

JEAN SILVA SOARES

**UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS POSSÍVEIS CENÁRIOS PARA A
FORMAÇÃO DINÂMICA DOS OBJETOS DO TIPO SEDNA POR
MEIO DE UM SIMULADOR OBSERVACIONAL DE
OBJETOS TRANSNETUNIANOS**

Tese apresentada ao Observatório
Nacional / MCT como parte das exigências
do programa de pós-graduação em
Astronomia para a obtenção do título de
doutorado

Orientador: Rodney da Silva Gomes

OBSERVATÓRIO NACIONAL / MCT

RIO DE JANEIRO – BRASIL

2011

**A minha mãe, Marcelina Pereira da Silva,
dedico este trabalho**

AGRADECIMENTOS

- À minha mãe, Marcelina Pereira da Silva, pelo incentivo aos meus estudos.
- Ao Dr. Rodney da Silva Gomes, por todo o conhecimento que me transmitiu nos anos em que este trabalho foi realizado, bem como pela paciência e dedicação.
- Ao Observatório Nacional / MCT por toda a estrutura e apoio fornecidos, juntamente com os professores que me lecionaram os conteúdos de nivelamento.
- Aos meus amigos do Rio de Janeiro e aos meus colegas que já não estão mais em meu convívio diário.
- Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.
- A todas as pessoas que de maneira direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE

Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de figuras	iv
Lista de tabelas	x
1. Introdução	01
2. Os cenários para a formação da nuvem interna de Oort	07
2.1 O cenário da companheira solar de massa planetária.....	08
2.1.1 O modelo com os planetas em suas órbitas correntes.....	08
2.1.2 O modelo da migração planetária.....	14
2.2 O cenário do aglomerado estelar.....	18
2.3 O cenário da origem extra solar.....	25
3. Comparação dos cenários através de um simulador observacional	32
3.1 O simulador observacional de objetos transnetunianos.....	32
3.2 Análises estatísticas para o cenário da companheira solar de massa planetária.....	33
3.3 Análises estatísticas para o cenário do aglomerado estelar.....	38
3.4 Análises estatísticas utilizando valores do coeficiente de decaimento $q \neq 3.0$	42
3.5 Análises estatísticas para o cenário da captura extra solar de planetesimais.....	45
4. Conclusões	51
Bibliografia	56

Resumo

Neste trabalho investigamos a formação orbital primordial de objetos componentes da borda interna da nuvem de Oort, com principal ênfase nos objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Podemos encontrar na literatura vários cenários possíveis que descrevem a formação das órbitas destes objetos, porém 02 cenários específicos se mostram mais plausíveis: O cenário da companheira solar de massa planetária (Gomes e colaboradores, 2006) e o cenário do aglomerado estelar denso (Brasser e colaboradores, 2006).

Construímos as distribuições orbitais de objetos de gelo a partir dos cenários descritos acima e realizamos uma comparação estatística entre os dois através da utilização de um simulador observacional de corpos transnetunianos com o objetivo de se avaliar qual cenário melhor descreve a formação dinâmica dos objetos pertencentes a nuvem de Oort interna. Utilizamos como parâmetro de comparação entre os resultados o fato que Sedna é o 82º objeto do tipo espalhado observado com semieixo maior acima de 100 UA e periastro acima de 30 UA. Utilizamos na construção do simulador observacional uma lei de potência cumulativa com índice de decaimento $q = 3$ para determinar os tamanhos dos objetos. Os resultados obtidos por intermédio de ambos cenários descritos acima reproduzem igualmente bem para parâmetros específicos as órbitas dos objetos do tipo Sedna, porém para cenário do aglomerado estelar o coeficiente de decaimento que melhor reproduz as órbitas é de 3.5. Concluimos que são necessárias observações de novos objetos pertencentes a nuvem interna de Oort para que seja possível caracterizar de maneira mais precisa qual cenário melhor descreve a origem destes objetos.

Investigamos também a possibilidade de que parte da nuvem de Oort interna seja composta por objetos extra solares que foram capturados pelo Sol em encontros estelares quando o mesmo ainda era componente de um aglomerado estelar imerso, e através da utilização do simulador observacional, mostramos que para a população de objetos extra solares que obtivemos a probabilidade de se observar hoje um objeto de origem extra solar é pequena, indicando que Sedna provavelmente não possui origem extra solar.

