

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2011

SAYMON HENRIQUE SANTOS SANTANA

SATÉLITES IRREGULARES DE JÚPITER:
ANÁLISE DA CAPTURA DE ASTERÓIDES BINÁRIOS

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Física na área de Dinâmica Orbital

Orientador: Dr. Ernesto Vieira Neto
Co-orientador: Dr. Antônio Delson C. de Jesus


S232s	<p>Santana, Saymon Henrique Santos</p> <p>Satélites Irregulares de Júpiter: Análise da Captura de Asteróides Binários / Saymon Henrique Santos Santana – Guaratinguetá : [s.n], 2011.</p> <p>69 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 67-69</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto</p> <p>Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Delson Conceição de Jesus</p> <p>1. Satélites 2. Asteróides I. Título</p> <p>CDU 629.783</p>
-------	--

SAYMON HENRIQUE SANTOS SANTANA

ESTA TESE 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. Silvia Maria Giuliatti Winter
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ERNESTO VIEIRA NETO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. RODNEY DA SILVA GOMES
Observatório Nacional-RJ


Prof. Dr. TADASHI YOKOYAMA
Unesp-Rio Claro

Fevereiro de 2011

DADOS CURRICULARES

SAYMON HENRIQUE SANTOS SANTANA

NASCIMENTO 21/11/1986 - Ribeira do Pombal/BA

FILIAÇÃO Adevaldo Ribeiro de Santana
Maria Moreira dos Santos Santana

2005 - 2009 Curso de Graduação
Bacharelado em Física - Universidade Estadual de Feira de Santana

2009 - 2011 Curso de Pós-Graduação em Física, nível de Mestrado
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

AGRADECIMENTOS

As palavras contidas nessa seção representam uma tímida maneira de expressar minha gratidão àqueles que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Agradeço a Deus, por todas as assimetrias, anisotropias e singularidades que garantem a nossa labuta diária e tornam o universo cada vez mais pleno.

À minha família (*minha mina de ouro*), pelo amor desmedido dedicado em tempo integral.

Ao meu orientador, prof. Dr. Ernesto Vieira Neto, pelo exemplo profissional a ser seguido, pela paciência e confiança depositada.

Aos professores Dr. Antônio Delson Conceição de Jesus e Dr. Othon Cabo Winter pela amizade, prestatividade e pelas discussões sempre úteis.

A Helton da Silva Gaspar (*Seu menino*) pela imensurável ajuda prestada desde o início do trabalho.

Aos muitos e bons amigos da Bahia, da X-TEAM e da FEG, sem os quais a vida seria menos bela e digna.

Aos demais professores da FEG pela contribuição na minha formação.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para este feito, aqui deixo o meu sincero **muito obrigado!**

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades

- CAPES - Período: 01/03/2009 - 28/02/2011
- FAPESP - Projeto Temático: 2007 - 2011

“Agora... Tragam-me o horizonte”

(Capitão Jack Sparrow)

SANTANA, S. H. S. , **Satélites Irregulares de Júpiter: Análise da Captura de Asteróides Binários**. 2011, 61f. Dissertação (Mestrado em Física) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

Resumo

Neste trabalho, apresentamos um estudo sobre a formação dos satélites irregulares de Júpiter por meio da captura gravitacional de asteróides binários. Analisamos as condições de ruptura/captura para um dos membros de um asteróide binário após um encontro próximo com o planeta considerando um conjunto de condições iniciais do Modelo de Nice. O sistema integrado é composto por quatro corpos: Sol, Júpiter e os membros do asteróide binário. Analisamos também o efeito do achatamento do membro mais massivo do asteróide binário. Nos resultados apresentados é possível perceber a relevância das perturbações, devidas ao Sol e ao achatamento, nos processos de troca de energia e momento angular para que um membro do asteróide torne-se permanentemente capturado. As configurações finais dos asteróides capturados são compatíveis com os objetos reais observados.

PALAVRAS-CHAVE: Satélites Irregulares, Modelo de Nice, Captura Gravitacional, Asteróides Binários.

SANTANA, S. H. S., **Jupiter's Irregular Satellites: Analysis of Binary Asteroid Capture**. 2011, 61f. Dissertation (Master's degree in Physics) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

Abstract

In this work, we present a study on the irregular Jupiter's satellites formation by gravitational capture of binary asteroids. We analyze the conditions of capture to one or two members of the binary asteroid after a close-approach with the planet considering a set of initial conditions derived from Nice Model. Our system is composed of four bodies: Sun, Jupiter and the members of the binary asteroid. We also analyzed the oblateness effect of the bigger member of binary asteroid. The presented results showed the relevance of perturbations, due to Sun and the oblateness, in the process of exchange of energy and angular momentum for a member of the asteroid who will become permanently captured. The final configuration of captured asteroids are compatible with the real objects observed.

KEYWORDS: Irregular Satellites, Nice Model, Gravitational Capture, Binary Asteroids.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Satélites Naturais Planetários	13
1.2	Asteróides binários	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3	MODELO DE CAPTURA	27
3.1	Integração Inicial	27
3.2	Montagem do Asteróide Binário	28
4	RESULTADOS	33
4.1	Casos Sem o Sol	33
4.2	1ª Série de Simulações com o Sol	37
4.2.1	Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados	37
4.2.2	Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente	38
4.3	2ª Série de Simulações com o Sol	39
4.3.1	Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados	40
4.3.2	Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente	41
4.4	3ª Série de Simulações com o Sol	42
4.4.1	Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados	42
4.4.2	Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente	43
4.5	Condições Propícias	45
4.6	Casos com $m_{P_2} = 1 \times 10^{18}$ kg	48
4.7	Análise de T2	51

5	SIMULAÇÕES COM ACHATAMENTO	53
5.1	Condições Propícias	55
5.1.1	Condições Propícias obtidas com o Achatamento	55
5.1.2	Condições Propícias obtidas sem o Achatamento	56
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES	63
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O estudo do universo, em particular do Sistema Solar, constitui uma importante etapa na busca humana do entendimento do mundo no qual está inserido. Nessa perspectiva, a análise de sistemas singulares, como os satélites planetários irregulares, conduz a ciência ao engrandecimento da compreensão acerca de inúmeros outros fenômenos com características peculiares.

1.1 Satélites Naturais Planetários

No contexto da dinâmica orbital os satélites naturais são conhecidos como corpos celestes que orbitam corpos primários maiores que eles. Atualmente são conhecidos cerca de 350 satélites naturais do Sistema Solar, dos quais 167 são classificados como planetários. Com exceção de Mercúrio e Vênus, todos os planetas do Sistema Solar possuem satélites.

A origem dos satélites naturais está intimamente ligada ao processo de formação dos respectivos planetas primários e conseqüentemente relacionado com a origem do Sistema Solar. A tabela 1.1 mostra algumas características dos planetas do Sistema Solar que possuem satélites.

As características orbitais desses objetos permitem classificá-los em diferentes grupos, regulares e irregulares (Peale, 1999). Satélites regulares sub-dividem-se ainda em regulares clássicos, cujo diâmetro médio é da ordem de centenas ou milhares de quilômetros, e destroços colisionais cujo diâmetro é muito menor atingindo poucas centenas de quilômetros.

Tabela 1.1: Número de satélites planetários do Sistema Solar, as colunas são m_p , r_p , a_p e r_h são respectivamente a massa do planeteta, o raio médio equatorial e o raio de Hill do planeta

Planeta	$m_p[10^{24}kg]$	$r_p[km]$	$a_p [UA]$	$r_h [UA]$	Regulares	Irregulares
Terra	5.9736	6378	1.00	1.00×10^{-2}	0	1
Marte	0.64185	3394	1.52	7.23×10^{-3}	0	2
Júpiter	1898.6	71398	5.20	3.55×10^{-1}	8	55
Saturno	568.46	60330	9.54	4.36×10^{-1}	22	39
Urano	86.832	26200	19.19	4.61×10^{-1}	18	9
Netuno	102.43	25255	30.07	7.75×10^{-1}	6	7

Os satélites regulares conhecidos têm suas órbitas confinadas numa região de até $0.05 r_H$, onde r_H é o Raio de Hill (Murray & Demott 1999) é dado por:

$$r_H = a_p \left(\frac{m_p}{3M} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.1)$$

onde a_p , m_p e M são respectivamente o semi-eixo maior da órbita do planeta, massa do planeta e a massa do Sol.

Diferentemente dos satélites regulares, os irregulares, caracterizam-se pelos elevados valores de semi-eixo, excentricidade e inclinação. Essas peculiaridades orbitais sugerem que a formação desses objetos não tenha ocorrido em conjunto com a formação do planeta hospedeiro, além disso, a análise espectral revela uma composição diferente do material dos satélites regulares. Essas evidências indicam que esses corpos tenham sido fruto de um processo de captura gravitacional após um encontro próximo com o planeta.

O fato desses corpos estarem consideravelmente afastados do planeta faz com que a precessão do seu plano orbital seja controlada primariamente pelo Sol. Num sistema cartesiano planetocêntrico, o potencial devido ao terceiro corpo (no caso o Sol) é dado em Brouwer and Clemence (1961) por:

$$R_{\odot} = k^2 M_{\odot} r^2 \left[\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_{\odot}|} - \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}_{\odot}}{|\vec{r}|^3} \right] \quad (1.2)$$

onde k é a constante gravitacional, M_{\odot} é a massa do Sol, \vec{r} é o vetor posição do satélite em relação ao planeta e \vec{r}_{\odot} do planeta relativo ao Sol.

Expandindo a expressão 1.2 em polinômios de Legendre até a 2ª ordem para a

razão r/r_\odot , obtemos:

$$R_\odot = \frac{k^2 M_\odot r^2}{r_\odot^3} \left[-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cos^2 S \right] \quad (1.3)$$

em que S é a distância angular entre o satélite e a eclíptica.

Se o plano equatorial do planeta é tomado como o plano de referência, podemos escrever

$$\cos S = \cos(f + g) \cos(f_\odot + g_\odot) + \sin(f + g) \sin(f_\odot + g_\odot) \cos I \quad (1.4)$$

onde f e f_\odot são as anomalias verdadeiras do satélite e do Sol, respectivamente, g e g_\odot são os argumentos do pericentro do satélite e do Sol, respectivamente, I é a inclinação da órbita do satélite relativa a órbita do Sol.

Com base nessas considerações e fazendo uso de algumas relações conhecidas do problema de dois corpos podemos reescrever a equação 1.3 como:

$$R_\odot = \frac{M_\odot}{(M + M_\odot)} \frac{n_\odot^2 a^2}{(1 - e_\odot^2)^{\frac{3}{2}}} \times \left[\frac{1}{8} \left(1 + \frac{3}{2} e^2 \right) (3 \cos^2 I - 1) + \frac{15}{16} e^2 \sin^2 I \cos 2g \right] \quad (1.5)$$

onde $n_\odot^2 a_\odot^3 = k^2 (M + M_\odot)$, em que n_\odot e a_\odot são respectivamente o movimento médio e o semi-eixo do Sol.

O efeito do achatamento do planeta hospedeiro também é relevante na dinâmica dos satélites irregulares. Tomando um sistema referencial com origem no centro de massa do planeta e coincidente com seu equador, o potencial devido ao achatamento é dado em Brouwer and Clemence (1961) por:

$$U = \frac{k^2 M_P}{r} \left[1 - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{J_k a_P^k}{r^k} P_k(\sin \Phi) \right] \quad (1.6)$$

onde M_P é a massa do planeta, J_k é o harmônico zonal de ordem k , a_p é o raio equatorial médio do planeta, P_k é o polinômio de Legendre de ordem k e Φ é a latitude do satélite.

Tomando até a segunda ordem na expressão acima até o termo $k = 2$, ficamos com:

$$U = \frac{k^2 M_P}{r} \left[1 - J_2 \left(\frac{a_P}{r} \right)^2 P_2(\sin \Phi) \right] \quad (1.7)$$

Podemos reescrever a Equação 1.7 como a soma de dois potenciais $U = U_1 + U_2$, onde U_1 corresponde ao potencial do problema de dois corpos e U_2 devido ao achatamento. Utilizando o polinômio de Legendre de ordem 2 temos:

$$U_2 = \frac{k^2 M J_2}{r^3} a_P^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \sin^2 \Phi \right) \quad (1.8)$$

usando a trigonometria esférica podemos escrever:

$$\sin \Phi = \sin i \sin (f + g) \quad (1.9)$$

onde f é a anomalia verdadeira do satélite, ω o argumento do pericentro da órbita e I a inclinação relativa ao plano equatorial planetário.

Aplicando a 1.9 em 1.8 e tomando a média¹ em relação à anomalia média do satélite ficamos com:

$$R_{J_2} = \langle U_2 \rangle_l = \frac{1}{4} n^2 a_P^2 \frac{1}{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}} J_2 (3 \cos^2 i - 1) \quad (1.10)$$

onde n é o movimento médio do planeta em torno do Sol ($n^2 a^3 = k^2 (M_\odot + M_P)$) e e a excentricidade planetária. Se o plano orbital do planeta é tomado como referência, podemos escrever a inclinação i do satélite (relativa ao equador do planeta) como:

$$\cos i = \cos I \cos \varepsilon - \sin I \sin \varepsilon \cos h \quad (1.11)$$

onde ε é a obliquidade do planeta (i.e. a inclinação do plano orbital em relação ao equador do planeta), h é a longitude do nodo ascendente do satélite. Igualando as equações 1.5 e 1.10 para os casos em que e , ε e I são nulos, podemos obter uma equação aproximada para a distância crítica em que as perturbações devidas ao Sol e ao achatamento são iguais.

$$a_{crit} = \left[2 \frac{M}{M_\odot} J_2 a_\odot^3 a_P^2 (1 - e_\odot^2)^{3/2} \right]^{1/5} \quad (1.12)$$

Para os satélites irregulares onde perturbação solar é dominante sobre o efeito do

¹Aqui a média de uma função $F(x_1, \dots)$, em relação à variável x_1 , é dada por $\langle F \rangle_{x_1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x_1, \dots) dx_1$

achatamento, o valor de semi-eixo maior maior que valor crítico. Em Júpiter, os satélites regulares são divididos em dois grupos:

- **Grupo Amalteia** que consiste de um grupo de quatro pequenos satélites, com diâmetro menor que 200 km, baixas inclinações e raio orbital menor que 2×10^5 km.
- **Grupo dos Galileanos** composto por quatro satélites, descobertos por Galileu em 1610, com órbitas entre 4×10^5 km e 2×10^6 km

Os satélites irregulares de Júpiter, mostrados na tabela 1.2 contabilizam atualmente 55, dos quais 49 possuem órbitas retrógradas ($i > 90^\circ$).

Tabela 1.2: Satélites irregulares de Júpiter. Extraído de (www.dtm.ciw.edu, 2010). As linhas separam as famílias de satélites. 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.

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

Continua na próxima página...

Tabela 1.2 – Continuação

Nome	a	e	I	Ω	ω	Raio	Descoberta
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
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

Continua na próxima página...

Tabela 1.2 – Continuação

Nome	a	e	I	Ω	ω	Raio	Descoberta
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

Embora uma série de mecanismos de captura tenham sido propostos, várias incertezas envolvendo principalmente o histórico evolutivo do Sistema Solar, fazem com que a origem dos satélites irregulares ainda seja um assunto controverso. Desta forma, vários mecanismos de captura são inseridos nos mais diversos trabalhos afim de explicar o atual cenário observado.

1.2 Asteróides binários

O termo asteróide binário refere-se a um par de asteróides que orbitam seu centro de massa. A estrutura desse tipo de sistema varia em diversos aspectos que vão desde a forma e composição dos corpos até a razão das massas. Nessa perspectiva já foram observados na natureza, desde corpos de massas equivalentes até asteróides orbitados por pequenos satélites. O uso da sonda Galileu em 1993, com recursos mais avançados, tornou possível a detecção de um satélite de (243) Ida, batizado de Dactyl (Belton & Carlson,

1994), mostrada na Figura 1.1, sendo esta considerada a primeira evidência da existência de asteróides binários.



Figura 1.1: (243) Ida e seu satélite Dactyl. Primeira imagem de um asteróide binário descoberto no Sistema Solar, obtida pela sonda Galileu em agosto de 1993. (FONTE: NASA/JPL)

Os asteróides binários conhecidos atualmente no Sistema Solar encontram-se nas três principais populações de corpos menores:

- **Cinturão principal de asteróides** - Grupo de asteróides cujas órbitas estão compreendidas entre as órbitas de Marte e Júpiter.
- **NEA** (*Near Earth Asteroids*): Asteróides que orbitam regiões próximas às regiões da órbita terrestre.
- **TNO** (*Trans-Neptunian Objects*) : Objetos cujas órbitas estão externas à órbita de Netuno.

