

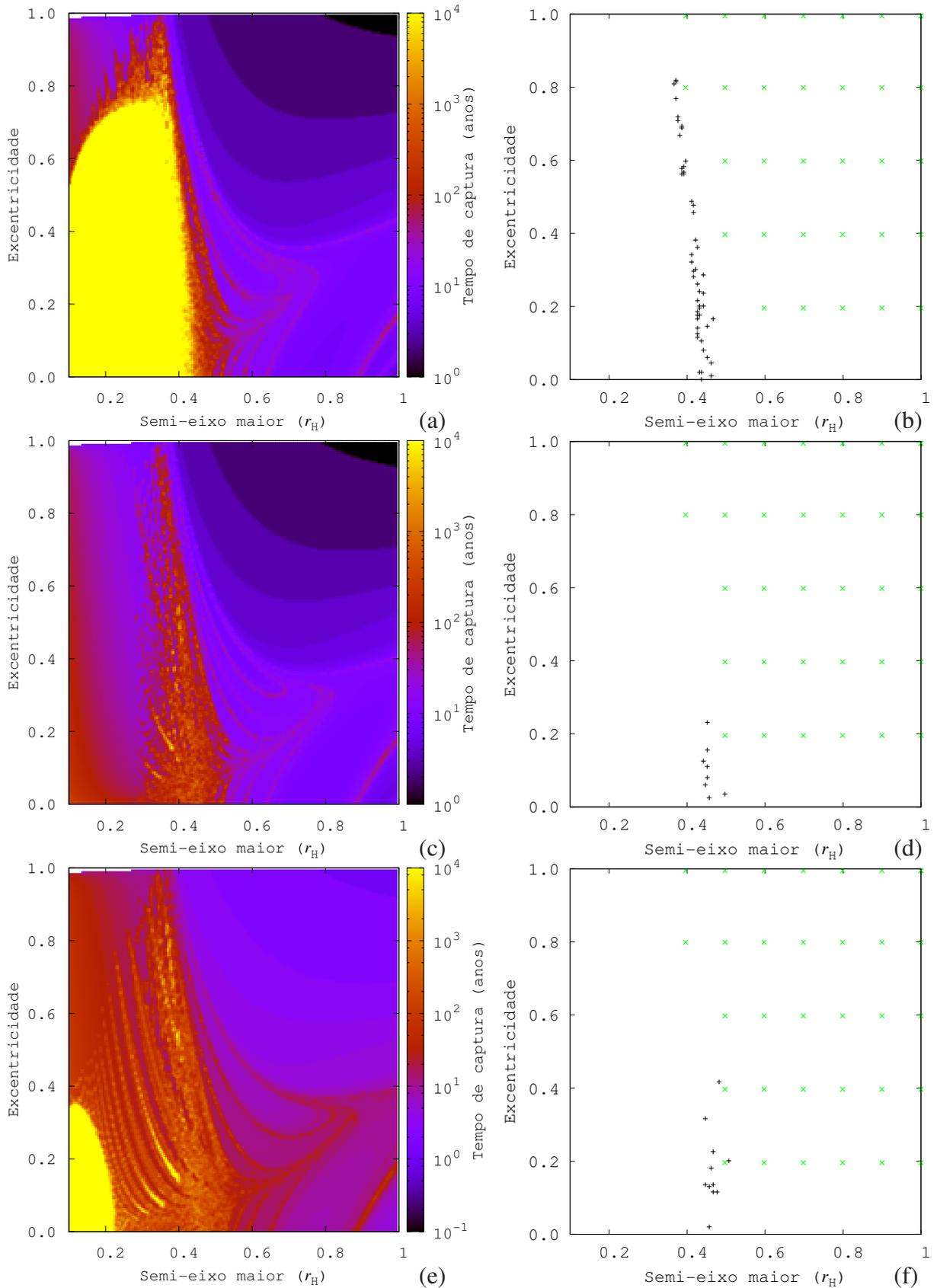


Figura 24: Mapas de tempo de captura na coluna à esquerda. Na coluna à direita, condições iniciais primárias selecionadas, em que pontos denotados por “x” verde e “+” preto representam os casos com tempos de captura menores e maiores que 10^3 anos. Do topo para baixo, os mapas são referentes às inclinações de 80° , 90° e 100° , respectivamente