Abstract

In this work we investigated the primordial orbital formation of objects belonging to the inner of Oort cloud, aiming at the TNO's CR₁₀₅, VN₁₁₂ and Sedna. We find in the literature several scenarios which describe the formation of the orbits of these objects, but two specific ones are more plausible: The planetary-mass solar companion scenario (Gomes et. al., 2006) and the embedded star cluster scenario (Brasser et. al., 2006).

Building the results from the scenarios described above, we do a statistical comparison between them using a observational simulator of transneptunian bodies aiming at evaluating which one better describes the formation dynamics of objects belonging to inner Oort cloud. We use as comparison parameter between the results the fact that Sedna is 82° observed object with semimajor axis above 100 UA and perihelium above 30 UA. In the construction of a observational simulator we use a cumulative power law distribution with slope $q = 3$ to compute the objects size. The results obtained by both scenarios described above reproduce the orbits of Sedna-type objects, but for the embedded star cluster scenario the slope $q = 3.5$ would better set the results. We conclude that is necessary that new objects belonging the inner Oort cloud must be discovered so that it maybe possible to characterize more accurately which scenario better describes the objects origin.

We also investigate the possibility that part of the inner Oort cloud consists of extra-solar objects that were captured by the Sun in stellar close-encounters when the Sun was a star in an embedded star cluster. Through the observational simulator, we show that the probability of an extra solar object observation today is small, indicating that Sedna probably do not have an extra solar origin.

Lista de Figuras

FIGURA 01 - Distribuição de objetos transnetunianos observados, atualizado em 10/2010. Os dados foram obtidos em “www.minorplanetcenter.net”..... **02**

FIGURA 02 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro inicialmente próximas a Netuno após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $M_c = 5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.0$ e inclinações $i = 0, 45, 135$ e 180° **09**

FIGURA 03 - Histograma para as inclinações dos objetos com semieixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $M_c = 5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.0$ e inclinações $i = 0, 45, 135$ e 180° **10**

FIGURA 04 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro inicialmente próximas a Netuno após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $M_c = 1.5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.8$ e inclinações $i = 0, 45, 90$ e 135° **11**

FIGURA 05 - Histograma para as inclinações dos objetos com semieixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $M_c = 1.5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.8$ e inclinações $i = 0, 45, 90, 135^\circ$ **12**

FIGURA 06 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro inicialmente próximas a Netuno após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira estão indicados nos gráficos, e todas as companheiras com inclinação $i = 90^\circ$ e semieixo maior $a = 1500$ UA..... **13**

FIGURA 07 - Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA para a distribuição de objetos resultante das três companheiras apresentadas na figura 05..... **13**

FIGURA 08 - Distribuição de planetesimais em semieixo maior versus periastro para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\odot$ **16**

FIGURA 09 - Distribuição de planetesimais em semieixo maior versus periastro para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $i_c = 80^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\odot$ **17**

FIGURA 10 - Distribuição de planetesimais em periastro versus inclinação para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Apenas as partículas com semieixo maior entre $100 < a < 550$ UA estão representadas. Os círculos em preto representam as partículas correspondentes à companheira com $i = 40^\circ$, os círculos em preto representam as partículas correspondentes à companheira com $i = 80^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros das companheiras são os mesmos utilizados nas figuras 07 e 08..... **17**

FIGURA 11 - Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $M_c = 10^{-4} M_\odot$ e inclinações 40 e 80° respectivamente..... **18**

FIGURA 12 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a

direita, correspondem respectivamente a estrela com órbita interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar, correspondente a densidade $10^4 M_{\odot}pc^{-3}$ 22

FIGURA 13 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a direita, correspondem respectivamente a estrela interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar, correspondente a densidade $3 \times 10^4 M_{\odot}pc^{-3}$ 23

FIGURA 14 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a direita, correspondem respectivamente a estrela interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar, correspondente a densidade $1 \times 10^5 M_{\odot}pc^{-3}$ 24

FIGURA 15 - Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, para o modelo da aglomerado estelar imerso. Da esquerda para a direita, a distribuição em inclinações para $\rho_0 = 1 \times 10^4 M_{\odot}pc^{-3}$ (estrela mais interna ao aglomerado), $\rho_0 = 3 \times 10^4 M_{\odot}pc^{-3}$ (estrela intermediária ao aglomerado) e $\rho_0 = 1 \times 10^5 M_{\odot}pc^{-3}$ (estrela mais externa ao aglomerado)..... 26