As tabelas 1.3, 1.4 e 1.5, a seguir, mostram os asteróides binários conhecidos atualmente que se encontram no Cinturão Principal, entre os NEA's e entre os TNO's.

Tabela 1.3: **Asteróides binários conhecidos 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) Lundia	-	-	1	0,64
(9069) Hovland	-	-	0,3	-
(617) Patroclus	685	11	0,92	2,391 ou 4,287

Tabela 1.4: **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 1.5: **Asteróides binários Trans-netunianos (TNO)**. (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}	e_B	Período (horas)
(88611) 2001 QT ₂₉₇	27,300	410	0,72	0,240	825
1998 WW ₃₁	22,300	300	0,73	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

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As primeiras observações de satélites irregulares datam de meados do século XIX, tendo sido esse processo continuado com o uso de mecanismos observacionais mais modernos, até tempos recentes. O mecanismo mais provável de ser o responsável pela sua origem é o processo de captura após um encontro próximo com o planeta, enquanto que, as características orbitais dos satélites regulares corroboram a teoria de formação local por meio da acreção de matéria do disco circumplanetário equatorial do planeta (Vieira Neto & Winter, 2001; Sheppard & Jewitt, 2003). Inspirado pela peculiaridade orbital desses objetos diversos trabalhos buscam explicar o mecanismo mais provável que tenha ocorrido durante o processo de captura.

Pollack, Burns & Tauber (1979) mostraram como objetos em órbitas heliocêntricas podem ser capturados pelo arrasto sofrido no envelope gasoso do planeta. Esse mecanismo funcionaria também como um seletor de corpos, pois para corpos massivos o gás não ofereceria resistência suficiente para torná-lo um satélite, todavia, a resistência oferecida para corpos pequenos é demasiadamente grande, o que levaria a um espiralamento da órbita e conseqüente colisão com o planeta. Os corpos classificados na faixa de tamanho/massa intermediária sofreriam a dissipação de energia necessária para se tornarem capturados permanentemente. Este processo de arrasto atmosférico, entretanto, restringe o período de ocorrência das capturas ao período final de formação do planeta.

Além disso, o processo de dissipação de energia devido ao arrasto, deveria ocorrer em poucos milhares de anos, do contrário induziria o espiralamento da órbita e conseqüente colisão com o planeta.

Heppenheimer & Porco (1977) sugeriram um mecanismo, denominado “*pull-down*

capture”, baseado na hipótese de um corpo temporariamente capturado tornar-se permanentemente capturado devido ao aumento do raio de Hill e consequente aumento na esfera de estabilidade. Esse aumento no raio de Hill poderia ter ocorrido devido ao aumento na massa do planeta, migração planetária para regiões mais afastadas do Sol e/ou diminuição da massa solar. Pollack et al (1996) mostraram que a viabilidade desse mecanismo dependeria de variações de 40% na massa do planeta, entretanto, em análises mais recentes, Vieira Neto et al. (2004, 2006) mostraram que variações de massa da ordem de 10% tornariam esse mecanismo viável. Por outro lado a hipótese de aumento do raio de Hill devido à migração para regiões mais afastadas do Sol é pouco provável devido ao fato de que a migração deveria ocorrer em um intervalo de tempo pequeno, o que acarretaria na desestabilização dos satélites existentes (Beaugé et al., 2002).

Colombo & Franklin (1971), Tsui (2000); Astakhov et al. (2003); Funato et al. (2005), postularam um mecanismo de troca de energia devido a encontros próximos. Esse modelo propõe a variação dos elementos orbitais de um corpo temporariamente capturado após a interação com outros corpos existentes no interior da esfera de Hill do planeta. Essa variação na energia do corpo o tornaria permanentemente capturado. A base dinâmica dos corpos envolvidos (Sol, Planeta e partículas) é vantajosa a medida em que não é necessário supor presença de disco de gás, migração planetária ou aumento na massa do planeta, o que torna o modelo pertinente em qualquer época do desenvolvimento do Sistema Solar.

Agnor & Hamilton (2006) apresentaram um novo modelo de captura para o caso de Tritão, desde então diversos modelos de captura de asteróides binários têm sido estudados (Vokrouhlický et al., 2008). Estes modelos consideram a interação de três corpos, tendo o planeta como único primário e dois corpos menores de massa negligenciável em relação à massa do primário. O mecanismo consiste na captura de um dos membros do binário, inicialmente em órbita heliocêntrica, todavia sem a perturbação solar, após um encontro próximo com o planeta, o sistema binário se rompe devido a forças de maré que atuam sobre o par durante o “*close-approach*”.

No instante da ruptura o processo de troca de energia faz com que um dos membros sofra uma redução na sua velocidade relativa ao planeta, ficando assim com velocidade menor que a velocidade de escape, dessa forma tornando-se capturado.

Ainda nessa perspectiva, Gaspar et al. (2009) sugerem a formação dos satélites irregulares de Júpiter através do processo da captura de asteróides binários em um sistema

planar de quatro corpos (Sol, planeta e binário). Neste trabalho, embora haja a inclusão da perturbação solar, foram analisadas as capturas de binários cujas condições iniciais escolhidas eram propícias à posterior captura. Mesmo as condições iniciais não estando relacionadas com nenhum modelo de formação do Sistema Solar esse trabalho apresenta as configurações mais prováveis para o rompimento do binário e consequente captura permanente.

Trabalhos recentes de Brasil et al (2010) mostram uma análise semi-analítica para o estudo da estabilidade dos satélites regulares e da origem de satélites irregulares de Júpiter no período da migração planetária descrita no cenário evolutivo do Modelo de Nice. De maneira similar Nesvorný et al. (2007) apresentaram um modelo de captura gravitacional de asteróides num sistema de três corpos (Planeta e asteróide binário), usando condições iniciais baseadas no mesmo cenário de evolução do Sistema Solar. Neste trabalho, as capturas acontecem devidos aos encontros próximos entre os planetas durante a migração planetária.

Dessa maneira, faz-se necessário a existência de um outro mecanismo para explicar a origem dos satélites planetários irregulares de Júpiter.

Capítulo 3

MODELO DE CAPTURA

Neste Capítulo apresentamos a metodologia utilizada no desenvolvimento desse trabalho desde o desenvolvimento das condições iniciais utilizadas na integração até a lógica adotada na análise dos dados. A simulação inicial é apresentado em Nogueira (2008) com base no cenário de evolução do Sistema Solar do *Modelo de Nice* (Tisganis et al., 2005; Gomes et al., 2005; Morbidelli et al., 2005). O principal objetivo desta etapa foi desenvolver as condições iniciais necessárias para uma posterior análise da captura gravitacional dos satélites irregulares.

3.1 Integração Inicial

O sistema inicial é formado pelo Sol, quatro planetas gigantes e pelo disco de planetesimais. Neste Sistema Solar, mais compacto que o atual, os planetas estão formados em órbitas quase circulares e quase coplanares entre 5 U.A. e 15 U.A. e assim como no *Modelo de Nice*, Júpiter e Saturno estão próximos da ressonância 2:1, de modo que os semi-eixos iniciais de Júpiter, Saturno, Urano e Netuno são respectivamente $a_J = 5.45$ U.A., $a_S = 8.18$ U.A., $a_U = 11.5$ U.A. e $a_N = 14.2$ U.A.. O disco de planetesimais, formado por 10^4 partículas de mesma massa, possui massa total de 35 massas terrestres e é tomado exterior às órbitas dos planetas, estando contido no intervalo entre 14.5 U.A. e 34.0 U.A., com uma distribuição de massa variando com r^{-1} , baixas excentricidades e inclinações.

Para minimizar o tempo de integração os planetesimais são considerados como pontos de massa, o que implica na impossibilidade de colisões entre os mesmos. Dessa

forma, consideramos apenas que os planetas interagem entre si e são perturbados pelos planetesimais, porém não consideramos as interações mútuas entre estes últimos.

O tempo total de integração é de $4,5 \times 10^9$ de anos com um passo de integração igual a $1/20$ do período orbital do planeta mais interno. Uma vez que o interesse desse trabalho é investigar o processo de formação dos satélites irregulares de Júpiter, a cada passo de integração registramos o estado de todas as partículas que tiveram encontro próximo (distância menor que 1 U.A.) com Júpiter durante tempo de integração.

Resultados de Tsui (1999, 2000) mostram que um asteróide pode ser capturado permanentemente devido a reações de troca de energia com um dado satélite do planeta. Dessa forma é plausível inferir que o processo de captura de um dos membros do binário possa ocorrer devido às reações de troca de energia e momento.

Uma vez que os asteróides binários estão inicialmente em órbitas heliocêntricas, a energia individual de cada um dos seus membros é maior que a energia de escape, isto é, a energia mínima para permitir que um asteróide escape individualmente de uma captura por Júpiter.

O fato dos membros do asteróide orbitarem a uma distância pequena do centro de massa aliado às perturbações exercidas pelo planeta proporciona intensas trocas de energia e momento angular, o que culminará na ruptura do binário. Todavia, devido aos processos de troca de energia ocorridas até este instante, após a ruptura cada um dos membros terão estados de energia diferentes. Conseqüentemente, a energia de um deles poderá ser inferior à energia de escape.

Dessa forma, baseando-se no modelo de captura de asteróides binários, analisamos estatisticamente a viabilidade do mecanismo de formação dos satélites irregulares por meio da captura de um dos membros do binário.

3.2 Montagem do Asteróide Binário

Uma vez que, ao final da integração original, os estados das partículas que tiveram encontro próximo com Júpiter geraram um banco de dados com os vetores de estado de cada planetesimal potencialmente capaz de tornar-se capturado por Júpiter, a segunda etapa é adicionar para cada um dos corpos registrados um segundo membro de modo a formar um par de asteróides de órbita inicialmente heliocêntrica.

A Figura (3.1) mostra o registro heliocêntrico dos corpos que tiveram, encontro próximo com Júpiter, nas Figuras 3.2 (a), (b) e (c) são mostradas os registros relativo a Júpiter, dos corpos do disco de planetesimais que tiveram encontros próximos.

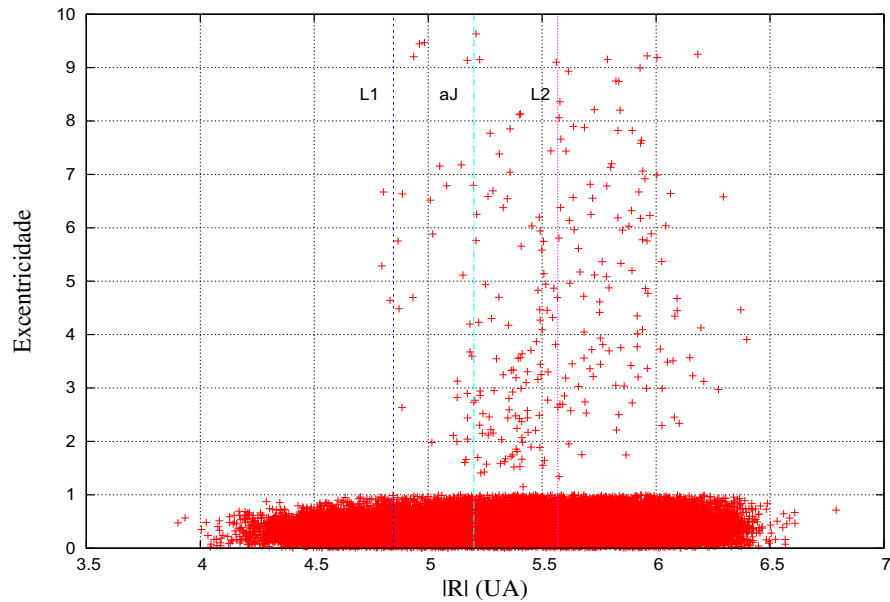


Figura 3.1: Diagrama de distância radial versus excentricidade (relativo ao Sol) dos planetesimais registrados no instante final da integração inicial. As linhas verticais (estapoadas) indicam a localização dos pontos Lagrangeanos L_1 e L_2 e o semi-eixo maior atual de Júpiter. Cada sinal corresponderá a uma condição inicial do membro mais massivo do binário.

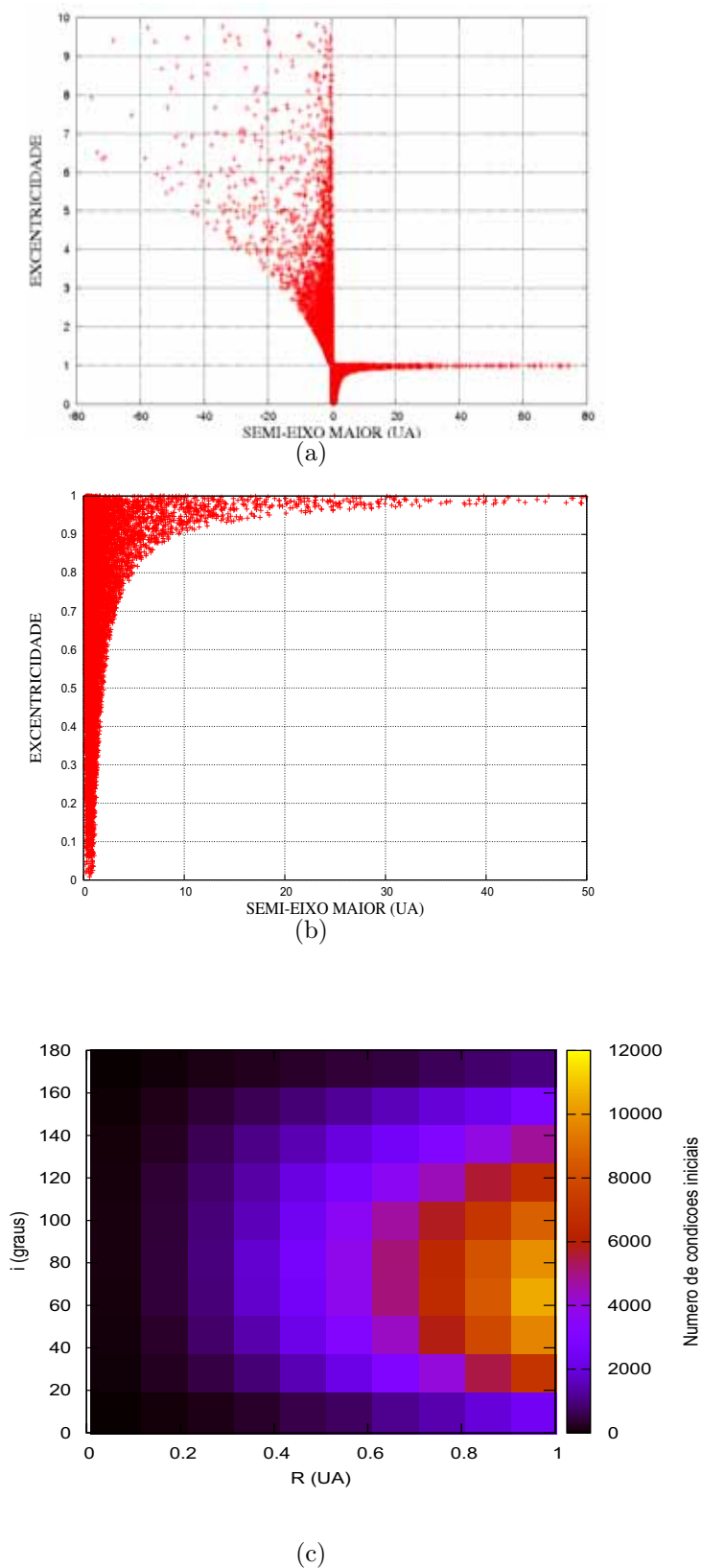


Figura 3.2: Na figura (a) é apresentado um diagrama de semi-eixo por excentricidade em relação a Júpiter, na Figura (b) o mesmo diagrama apenas com os corpos que têm $e < 1$ e $a > 0$. Na Figura (c) é mostrado um histograma de distância radial por inclinação (relativa a Júpiter) com o respectivo número de planetesimais registrados durante a integração inicial.

Na Figura 3.3 é apresentado um diagrama de posição por excentricidade para os planetesimais com $e < 10$ em relação a Júpiter. Os pontos na parte negativa do eixo das abcissas representam as condições iniciais internas à órbita de Júpiter, os pontos externos as condições externas à órbita de Júpiter.