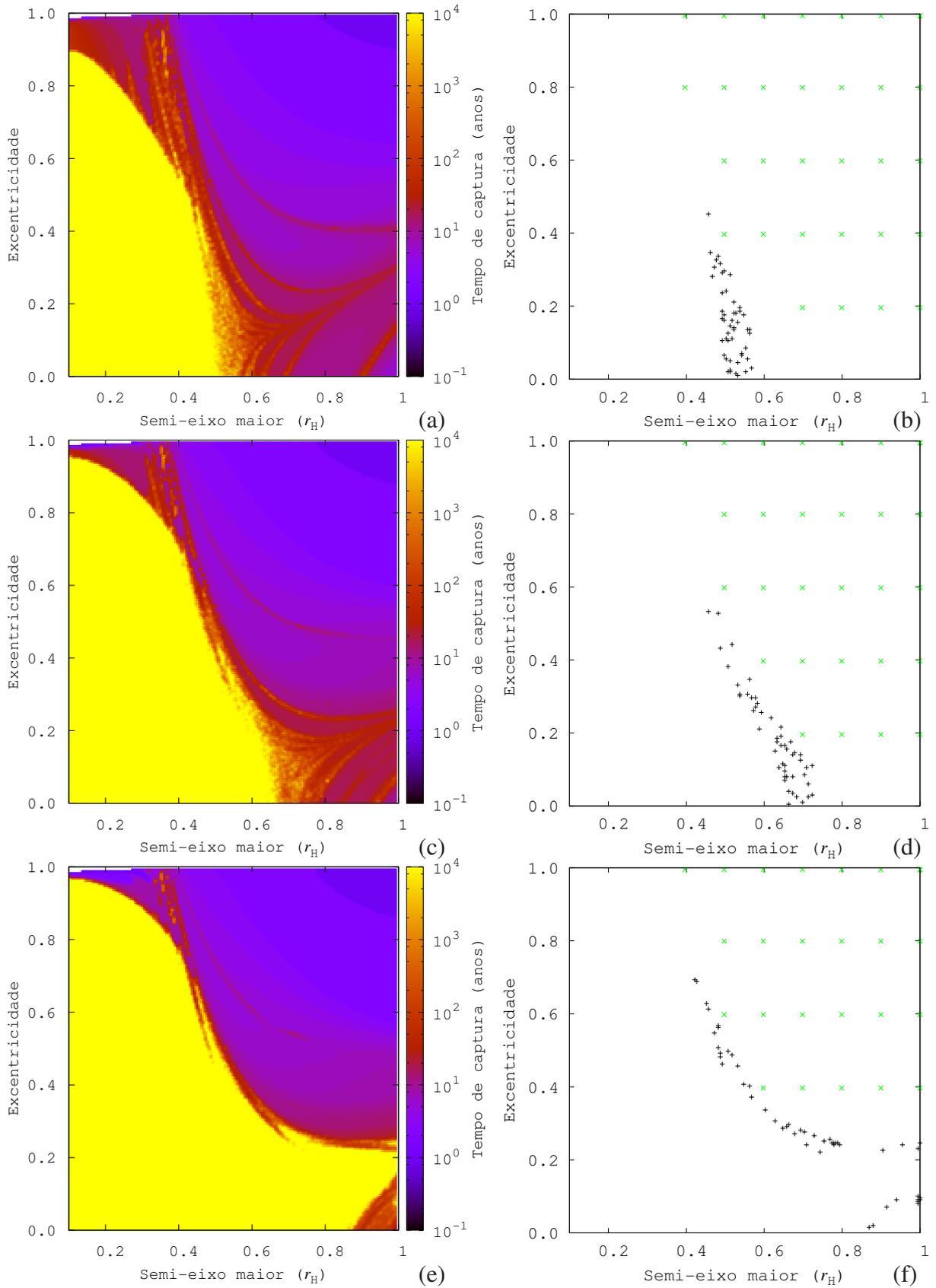


Figura 25: Mapas de tempo de captura na coluna à esquerda. Na coluna à direita, condições iniciais primárias selecionadas, em que pontos denotados por “x” verde e “+” preto representam os casos com tempos de captura menores e maiores que 10^3 anos. Do topo para baixo, os mapas são referentes às inclinações de 120° , 140° e 160° , respectivamente