FIGURA 16 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central inicial $1 \times 10^4 M_{\odot}pc^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida..... 28

FIGURA 17 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central

inicial $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida..... 29

FIGURA 18 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares. Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central inicial $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida..... 29

FIGURA 19 - Distribuição de planetesimais em semieixo maior versus periastro para o cenário da companheira solar em que consideramos a migração planetária. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este modelo, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_{\odot}$ 36

FIGURA 20 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar apresentado na figura 18. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 74 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 57..... 36

FIGURA 21 - Distribuição de planetesimais em semieixo maior versus periastro para o cenário da companheira solar em que consideramos a migração planetária. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este modelo, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 80^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_{\odot}$ 37

FIGURA 22 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar apresentado na figura 18. Foram executadas 300

realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 79.4 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 51..... 37

FIGURA 23 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário do aglomerado estelar imerso, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este cenário, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais com $a > 50 \text{ UA}$ e $q > 30 \text{ UA}$ observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort..... 41

FIGURA 24 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário do aglomerado estelar imerso apresentado na figura 22. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 55.2 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 40. Neste exemplo consideramos que a massa total inicial na região de Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$ 42

FIGURA 25 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar de massa planetária em que variamos o coeficiente de decaimento q . Foram executadas 300 realizações do simulador observacional..... 43

FIGURA 26 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário do aglomerado estelar imerso em que variamos o coeficiente de decaimento q . Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. Consideramos que a massa total inicial na região de Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$ 44

FIGURA 27 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300

realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort..... 46

FIGURA 28 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 103 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 80..... 47

FIGURA 29 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort..... 48

FIGURA 30 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 44 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 31..... 49

FIGURA 31 - Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort..... 50

FIGURA 32 - Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 3.7 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 3..... **50**

Lista de Tabelas

TABELA 01 - Tabela 01: Parâmetros de referência utilizado nos cenários do aglomerado estelar imerso e da captura extra solar Da esquerda para a direita, temos a densidade central inicial do aglomerado estelar, o raio de Plummer, o número de estrelas em cada aglomerado, a massa total (estrelas + gás) e o número de estrelas de massa solar de cada aglomerado..... **20**

TABELA 02 - Parâmetros de referência utilizados no cenário da captura extra solar Da esquerda para a direita, temos a densidade central inicial do aglomerado estelar, o rótulo utilizado para a estrela de massa solar, o número de encontros estelares com semi eixo maior < 6000 UA e excentricidade < 3.0 , o número de planetesimais que foram capturados pelo Sol ao final da integração numérica e a porcentagem que este número representa com relação ao número de planetesimais que compõe o disco padrão utilizado para cada densidade central inicial do aglomerado..... **31**

1 – Introdução

As órbitas dos corpos do Sistema Solar transnetuniano podem ser agrupadas em alguns grupos distintos de objetos observados (Figura 01), que diferem em nomenclatura dependendo da natureza da análise, se focada na dinâmica atual ou focada na origem dos objetos. Gladman e colaboradores (2008) fazem uma proposta de nomenclatura baseada na dinâmica atual dos planetesimais, sendo que os objetos transnetunianos ficam agrupados em:

- 1 – Os objetos em ressonância de movimento médio com Netuno, como os Plutinos, em ressonância 2:3, objetos em ressonância 1:3, 1:4, entre outras.
- 2 – Os objetos do disco espalhado, que são correntemente espalhados por Netuno para órbitas com elevados valores em excentricidade e semieixo maior, com periastros próximos à Netuno.
- 3 – Os objetos que compõe um disco espalhado estendido (também conhecidos como objetos destacados), sendo que estes objetos não estão correntemente sendo espalhados por Netuno e não estão distantes o suficiente para que perturbações externas se tornem importantes para sua dinâmica.
- 4 – Cinturão de Kuiper clássico, composto de objetos em órbitas não-ressonantes, sendo estes objetos subdivididos em objetos de alta inclinação e objetos de baixa inclinação.
- 5 - A nuvem de Oort, que se estende para valores em semieixo maior acima de 5000 UA.

O cinturão de Kuiper é composto por uma grande população de objetos de gelo que orbitam o Sol em órbitas próximas a Netuno e se originaram do disco de planetesimais primordial remanescente do disco protoplanetário solar. É composto por objetos em órbitas não-ressonantes (Malhotra 1995, Gomes 2003), subdividido em objetos com inclinações altas e objetos com inclinações baixas; e de objetos ressonantes (ressonâncias de movimento médio com Netuno), que podem apresentar valores altos em excentricidade (Duncan e colaboradores, 1995).