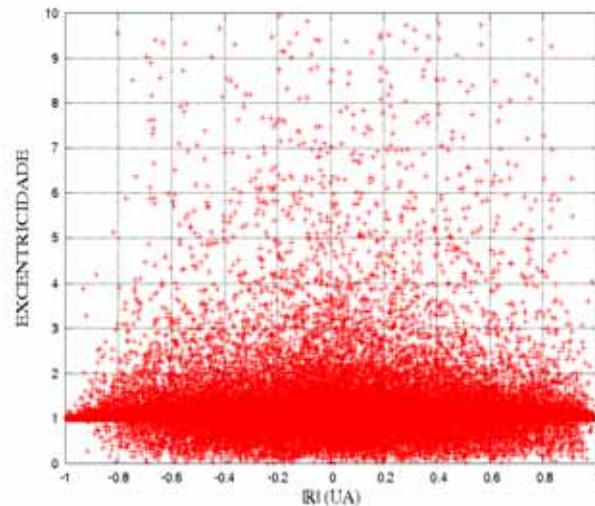


Figura 3.3: Diagrama de distância radial por excentricidade em relação a Júpiter (para os casos com $e < 10$). Os pontos na parte negativa do eixo das abcissas são as condições iniciais internas à órbita de Júpiter, os pontos na parte positiva representam as condições externas à órbita.

Em cada série de integrações cada uma das condições iniciais extraídas do Modelo de Nice serão convertidas em um asteróide binário, de modo que membro mais massivo do binário e de raio 50 km, doravante denominado P1, assumirá os valores de posição e velocidade do planetesimal. Orbitando o corpo P1, é adicionado o segundo membro do binário (P2) de massa menor ($m_{P1} = 10m_{P2} = 10^{20}kg$) e raio 25 km. Portanto, neste estudo estamos considerando um sistema de 4 corpos nos quais Sol e Júpiter são os primários e os membros do asteróide binário como partículas em relação aos primários.

O tempo de integração utilizado foi de 10^4 anos com um passo de saída de 10 horas, realizada com o uso do integrador com espaçamento Gauss-Radau (Everhart, 1985). Para otimizar o processo computacional o algoritmo foi modificado para gravar apenas as etapas mais relevantes de cada trajetória.

- T1: Instante em que a energia do asteróide binário em relação a Júpiter torna-se negativa, caracterizando uma captura temporária;

- T2: Instante no qual ocorre a ruptura do asteróide binário, definido quando a energia de dois corpos de P1 e P2 fica positiva;
- T3: Instante em que a energia de apenas um dos membros do asteróide binário relativa a Júpiter fica positiva, caracterizando o escape desse objeto e uma captura, ao menos temporária, do ente que permaneceu nas vizinhanças de Júpiter;
- TF: Instante final da trajetória.

Com base nos valores de energia de dois corpos e da constante de Jacobi, dada em Murray & Dermott (1999) por, calculadas pelo algoritmo durante a integração, é possível inferir o estado de cada um dos membros do asteróide, identificando se houve ruptura, captura, colisão ou escape dos corpos.

Capítulo 4

RESULTADOS

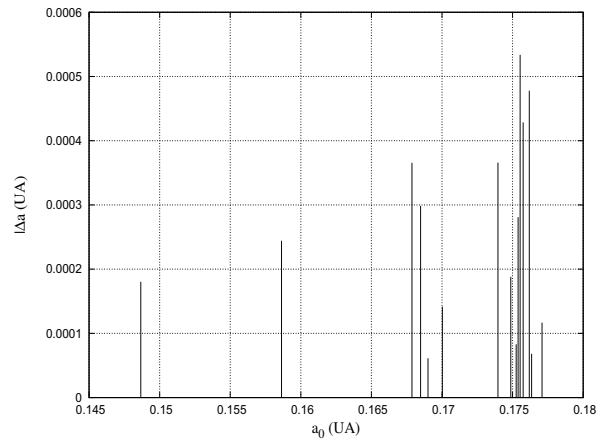
Neste capítulo apresentamos os resultados provenientes das diversas séries de simulações realizadas. Também são mostrados os respectivos percentuais de captura em cada série.

4.1 Casos Sem o Sol

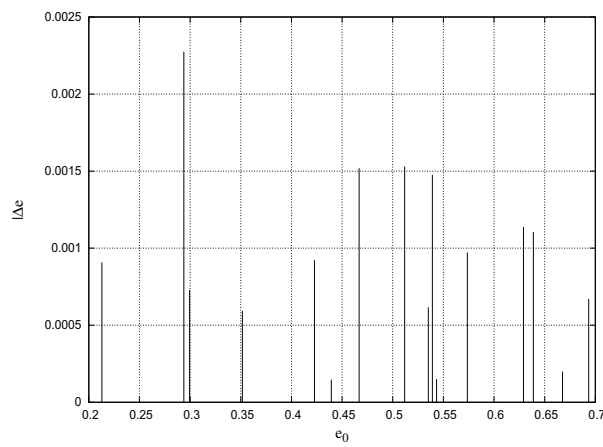
Nesta primeira etapa realizamos uma integração do sistema utilizando as condições iniciais do Modelo de Nice com um modelo de três corpos (Júpiter e asteóride binário), ou seja, sem a presença da perturbação solar. Para este caso não foi obtido um quantidade significativa¹ de capturas para condições iniciais hiperbólicas, ou seja, captura de um corpo que não estava inicialmente já capturado por Júpiter.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas as variações de semi-eixo, excentricidade e inclinação, em relação a Júpiter, desde o instante inicial ($t = 0$) até o final da integração para os corpos capturados com $a < 0.5R_H$ e $e < 0.7$.

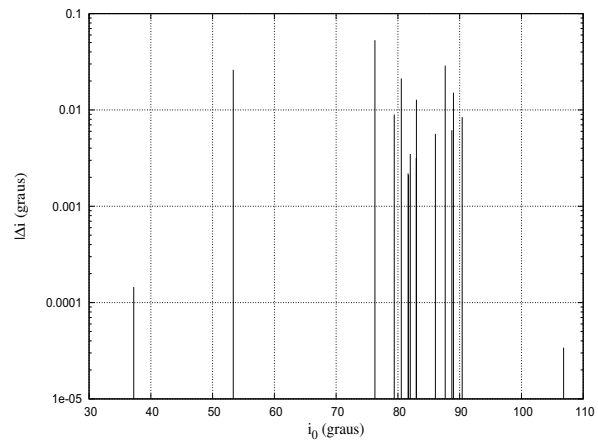
¹Houveram apenas dois casos de captura a partir de órbita hiperbólica, ambos com $a \gg 1\text{UA}$ e $e \approx 0.99$



(a)

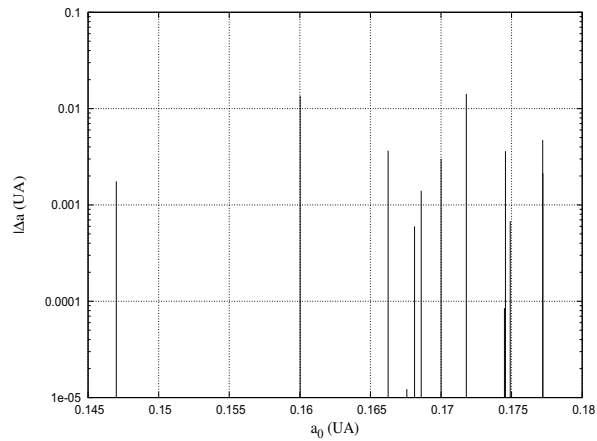


(b)

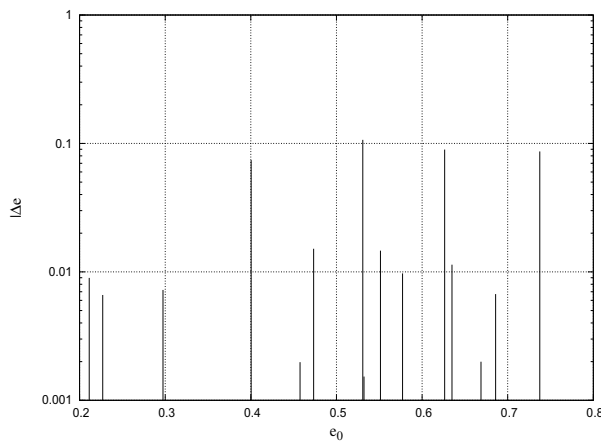


(c)

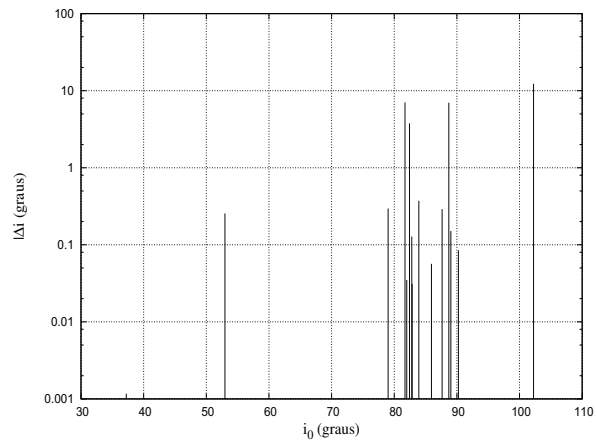
Figura 4.1: Variação dos elementos orbitais, para os casos de captura de P1 com $a < 0.5R_H$ e $e < 0.7$, em relação ao elemento orbital no instante inicial. Semi-eixo, excentricidade e inclinação, relativos a Júpiter, em (a), (b) e (c) respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2: Variação dos elementos orbitais para os casos de captura de P2 com $a < 0.5R_H$ e $e < 0.7$, em relação ao elemento orbital no instante inicial. Semi-eixo, excentricidade e inclinação, relativos a Júpiter, em (a), (b) e (c) respectivamente.

As Figuras 4.3 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os diagramas de semi-eixo maior por excentricidade e semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados com $a \leq 0.5R_H$ e $e < 0.7$ para as simulações sem o Sol. Para estes casos as capturas possuem

órbitas com valores de semi-eixo maiores que os objetos reais.

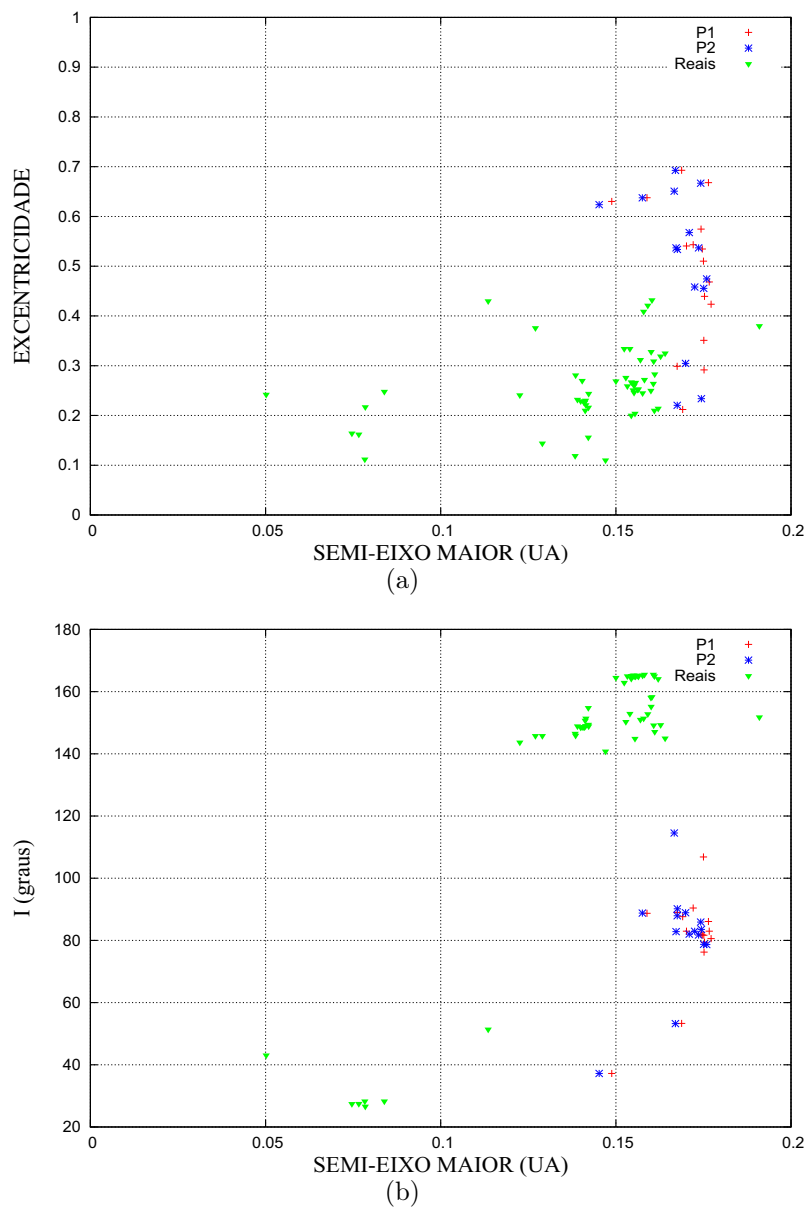


Figura 4.3: Diagrama semi-eixo versus excentricidade dos asteróides capturados com $a \leq 0.5_{RH}$ e $e < 0.7$ nas simulações sem o Sol. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

4.2 1ª Série de Simulações com o Sol

Neste primeiro conjunto de simulações considerando a perturbação solar, foram integradas 5.4×10^4 condições iniciais. Nesta primeira série os elementos orbitais iniciais do P2 relativo ao P1 são $e = 0$, $i = \Omega = w = M = 0^\circ$, a distribuição do semi-eixo maior inicial é mostrada na Figura 4.4.

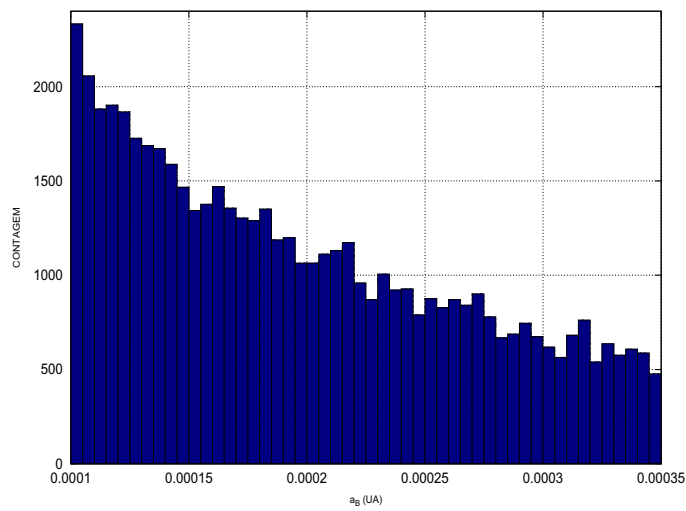


Figura 4.4: Histograma dos valores dos semi-eixos maiores iniciais do binário.

4.2.1 Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados

A análise do estado final desta série de simulações mostrou uma porcentagem de capturas de $\approx 0.044\%$, o que corresponde a aproximadamente quatro capturas em cada 10^4 condições iniciais integradas. As Figuras 4.5 (a) e (b) mostram (em relação ao Sol e a Júpiter, respectivamente) as condições iniciais que geraram capturas. Neste caso as condições iniciais cuja excentricidade relativa ao Sol eram >1 não promoveram captura em nenhuma das séries de simulações.

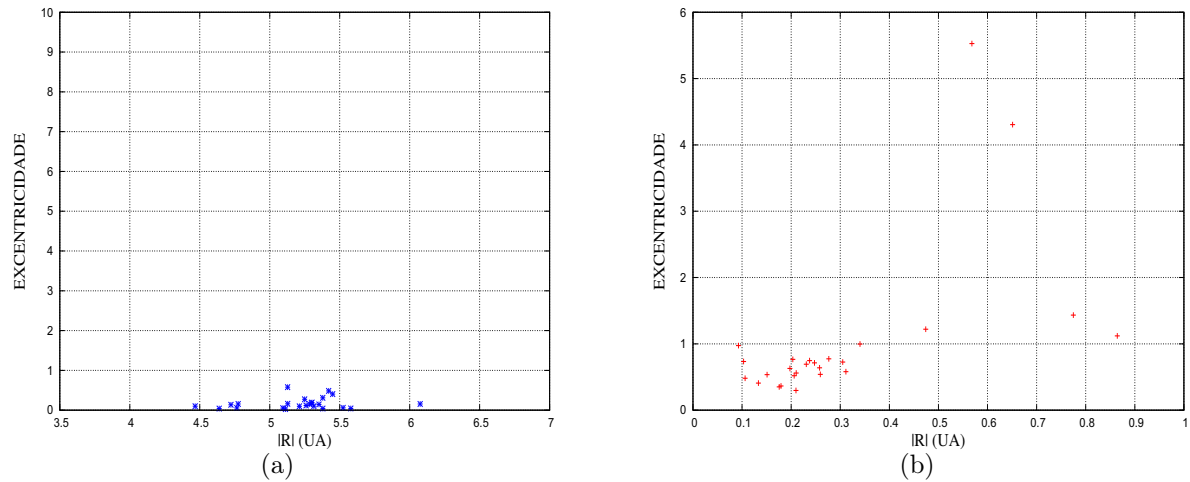


Figura 4.5: Diagramas de distância radial por excentricidade (relativo ao Sol em (a) e a Júpiter em (b)) das condições iniciais que promoveram captura na 1^a série de simulações.

4.2.2 Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente

As Figuras 4.6 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os diagramas de semi-eixo maior por excentricidade e semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente comparados com os satélites reais de Júpiter.

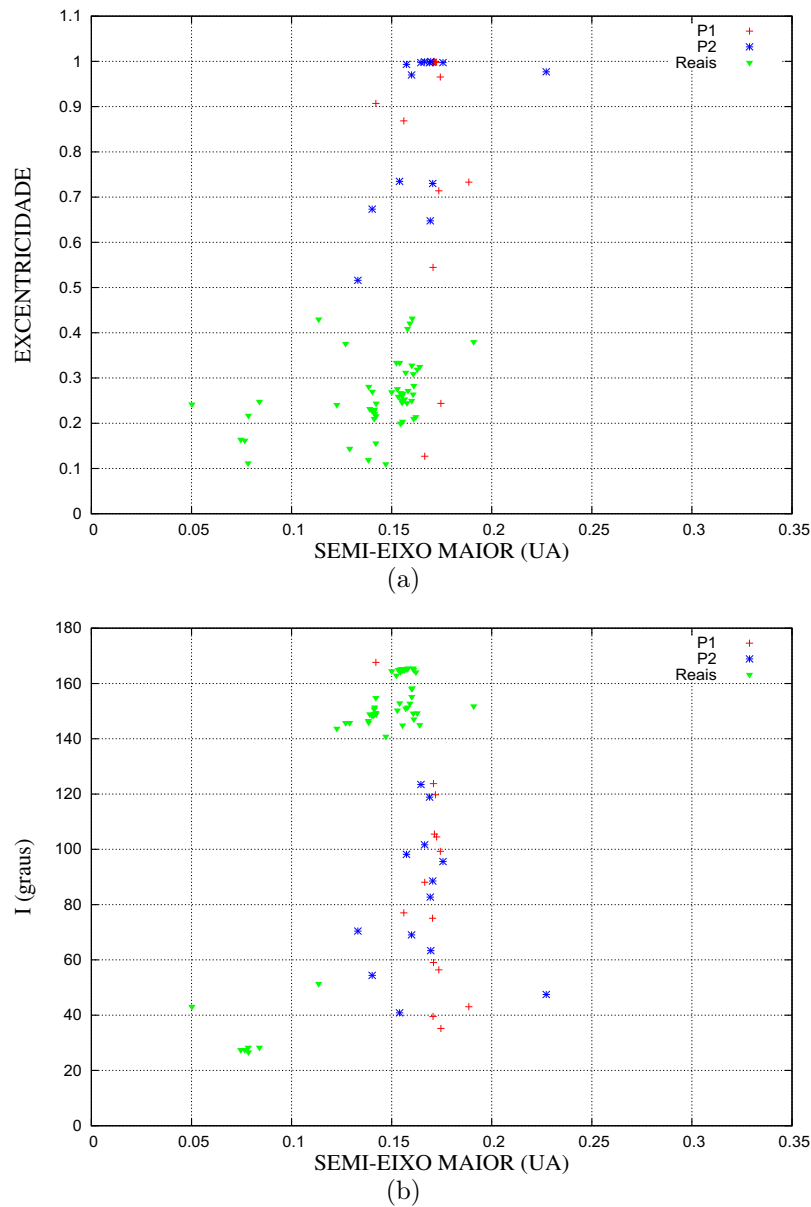


Figura 4.6: Diagrama semi-eixo versus excentricidade dos asteróides capturados. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

4.3 2ª Série de Simulações com o Sol

Nesta série de simulações foram integradas 2.2×10^5 condições iniciais. Diferentemente da primeira série de simulações, os binários construídos nesta fase têm todos os elementos orbitais angulares tomados aleatórios e com todos os valores igualmente prováveis dentro dos respectivos intervalos ($i=[0:180]$) ($w, \Omega, f = [0 : 360]$), a excentricidade é tomada inicialmente nula e o semi-eixo maior conforme mostrando na Figura 4.7.

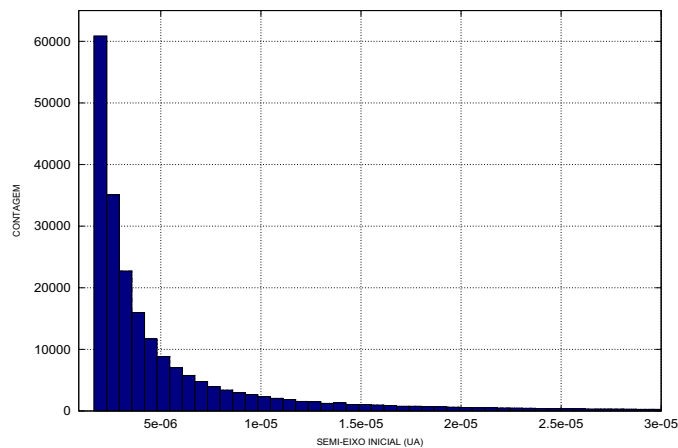


Figura 4.7: Distribuição dos valores semi-eixos inicial do binário.

4.3.1 Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados

A porcentagem de captura permanente foi de $\approx 0.008\%$, o que corresponde a aproximadamente uma captura em cada 10^4 condições iniciais integradas. As Figuras 4.8 (a) e (b) mostram, em relação ao Sol e a Júpiter, respectivamente, as condições iniciais que geraram capturas.

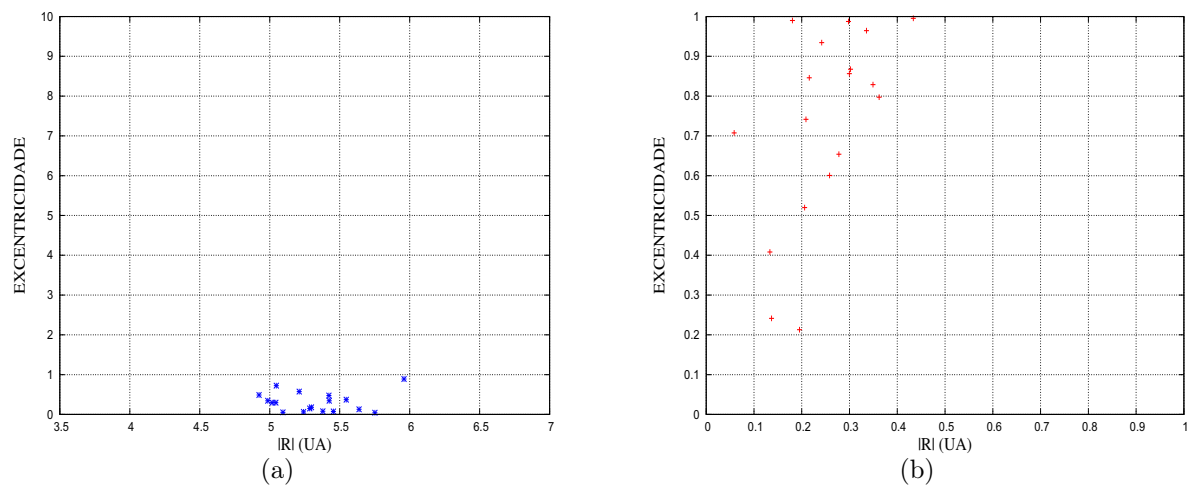


Figura 4.8: Diagramas de distância radial por excentricidade (relativo ao Sol em (a) e a Júpiter em (b)) das condições iniciais que promoveram captura na 2ª série de simulações.

4.3.2 Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente

As Figuras 4.9 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os diagramas de semi-eixo maior por excentricidade e semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados comparados com os satélites reais de Júpiter.

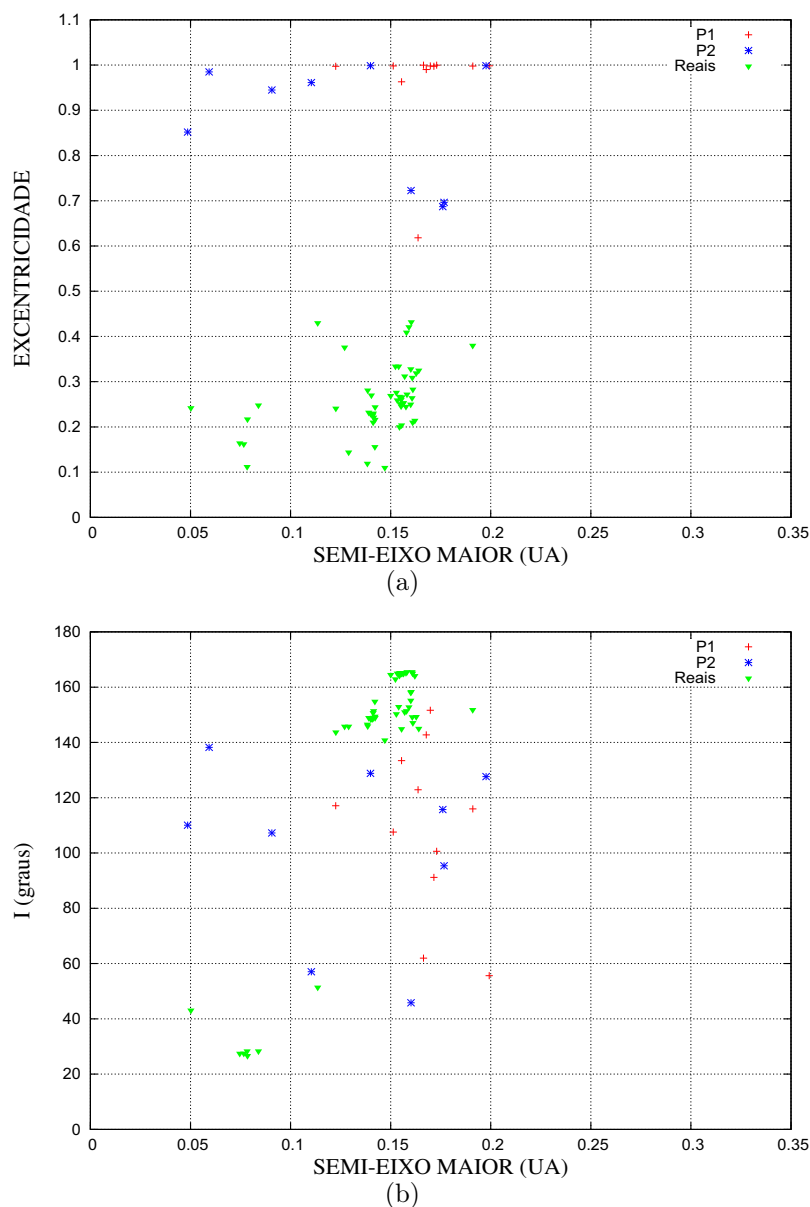


Figura 4.9: Diagrama semi-eixo versus excentricidade dos asteróides capturados. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

4.4 3ª Série de Simulações com o Sol

Nesta série de simulações foram integradas 1.85×10^5 condições iniciais. Da mesma forma que na 1ª série os elementos orbitais iniciais do binário são $e = 0$, $i = \Omega = w = M = 0^\circ$, A distribuição dos valores do semi-eixo maior é mostrada na Figura 4.10.

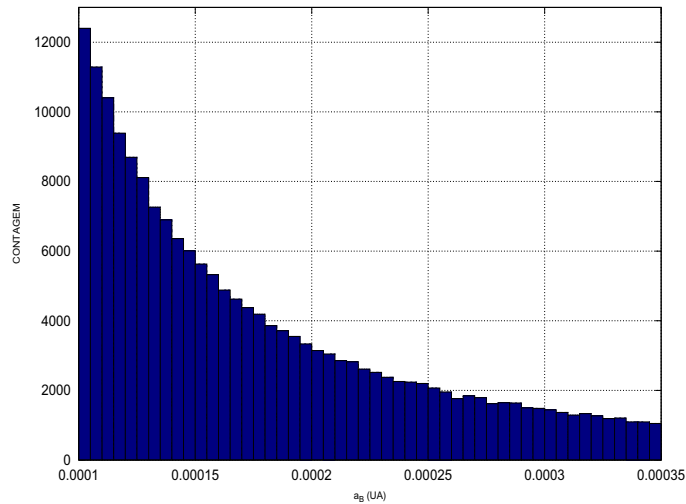


Figura 4.10: Distribuição dos valores semi-eixos inicial do binário.

4.4.1 Estatística dos Asteróides Permanentemente Capturados

A porcentagem de captura permanente observada foi de $\approx 0.0167\%$, o que corresponde a aproximadamente 1.5 capturas em cada 10^4 condições iniciais integradas. As Figuras 4.11 (a) e (b) mostram, em relação ao Sol e a Júpiter, respectivamente, as condições iniciais que geraram capturas permanentes nesta série de simulações.

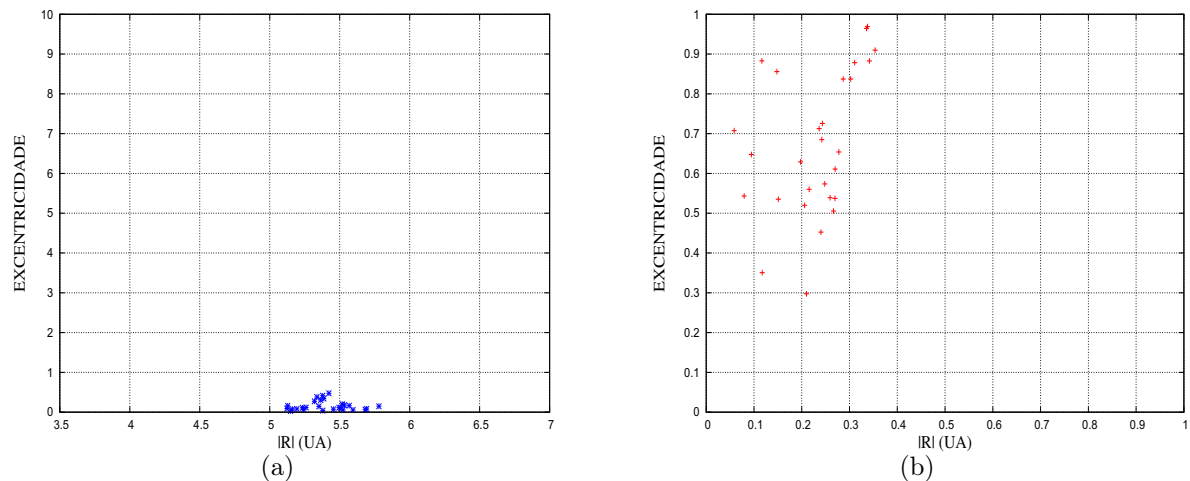
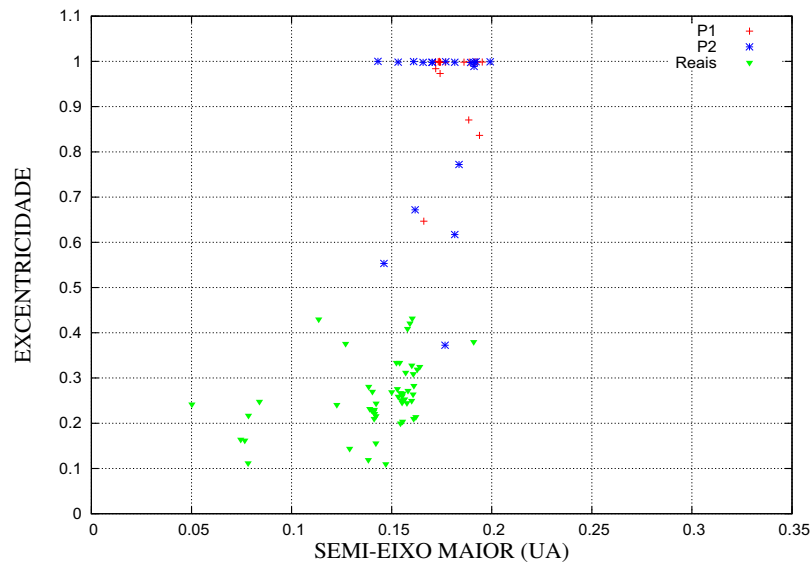


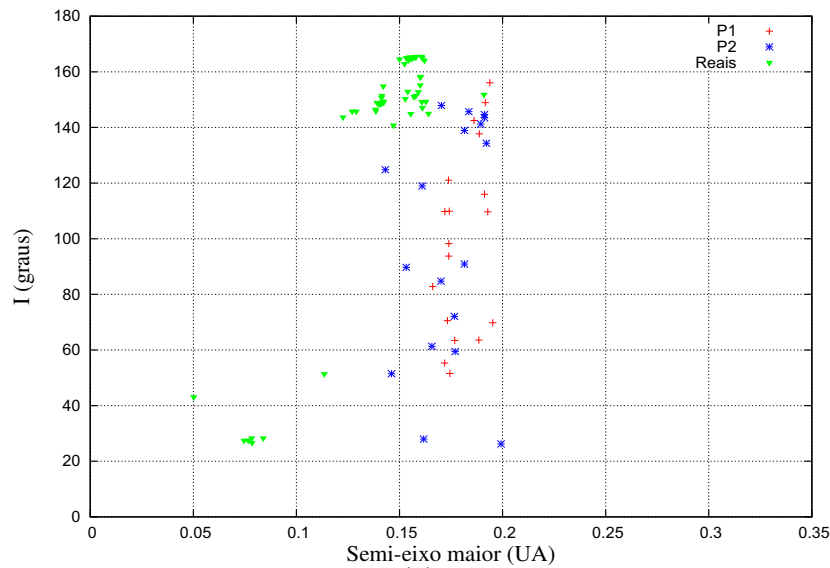
Figura 4.11: Diagramas de distância radial por excentricidade (relativo ao Sol em (a) e a Júpiter em (b)) das condições iniciais que promoveram captura na 3^a série de simulações.