Os objetos componentes do disco espalhado têm sua provável origem no espalhamento de objetos que cruzaram a órbita de Netuno durante a migração planetária primordial, adquirindo assim órbitas com elevados valores em excentricidade e periastros com valores próximos aos de Netuno. Estes objetos sofrem um forte espalhamento em semieixo maior podendo ser lançados para regiões distantes do Sistema Solar, e por apresentarem valores em periastros próximos ao de Netuno, podem sofrer novos encontros com o planeta (Gomes e colaboradores, 2005).

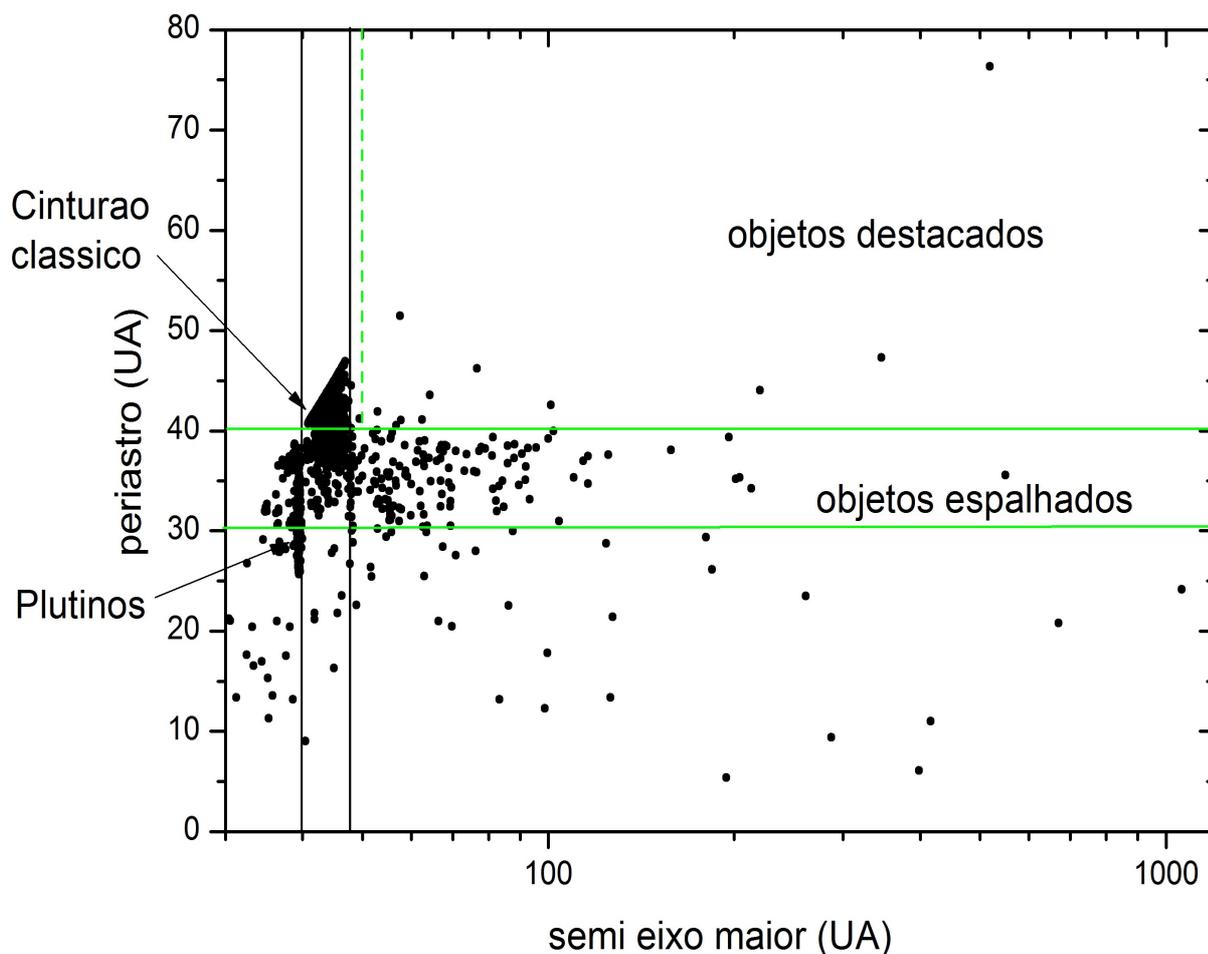


Figura 01: Distribuição de objetos transnetunianos observados, atualizado em 10/2010. Os dados foram obtidos em “www.minorplanetcenter.net”