4.4.2 Elementos Orbitais Finais dos Satélites Capturados Permanentemente

As Figuras 4.12 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os diagramas de semi-eixo maior por excentricidade e semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados comparados com os satélites reais de Júpiter.



(a)



(b)

Figura 4.12: Diagrama semi-eixo versus excentricidade dos asteróides capturados. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Nas três séries de simulações foram obtidas capturas próximas dos objetos observados. Os menores valores de excentricidade foram observados na primeira série, enquanto que na segunda série foram obtidos casos mais internos. Em todas as séries foram obtidas capturas com inclinação próximas dos objetos retrógrados reais, em contrapartida não houveram casos próximos dos satélites progrados mais internos.

4.5 Condições Propícias

Nesta seção foram simuladas apenas as condições iniciais do Modelo de Nice que geraram capturas nas três primeiras séries de simulações. Usando esse conjunto de condições iniciais denominadas propícias, mostradas na Figuras 4.5, 4.8 e 4.11 realizamos a integração de 10^3 binários por condição inicial. O objetivo desta etapa é obter configurações de captura ainda mais próximas dos objetos reais.

Nas Figuras 4.13 (a) e (b) são mostradas as configurações orbitais finais dos asteróides permanentemente capturados para essas condições iniciais.

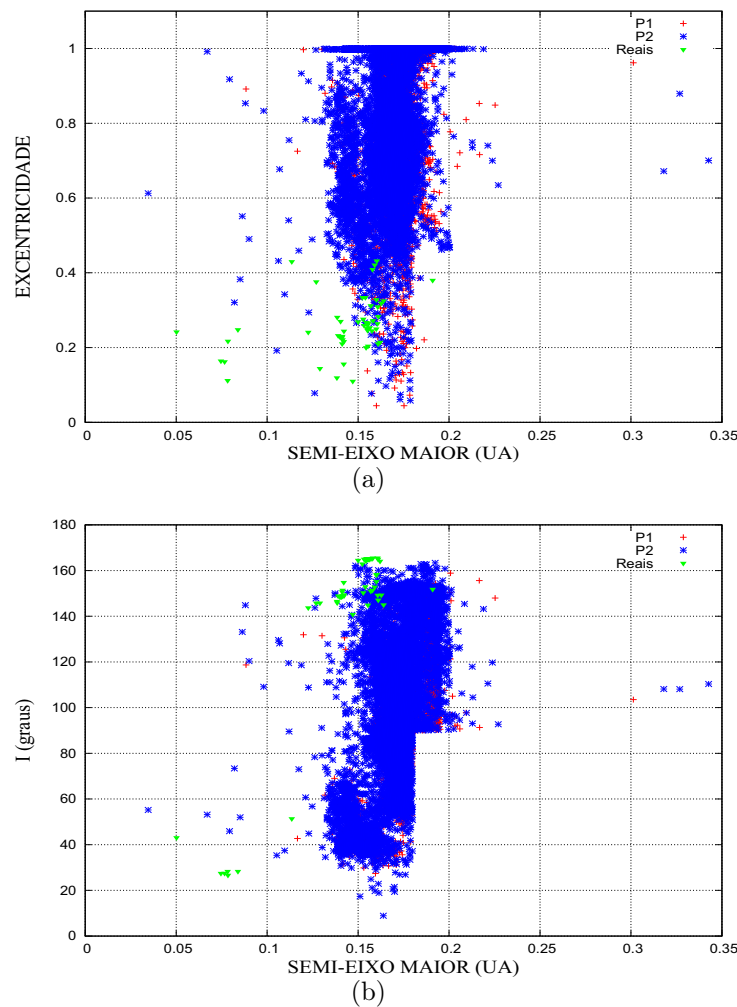


Figura 4.13: Diagramas de semi-eixo por excentricidade e semi-eixo por inclinação em (a) e (b) respectivamente das configurações finais dos objetos capturados nas condições propícias. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Como pode ser observado na figura 4.13 existe uma grande quantidade de objetos

com elevada excentricidade e inclinação na região da ressonância de Kozai. Considerando outras perturbações menores inerentes ao Sistema Solar é provável que muitos desses objetos escapem ou colidam com o planeta.

Definindo o intervalo $[80 : 120]^\circ$ como sendo uma região onde o efeito da ressonância de Kozai afetaria fortemente o satélite e retirando os objetos com excentricidade menor que 0.7, podemos encontrar configurações orbitais para as quais os objetos capturados podem ser considerados estáveis.

As figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam três casos de evolução temporal de objetos capturados em órbitas com abaixo, acima e dentro do intervalo sob influência da ressonância de Kozai, respectivamente. Esses casos foram simulados considerando um sistema composto por Sol, Júpiter, Satélites Galileanos e o planetesimal capturado. Para os casos prógrado e retrógrado, tomados próximos dos limites escolhidos para filtragem, é possível perceber a estabilidade do asteroide capturado.

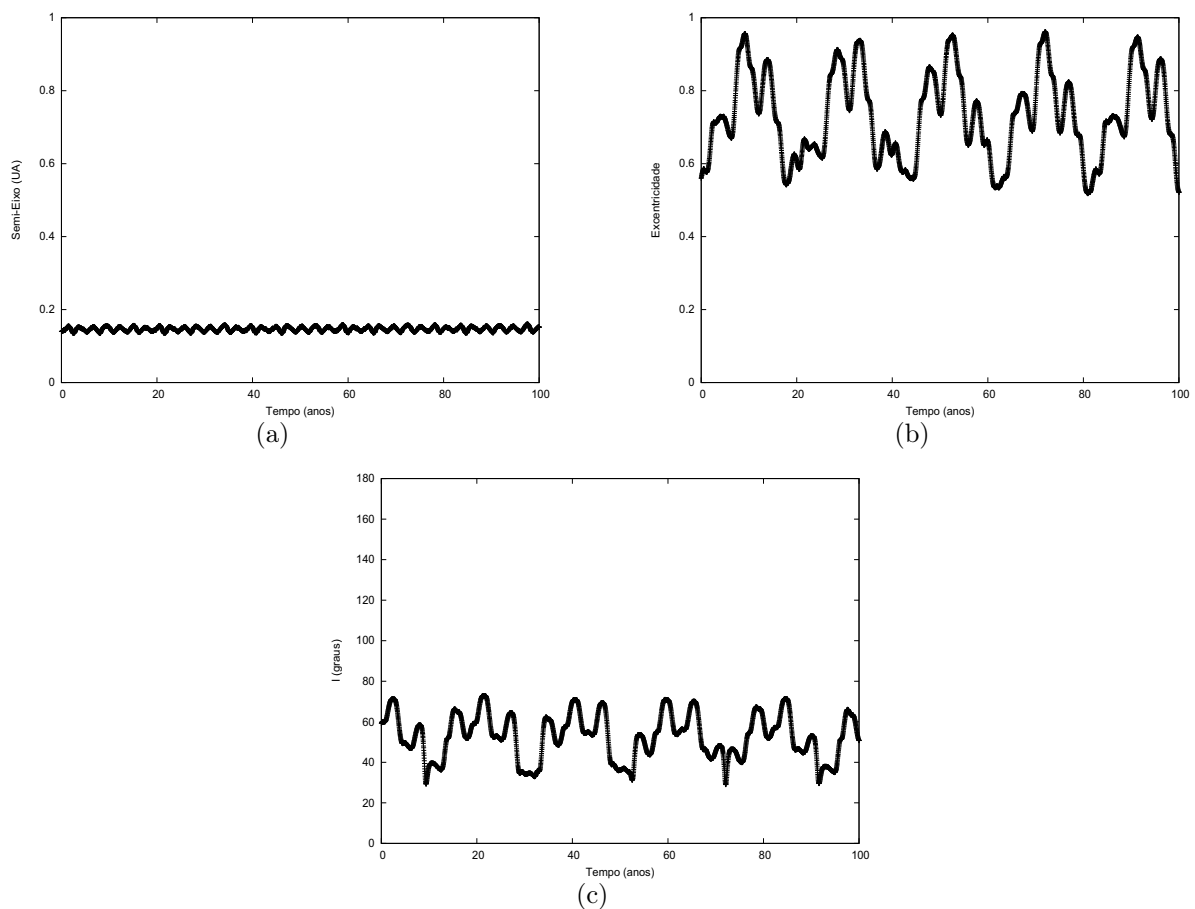


Figura 4.14: Evolução temporal do objeto capturado em órbita prógrada. Semi-eixo maior, excentricidade e Inclinação em (a), (b) e (c) respectivamente.

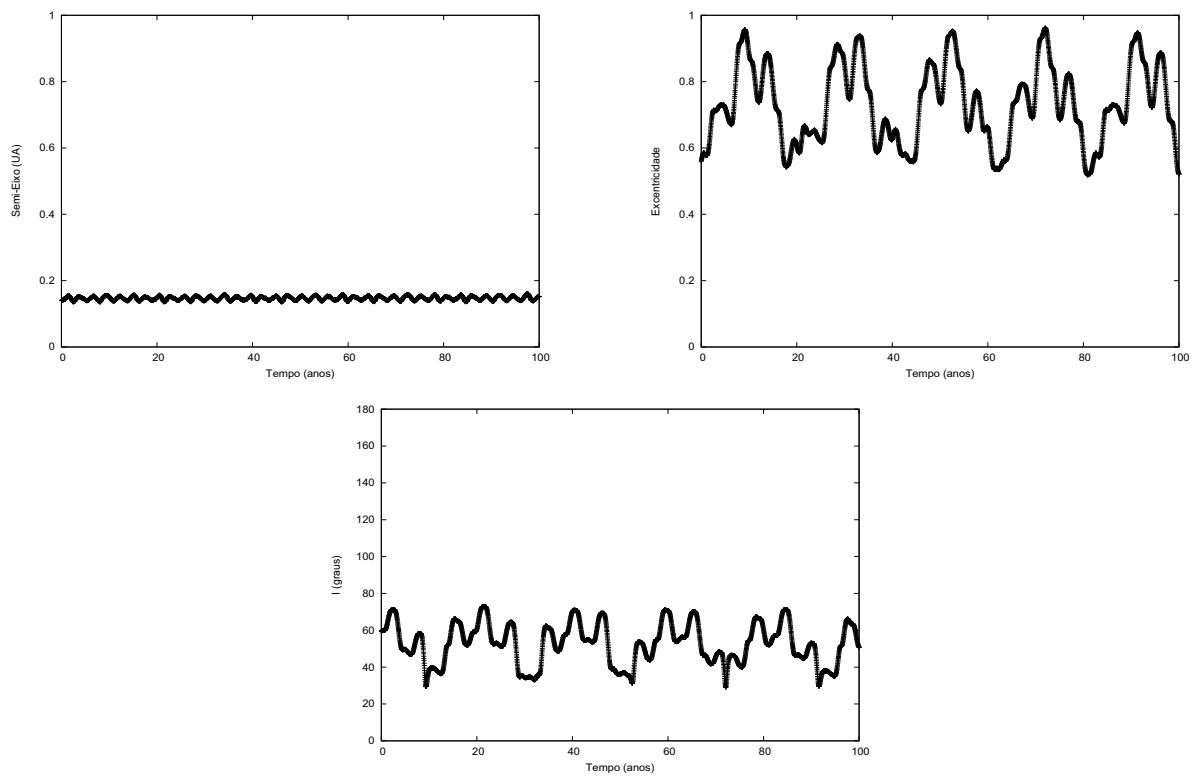


Figura 4.15: Evolução temporal do objeto capturado em órbita retrógrada. Semi-eixo maior, excentricidade e Inclinação em (a), (b) e (c) respectivamente.

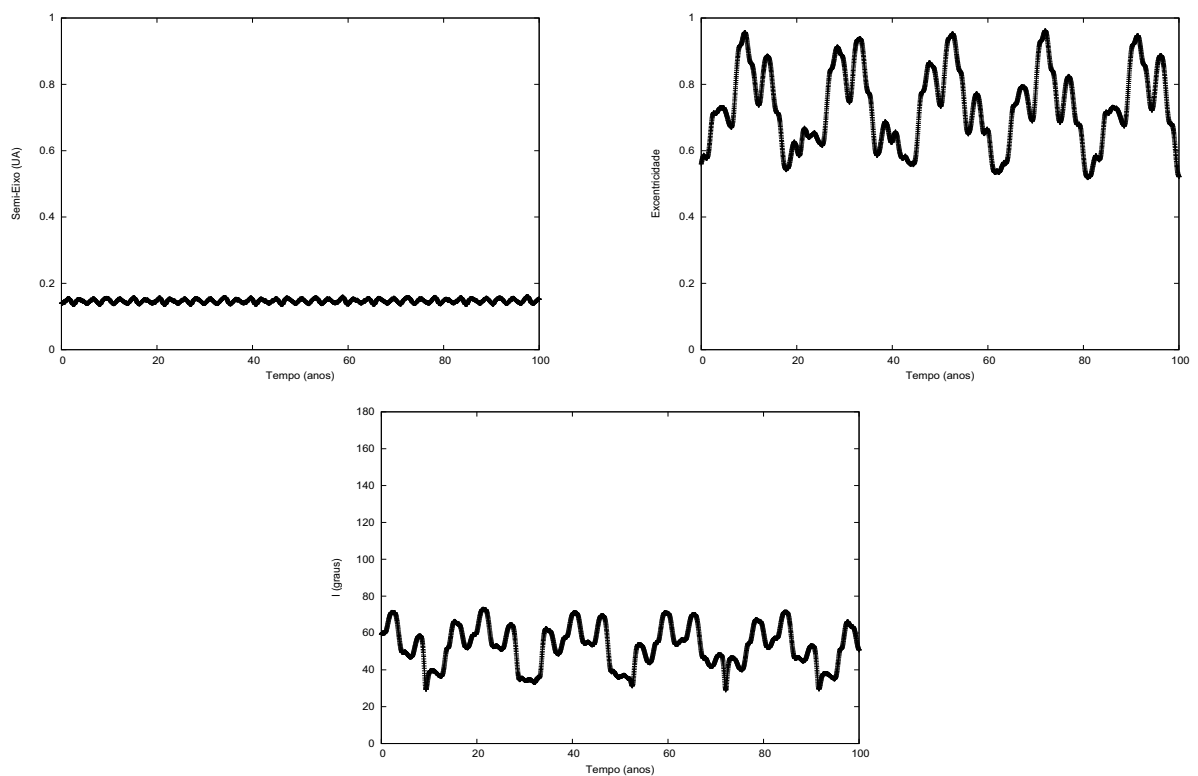


Figura 4.16: Evolução temporal do objeto capturado na região da ressonância de Kozai. Semi-eixo maior, excentricidade e Inclinação em (a), (b) e (c) respectivamente.

Na Figura 4.17 é mostrado o mesmo diagrama de semi-eixo por inclinação da Figura 4.13 (b) com uma filtragem dos casos que têm $e < 0.7$ e estão dentro a região sob influência da ressonância de Kozai.

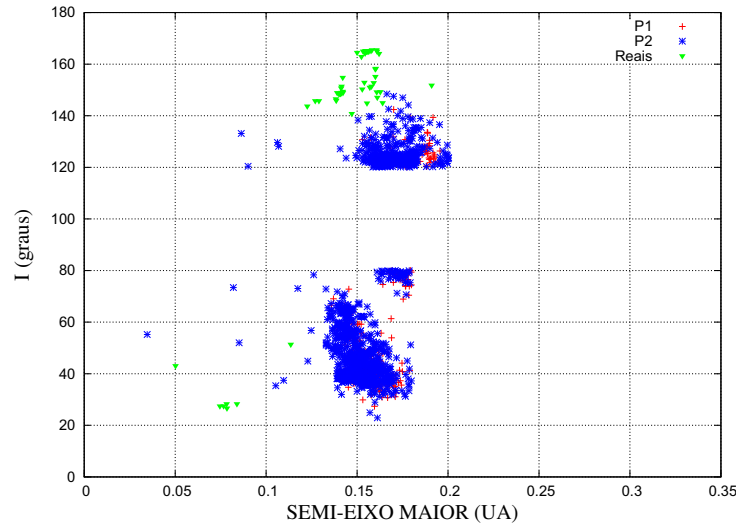


Figura 4.17: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteroides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Como pode ser observado nas Figuras 4.13 (a) e (b) e na Figura 4.17, as simulações feitas com 10^3 asteroides binários por condição inicial, e conseqüentemente uma gama maior de valores de energia de ligação para as reações de troca possibilitou a obtenção de casos em áreas não populadas nas três primeiras séries de simulações, com configurações orbitais ainda mais próximas dos satélites reais.

4.6 Casos com $m_{P_2} = 1 \times 10^{18}$ kg

Nesta seção foi feita a análise das condições propícias para os casos em que $m_{P_1} = 1 \times 10^{20}$ kg e $m_{P_2} = 1 \times 10^{18}$ kg. Nas figuras 4.18 (a) e (b) são apresentadas as configurações finais dos objetos capturados permanentemente para esta razão de massa.

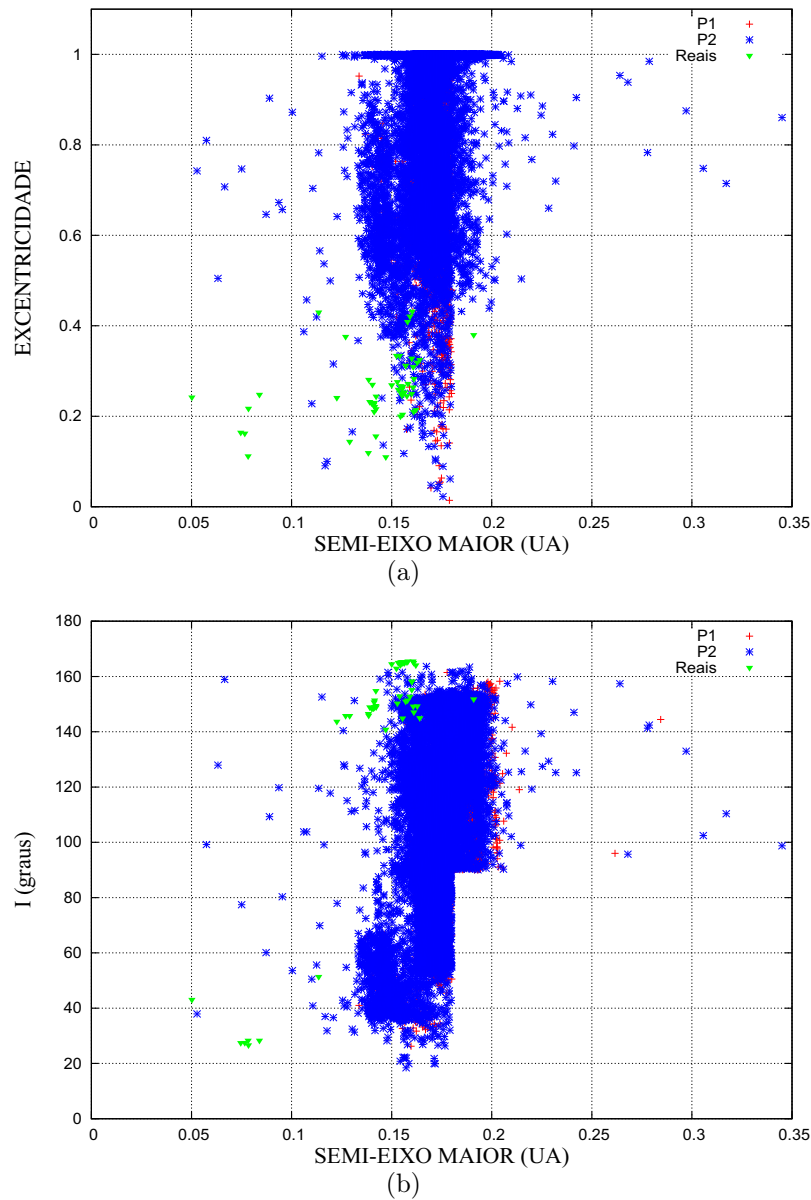


Figura 4.18: Diagramas de semi-eixo por excentricidade e semi-eixo por inclinação em (a) e (b) respectivamente dos objetos capturados para os casos com razão de massa 10^{-2} . Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Na Figura 4.19 é mostrado o mesmo diagrama de semi-eixo por inclinação da Figura 4.18 (b) somente com os asteróides capturados com $e < 0.7$.

Para este caso com razão de massa do binário $\frac{1}{100}$, as configurações orbitais de captura também foram próximas dos objetos reais, embora não tenham ocorrido capturas de objetos com configurações tão próximas dos objetos progrados reais mais internos.

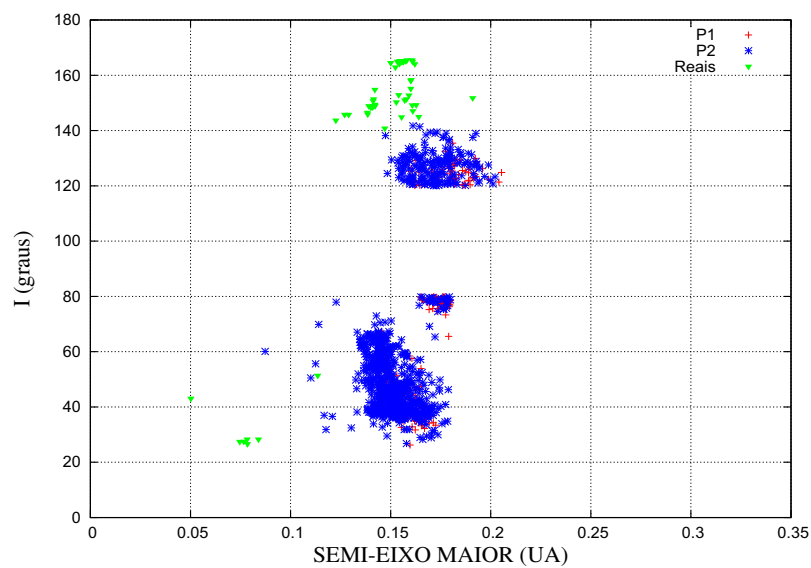


Figura 4.19: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai, para os casos com $m_{P1} = 1 \times 10^{20}$ kg e $m_{P2} = 1 \times 10^{18}$ kg. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

4.7 Análise de T2

O instante em que ocorre a ruptura do binário é relevante no entedimento das trocas de energia envolvidas no processo de transição de uma captura temporária para uma captura permanente. A análise da configuração espacial dos corpos do sistema nesse instante revela os pontos mais favoráveis à ruptura e conseqüente captura.

Devido ao elevado número de graus de liberdade desse sistema, como mostra a Figura 4.20, apresentamos aqui uma estudo mais simplificado da configuração espacial dos corpos envolvidos.

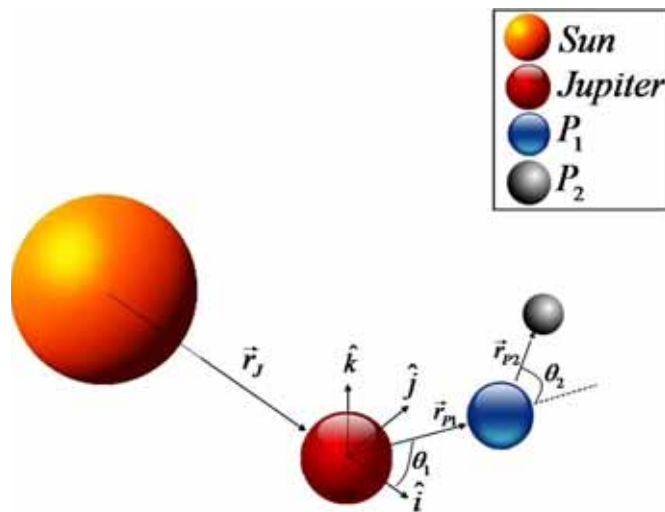
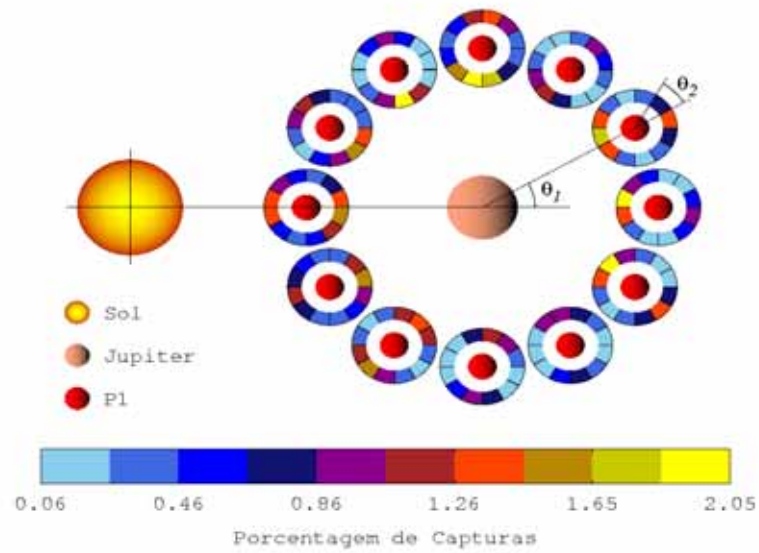


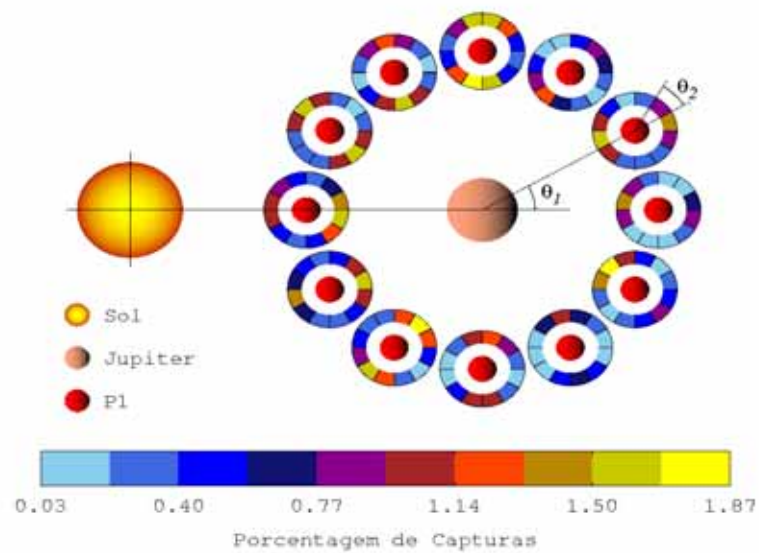
Figura 4.20: Representação (fora de escala) da configuração espacial do sistema de quatro corpos.

Os ângulos são calculados usando como referência os planos orbitais de Júpiter relativo ao Sol e de P1 relativo a Júpiter, para θ_1 e θ_2 respectivamente. Conforme visto na Figura 4.20, o versor \hat{i} é paralelo ao vetor posição de Júpiter \vec{r}_J , e o versor \hat{k} é normal ao plano orbital e o versor \hat{j} mutuamente normal a \hat{i} e \hat{k} . O ângulo calculado aqui é formado pela projeção do vetor posição no plano orbital do corpo de referência e o vetor posição desse corpo de referência. A análise dos histogramas na Figura 4.21 mostra os ângulos em que a ruptura do binário gerou captura permanente para os casos simulados nas seções 4.5 e 4.6.

Nos histogramas dos ângulos de ruptura que proporcionaram capturas permanentes, mostrados nas Figuras 4.21 (a) e (b), é possível observar uma maior probabilidade para os casos em que P2 encontrava-se entre Júpiter e P1.



(a)



(b)

Figura 4.21: Histograma angular no instante T2. O círculo vermelho indica a posição de P1 em relação à Júpiter (θ_1) e as seções angulares indicam a posição de P2 em relação a P1 (θ_2). Em (a) são apresentadas as rupturas para os casos em que $m_{P2} = 1 \times 10^{19} \text{kg}$, em (b) os casos em que $m_{P2} = 1 \times 10^{18} \text{kg}$.

Capítulo 5

SIMULAÇÕES COM ACHATAMENTO

Nos casos integrados anteriormente todos os corpos possuíam simetria esférica, o que constitui uma primeira aproximação dos objetos observados na natureza. Nos asteróides reais, como Eros e Itokawa, mostrados na Figura 5.1 (a) e (b) respectivamente, é possível perceber o quanto essa primeira aproximação é equivocada.

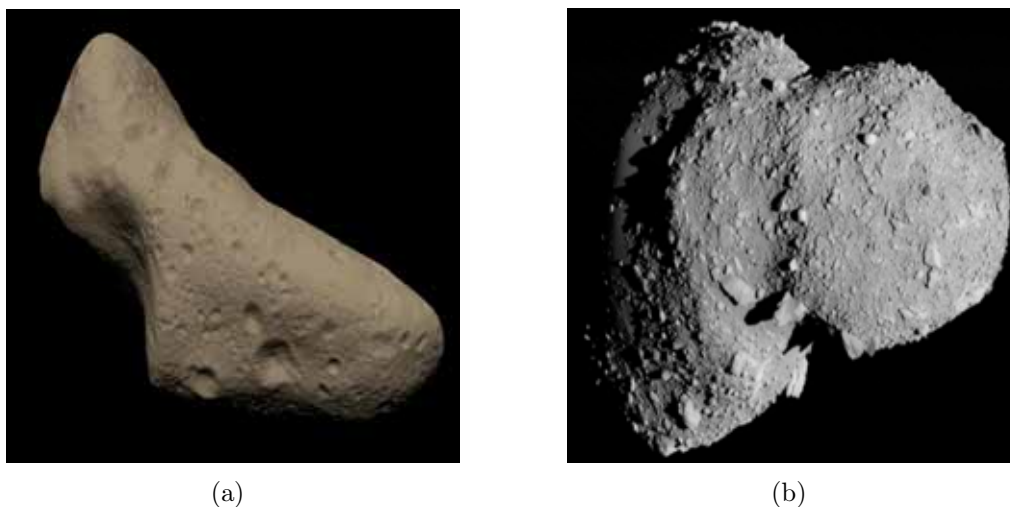


Figura 5.1: Asteróides Eros e Itokawa em (a) e (b) respectivamente.

Essa não esfericidade na forma do objeto é responsável por uma assimetria no campo gravitacional, influenciando a dinâmica do sistema.

Para os objetos sobre influência de um corpo achatado a força gravitacional (derivado de Danby, 1988) é dada por:

$$\vec{F} = -\frac{\mu}{r^3} \left[1 - J_2 \frac{R^2}{r^2} \left(\frac{3z^2}{2r^2} - \frac{1}{2} \right) \right] \vec{r} \quad (5.1)$$

nesta equação μ é o parâmetro gravitacional do corpo central, r é a distância do corpo que

sofre a perturbação ao corpo central, J_2 é o coeficiente de achatamento do corpo central, \vec{r} é o vetor posição do corpo em relação ao corpo central, z é a componente cartesiana fora do plano orbital e R é o raio equatorial médio do corpo.

Neste Capítulo é apresentado o efeito do achatamento na dinâmica de ruptura/captura. Usando a equação 5.1 para descrever a influência gravitacional de P1 sobre P2 e adotando o valor do coeficiente $J_2 = 1 \times 10^{-2}$ para o membro mais massivo (P1) do binário.¹

Nas Figuras 5.2 (a) e (b) a seguir mostram os resultados das integrações realizadas com todas as condições iniciais da Figura 3.1 do Modelo de Nice.

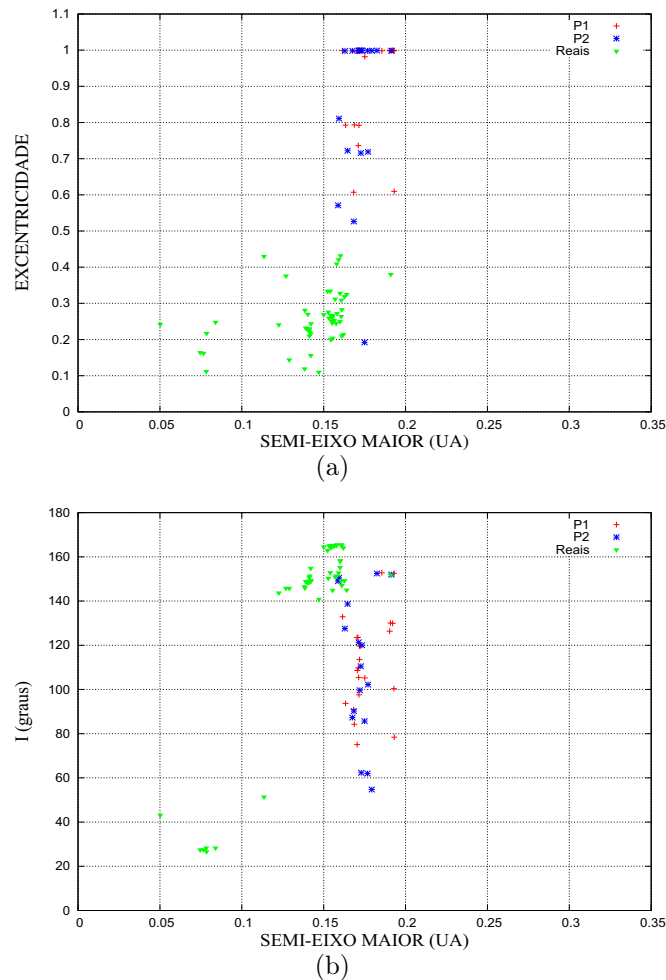


Figura 5.2: Diagramas de semi-eixo por inclinação e semi-eixo por excentricidade, em (a) e (b) respectivamente, dos objetos capturados para os casos com achatamento usando todas as condições iniciais. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

¹O valor do J_2 adotado aqui foi estimado com base em valores desse coeficiente para corpos reais: Asteróide 87 Sylvia de massa $1.478 \times 10^{17} kg$ e $J_2 \approx 0.17$ e Lua de massa $7.349 \times 10^{22} kg$ e $J_2 = 2 \times 10^{-4}$

Nestes resultados apresentados nas Figuras 5.2 é possível notar configurações orbitais de captura muito próximas, em inclinação e semi-eixo, dos objetos reais retrógrados.

5.1 Condições Propícias

5.1.1 Condições Propícias obtidas com o Achatamento

Semelhante à seção 4.5, nesta etapa realizamos integrações com o conjunto de condições iniciais que geraram captura nas simulações feitas com o achatamento. A figura 5.3 mostra as configurações orbitais dos objetos permanentemente capturados nesta etapa.

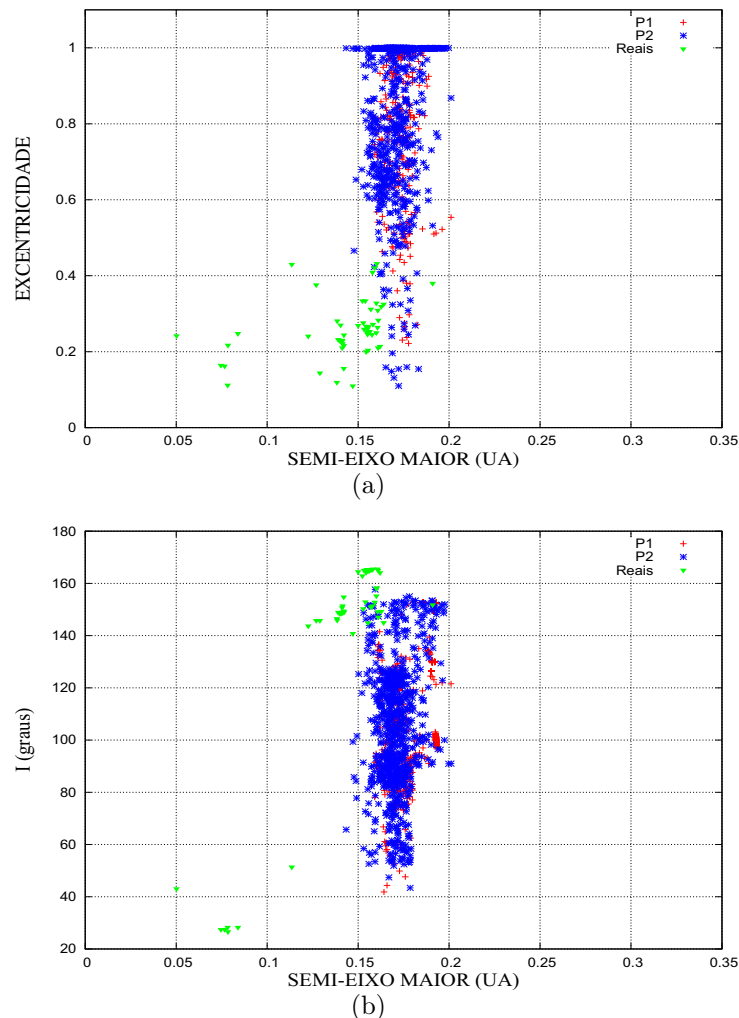


Figura 5.3: Diagramas de semi-eixo por inclinação e semi-eixo por excentricidade, em (a) e (b) respectivamente, dos objetos capturados para os casos com condições iniciais propícias obtidas com o Achatamento. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Na Figura 5.4 é apresentado o mesmo diagrama de semi-eixo por inclinação da Figura 5.3 (b) apenas com os casos com excentricidade menor que 0.7 e fora da região de Kozai.

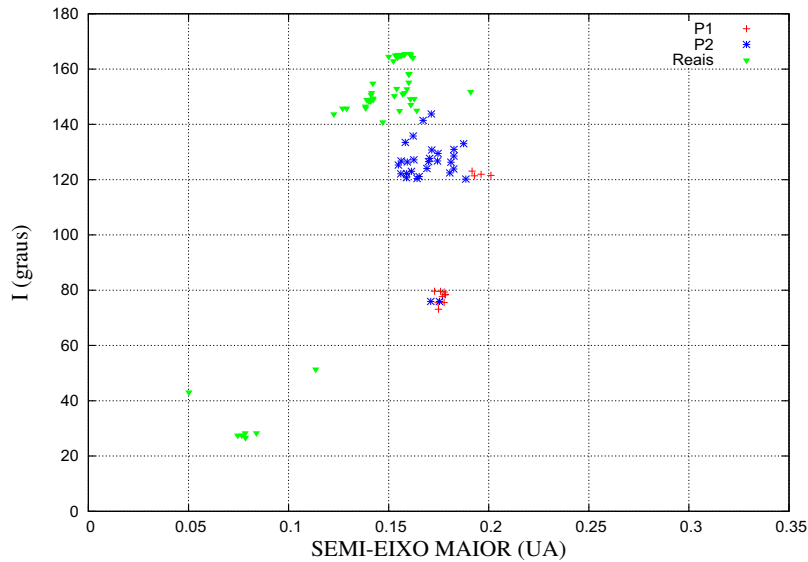


Figura 5.4: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

5.1.2 Condições Propícias obtidas sem o Achatamento

Nesta seção foram realizadas integrações com as condições do P1 que geraram captura nas três primeiras séries de integração sem o achatamento (seções 4.2, 4.3 e 4.4). Para um dos casos analisados aqui foi adotado um intervalo diferente de separação inicial do binário.

Caso 1

Nesta etapa o intervalo de semi-eixo maior adotado nesta série foi de $[1 \times 10^{-4} : 3.5 \times 10^{-4}]$ UA, que corresponde ao mesmo intervalo usado nas integrações realizadas com

todas as condições iniciais do Modelo de Nice $[0.075 : 0.26]R_{HP1}$.²

As Figuras 5.5 mostram os estados finais dos satélites permanentemente capturados neste primeiro caso.

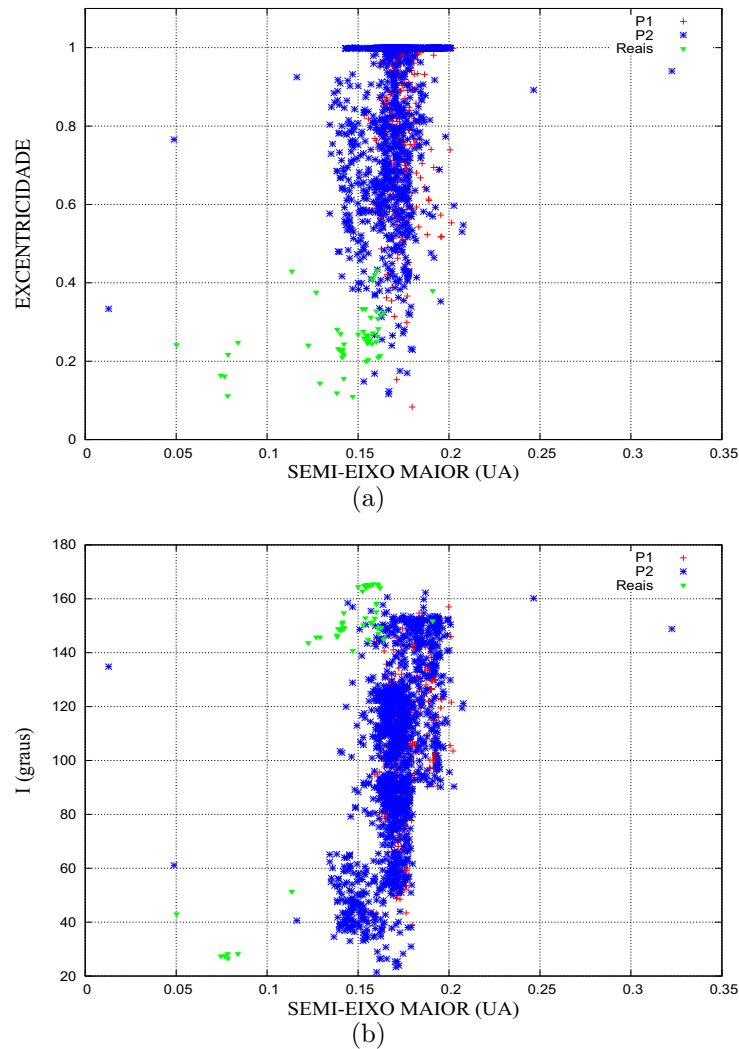


Figura 5.5: Diagramas de semi-eixo por inclinação e semi-eixo por excentricidade (Caso 1), em (a) e (b) respectivamente, dos objetos capturados para os casos com J2 e condições iniciais propícias. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

²O valor de raio de Hill do P1 (1.33×10^{-3} UA) aqui é calculado assumindo um sistema Sol-P1-P2, com P_1 a 5.2 UA do Sol.

Na Figura 5.6 é mostrado o mesmo diagrama de semi-eixo por inclinação da Figura 5.5 (b) somente com os asteróides capturados com $e < 0.7$ e fora da região sob influência da ressonância de Kozai.

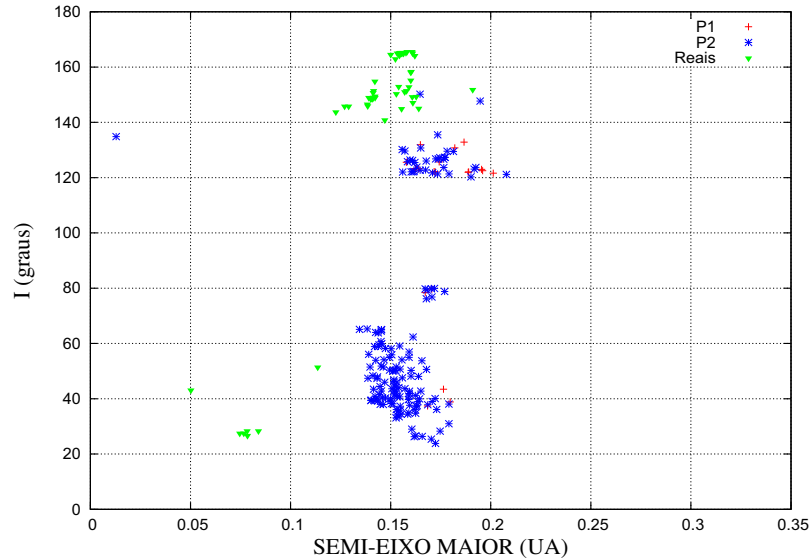


Figura 5.6: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Nesta primeira série de simulações com condições propícias foram obtidas configurações de captura próximas dos objetos reais retrógrados. Não houve casos de captura próximas dos satélites reais prógrados mais internos.

Caso 2

Nesta segunda série o intervalo de semi-eixo maior inicial do binário adotado foi de $[2.66 \times 10^{-4} : 6.66 \times 10^{-4}]$ UA $[0.2 : 0.5] R_{HP_1}$. Nas Figuras 5.7 (a) e (b) são apresentados os estados finais dos objetos capturados.

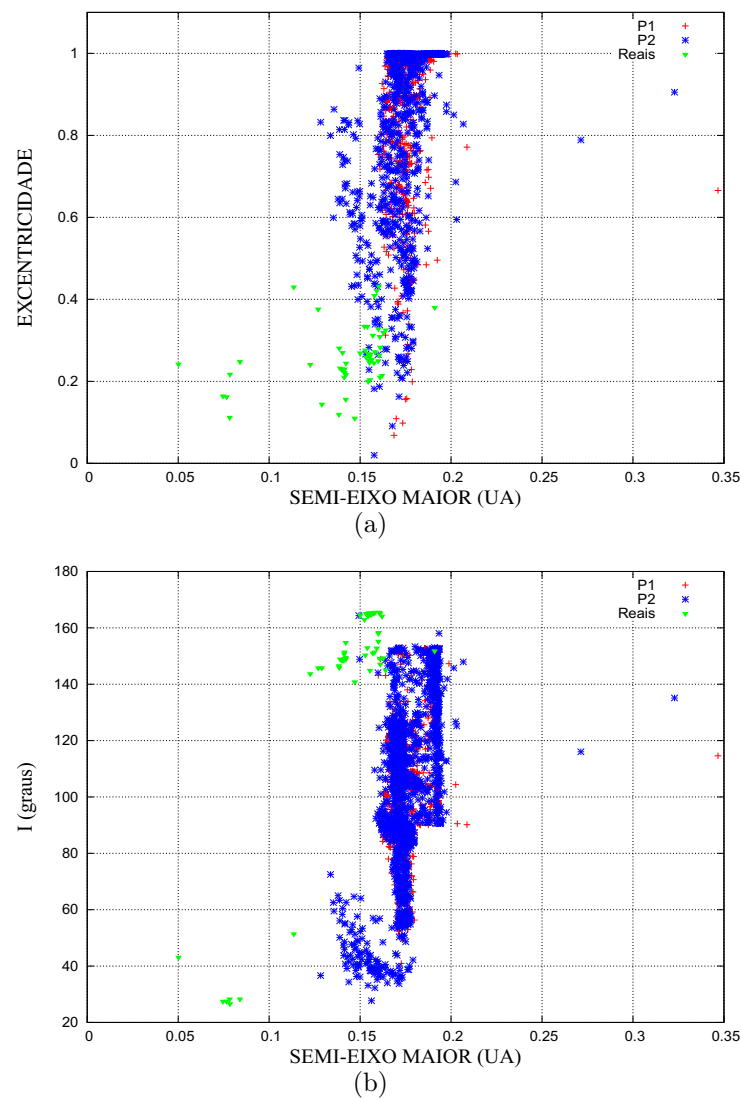


Figura 5.7: Diagramas de semi-eixo por inclinação e semi-eixo por excentricidade (Caso 2), em (a) e (b) respectivamente, dos objetos capturados para os casos com J_2 e condições iniciais propícias. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Na Figura 5.8 é mostrado o mesmo diagrama Figura 5.7 (b) para os casos com $e < 0.7$ e fora da região sob influência da ressonância de Kozai.

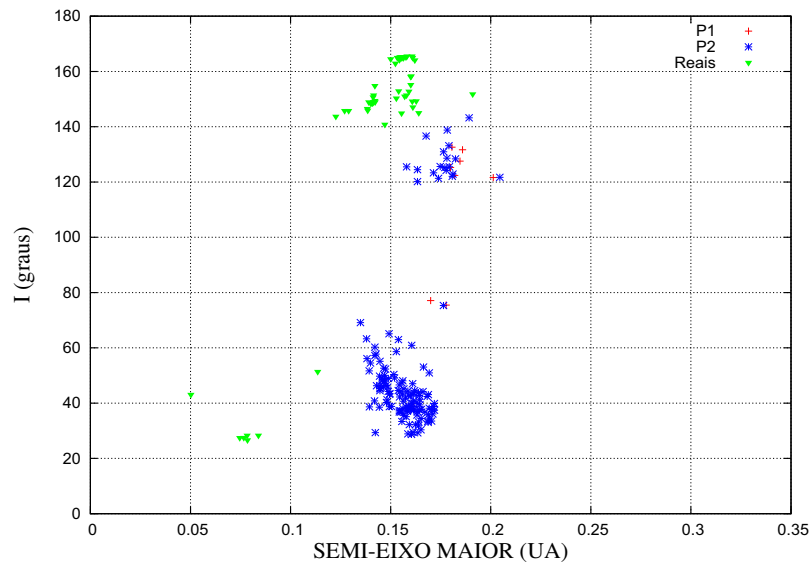


Figura 5.8: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Neste segundo caso, com intervalo de separação inicial do binário maior que no caso 1, foram obtidos satélites permanentemente capturados com configuração orbital próxima dos objetos retrógrados reais. Para os casos progrados as configurações de captura não são próximas dos satélites reais.

Caso 3

Nesta terceira etapa o intervalo de separação inicial do binário adotado foi de $[6.66 \times 10^{-4} : 1.33 \times 10^{-3}]$ UA, que corresponde a $[0.5 : 1]R_{HP_1}$. Nas Figuras 5.9 (a) e (b) mostram os estados finais dos objetos capturados.

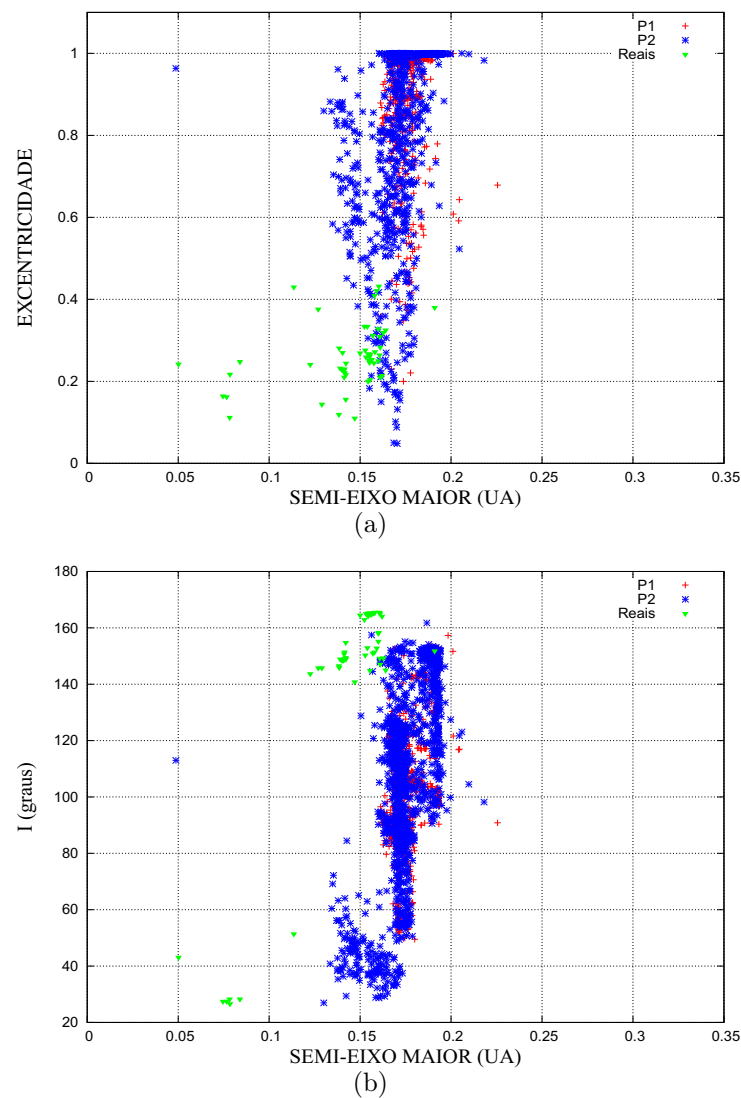


Figura 5.9: Diagramas de semi-eixo por inclinação e semi-eixo por excentricidade (Caso 3), em (a) e (b) respectivamente, dos objetos capturados para os casos com J_2 e condições iniciais propícias. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Na Figura 5.10 são apresentados os casos que foram capturados com $e < 0.7$ e fora da região sob influência da ressonância de Kozai.

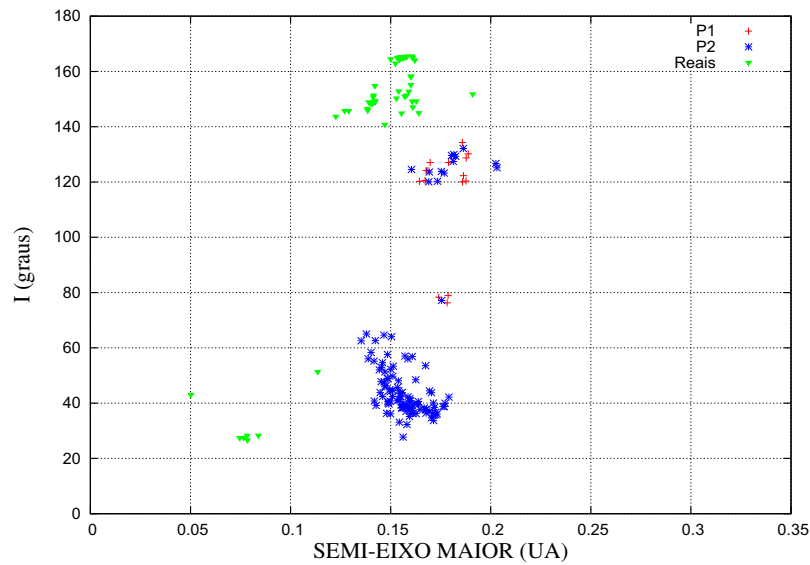


Figura 5.10: Diagrama de semi-eixo por inclinação dos asteróides capturados permanentemente e com excentricidade menor que 0.7 e fora da região sob forte influência da ressonância de Kozai. Os pontos “+” vermelhos e “*” azuis correspondem aos casos em que P1 ou P2 permaneceu capturado, respectivamente. Os triângulos verdes representam os satélites irregulares reais de Júpiter.

Neste caso, com o maior intervalo de separação inicial do binário, as configurações orbitais dos satélites permanentemente capturados são próximas dos objetos reais retrógrados. Para os casos progrados mais internos as configurações de captura não são próximas dos objetos reais.

Capítulo 6

ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo apresentamos uma análise estatística das simulações realizadas. As tabelas a seguir mostram mais detalhadamente os resultados das simulações, em cada uma das séries são apresentados o número total de condições iniciais integradas, o número de colisões, rupturas prematuras¹, o número de capturas de P1 e de P2 e o percentual de capturas.

Na Tabela 6.1 é mostrada a estatística das integrações realizadas com todas as condições do Modelo de Nice (Figura 3.1).

Enquanto que na Tabela 6.2 é mostrada a análise para as integrações realizadas com as condições propícias.

Tabela 6.1: Estatística das Simulações - Todas as Condições do Modelo de Nice

	1ª Série	2ª Série	3ª Série	Com J2
Nº Total de Simulações	54683	219873	185983	248175
Colisões	48	4236	123	99
Ruptura Prematura	6725	36	8557	3058
Capturas de P1	11	11	14	22
Capturas de P2	13	9	17	17
Total de Capturas	24	20	31	39
% Total de Captura	0.044	0.009	0.016	0.016

Como pode ser observado na Tabela 6.1 em todas as séries apresentadas a probabilidade de captura foi de aproximadamente uma captura em cada 10^4 condições iniciais

¹Ruptura Prematura é definida quando a Energia de dois corpos do binário fica positiva antes que este seja capturado por Júpiter

simuladas.

Na segunda série de simulações, onde a separação inicial do binário foi menor é possível perceber a redução no número de rupturas prematuras e um aumento no número de colisões. Para os casos com achatamento também é possível notar, em comparação com as séries 1 e 3, uma redução na quantidade de casos de ruptura prematura.

Tabela 6.2: Estatística de capturas - Condições Propícias

	m_{p2} 10 ¹⁹ kg	m_{p2} 10 ¹⁸ kg	J2 CI Propícias	J2 Caso I	J2 Caso II	J2 Caso III
Simulações	64 000	64 000	3900	6400	6400	6400
Colisões	17182	15667	659	1509	1522	34
Ruptura Prematura	0	3	3	0	18	94
P1 Cap- tures	8267	8761	465	943	650	1104
P2 Cap- tures	11353	10181	772	1374	1273	1131
Total de Capturas	19620	18942	1237	2317	1923	2235
% Total de Captura	30.18	29.14	31.71	35.64	29.58	33.38

A análise dos resultados obtidos para as condições iniciais propícias, mostrada na Tabela 6.2, revela uma probabilidade maior de captura do membro menos massivo do binário (P2). O percentual de captura para estas condições iniciais foi da ordem de 30%.

O efeito da separação inicial do binário no número de rupturas prematuras também pode ser percebido na comparação dos casos I, II e III com achatamento.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, analisamos a formação dos satélites irregulares de Júpiter por meio do processo de captura gravitacional de asteróides binários. Usando condições iniciais do Modelo de Nice, estudamos a influência do Sol no processo de ruptura/captura de um dos membros do binário após um encontro próximo com o planeta.

Nos resultados apresentados para as configurações finais dos objetos é possível perceber um considerável número de casos de captura na região dos objetos reais observados. Os satélites permanentemente capturados possuem configuração orbital próxima, principalmente, dos objetos reais retrogradados. Embora não coincidam com os satélites reais progradados, as simulações feitas para $m_{P_2} = 1 \times 10^{19} kg$ apontam uma probabilidade maior do membro menos massivo ser capturado em órbita prograda, o que é compatível com objetos como o Himalia, de mesma massa e inclinação $\approx 27.5^\circ$.

Nas análises dos ângulos de ruptura no instante T2, mostrados nas figuras 4.21 (a) e (b), é possível notar que as rupturas que geraram capturas permanentes ocorrem com uma maior probabilidade quando P2 encontra-se entre Júpiter e P1.

Para os casos com achatamento também foram observadas capturas permanentes de objetos nas regiões dos satélites reais. Com base nos resultados mostrados na Tabela 6.1 é possível perceber o efeito do achatamento na energia de ligação do binário.

Todavia, uma vez que cada novo resultado culmina na ramificação de novas perspectivas, algumas metas futuras merecem destaque:

- Análise de outras ordens de massa para os asteróides.
- Análise da interação entre um grupo maior de asteróides, estudo do processo de fragmentação devido às colisões e sua influência na formação das famílias de satélites.

- Extensão desse modelo de formação de satélites irregulares, usando asteróides binários e Modelo de Nice, aos outros planetas do Sistema Solar.

REFERÊNCIAS

- AGNOR, C. B.; HAMILTON, D. P. **Neptune's Capture of its Moon Triton in a Binary-Planet Gravitational Encounter.** Nature. 441; 192-194, 2006.
- ASTAKHOV, S. A.; BURBANKS, A. D.; WIGGINS, S.; FARRELY, D. **Chaos-Assisted Capture of Irregular Moons.** Nature. 423; 264-267, 2003.
- BEAUGÉ, C.; ROIG, F.; NESVORNY, D.; **Effects of Planetary Migration on Natural Satellites of the Outer Planets.** Icarus. 158, 264-267, 2002.
- BELTON, M.; CARLSON, R.; **1993 (243) 1** . IAUC. 5948; 2, 1994.
- BRASIL, P. I. O.; YOKOYAMA, T.; DEIENNO, R.; NOGUEIRA, E. C.; **Dinâmica dos Satélites Regulares e Irregulares de Júpiter na Migração Planetária.** 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications. Serra Negra-SP, 2010.
- BROWER, D.; CLEMENCE, G. M. **Methods of Celestial Mechanics.** New York, NY, Academic. 1961.
- COLOMBO, G.; FRANKLIN F. A.; **On The Formation of the Outer Satellites Groups of Jupiter.** Icarus. 15; 186-189, 1971.
- DANBY, J. M. A. **Fundamentals of Celestial Mechanics.** Willmann-Bell, Inc, Richmond, USA. 1988.
- EVERHART, E. **An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings.** Dynamics of comets: their origin and evolution- IAU (A. Carusi and G. B. Valsecchi, Eds.). 115; 185-202, 1985.

- FUNATO, Y.; MAKINO J.; HUT P.; KOKUBO, E.; KINOSHITA, D. **The Formation of the Kuiper-Belt Binaries Through Exchange Reactions** . Nature. 427; 518-520, 2005.
- GASPAR, H. S.; WINTER O. C.; VIEIRA NETO, E. **Irregular Satellites of Jupiter: Capture Configurations of Binary-Asteroids**. Monthly Notes Royal Astronomical Society. 2009, (submitted).
- GOMES, R.; LEVISION H. F.; TISIGANIS, K.; MORBIDELLI, A. **Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets**. Nature. 441; 466-469, 2005.
- HEPPENHEIMER T. A.; PORCO, C. **New Contributions to the Problem of Capture**. Icarus. 30; 385-401, 1977.
- MORBIDELLI, A.; LEVISION H. F.; TISIGANIS, K.; GOMES, R. **Chaotic Capture of Júpiter's Trojan Asteroids in the Early Solar System**. Nature. 435; 462-465, 2005.
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar System Dynamics**. 1^a ed. Cambridge University Press. 1999.
- NESVORNÝ, D.; VOKROUHLICKÝ, D.; MORBIDELLI, A.; **Capture of Irregular Satellites During Planetary Encounters**. The Astronomical Journal. 133; 1962-1976, 2007.
- NOLL, K. S. 2006 ; in LAZARO, D.; FERRAZ-MELLO, S; FERNANDEZ, J. A. eds. **Proceedings of the International Astronomical Union: Asteroids, Comets and Meteors Solar System Binaries**. Cambridge University Press. 301-318.
- NOGUEIRA, E. C. **Efeitos da migração planetária promordial sobre a estabilidade de satélites regulares e possível captura de satélites irregulares**. Rio de Janeiro: Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em física, Instituto de física, UFRJ 1-180, 2008, Rio de Janeiro, 2008.
- PEALE, S. J. **Origin and Evolution of the Natural Satellites**. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 37; 533-602, 1999.

- POLLACK, J. B.; BURNS, J. A. TAUBER, M. E. **Gas Drag in Primordial Circumplanetary Envelopes: A Mechanism for Satellite Capture.** *Icarus.* 37; 587-611, 1979.
- POLLACK, J. B.; HUBICKY J O., BODENHEIMER P., LISSAUER J. J., PODOLAK M., GREENZWEIG Y. **Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solid and Gas.** *Icarus.* 124; 62-85, 1996.
- SHEPPARD, S. S.; JEWITT, D. C. **An Abundant Population of Small Irregular Satellites Around Jupiter.** *Nature.* 423; 261-263, 2003.
- TISIGANIS, K.; GOMES, R.; MORBIDELLI, A.; LEVISON H. F. **Origin of the Orbital Architecture of the Giant Planets of the Solar System.** *Nature.* 435; 459-461, 2005.
- TSUI, H. K. **Satellite Capture by Scattering of an Existing Massive planetary Satellite.** *Planetary and Space Science.* 47; 917-920, 1999.
- TSUI, H. K. **Asteroid-planet-sun interaction in the presence of a planetary satellite.** *Icarus.* 148; 139-146, 2000.
- VIEIRA NETO, E.; WINTER, O. C. **Time analysis for a Gravitational Capture: Satellites of Uranus.** *The Astronomical Journal.* 122; 440-448, 2001.
- VIEIRA NETO, E.; WINTER, O. C.; YOKOYAMA, T. **The effect of Jupiter's Mass Growth on Satellite Capture - Retrograde Case.** *Astronomy & Astrophysics.* 414, n. 2; 727-734, 2004.
- VIEIRA NETO, E.; WINTER, O. C.; YOKOYAMA, T. **The effect of Jupiter's Mass Growth on Satellite Capture. The Prograde Case.** *Astronomy & Astrophysics.* 452, n. 3; 1091-1097, 2006.
- VOKROUHLICKÝ, D.; NESRVORNÝ, D.; LIVISON, H. F. **Irregular Satellite Capture by Exchange Reactions.** *The Astronomical Journal.* 136; 1463-1476, 2008.