Os objetos com periastrós aproximadamente maiores que 40 UA e $a > 50$ UA são classificados como componentes de um disco espalhado estendido, também conhecidos como objetos destacados. Estes objetos poderiam inicialmente ser componentes do disco espalhado, e tiveram seus periastrós desacoplados da influência gravitacional forte de Netuno por meio de mecanismos ressonantes. Gomes e colaboradores, 2005, mostram que estes objetos se formaram próximos ao Sol e, durante a fase de migração de Netuno, foram espalhados e posteriormente capturados em uma ressonância de movimento médio associada ao mecanismo de Kozai (libração do argumento do periastro associada a variações acopladas de altas amplitudes da excentricidade e inclinação), o que permite um acentuado aumento na distância do periastro (quando a excentricidade aumenta, a inclinação diminui, devido ao efeito da ressonância de Kozai, e vice versa) destes objetos. Segundo o mesmo artigo, objetos que escapam deste mecanismo através de migração planetária podem ser fossilizados em valores de periastro de até 69 UA e semieixo maior

de até 260 UA.

Em 1950 J. H. Oort (Oort, 1950) observou que cometas com longos períodos orbitais apresentavam semieixos maiores concentrados em $a \sim 10^4$ UA. Esta constatação o levou a postular que o Sistema Solar é cercado por uma nuvem esférica de cometas formada pelo espalhamento destes objetos pelos planetas externos para órbitas altamente excêntricas. Perturbações posteriores exercidas por estrelas poderiam então elevar o valor do periastro destes cometas, retirando-os assim da região de possíveis encontros próximos com os planetas. Este reservatório de cometas ficou conhecido então como nuvem de Oort. As mesmas perturbações destas estrelas sobre os objetos eventualmente poderiam perturbar os cometas de volta à região planetária em direção ao Sistema Solar interno, sendo então passíveis de observação a partir da Terra. Duncan e colaboradores, 1987, mostram que o efeito de maré galáctica exercida pelo contorno galáctico em que o Sol se encontra é o principal mecanismo de formação da nuvem de Oort, além das já citadas passagens próximas de estrelas.

Sedna é atualmente um dos objetos mais intrigantes observado no Sistema Solar externo. Foi descoberto pela primeira vez por Brown e colaboradores, 2004, em uma pesquisa observacional por objetos longínquos que se iniciou em novembro de 2001, no Observatório Palomar. A partir de medidas deste objeto em 2001, 2002 e 2003 foi possível determinar seus elementos orbitais, que na época eram $a = 480 \pm 40$ UA, $e = 0.84 \pm 0.01$ e $i = 11.927^\circ$. Assumindo uma distribuição em tamanho dos objetos baseado nos objetos do cinturão de Kuiper observados até então, estimaram a massa de uma possível população de objetos do tipo Sedna em aproximadamente $5 M_\oplus$, sendo uma estimativa mais precisa inviável devido a existência de apenas um objeto observado. Brown e colaboradores argumentam que o cenário mais plausível para a formação dinâmica de objetos do tipo Sedna possivelmente é o cenário em que os efeitos dinâmicos da criação do Sistema Solar dentro de um aglomerado estelar primordial e imerso em gás são levados em consideração, porém outros cenários também são possíveis, dentre os quais o cenário da perturbação gravitacional de um planeta não observado e o cenário de encontros estelares com o Sistema Solar. Além de Sedna, os objetos 2000 CR₁₀₅ ($a = 220$ UA, $q = 44.0$ UA e $i = 22.8^\circ$) e 2004 VN₁₁₂ ($a = 346$ UA, $q = 47.3$ UA e $i = 25.5^\circ$) também não se classificam como membros de nenhum dos grupos de objetos descritos acima. Atualmente estes objetos podem ser classificados como componentes de uma borda interna da nuvem de Oort (embora CR₁₀₅ possa ser marginalmente formado através do mecanismo ressonante descrito por Gomes e colaboradores (2005)), apesar de suas órbitas atualmente observadas não poderem ser formadas pelo mesmo mecanismo dinâmico (maré galáctica) que produz a nuvem de Oort clássica. Na literatura podemos encontrar vários cenários que tentam descrever a dinâmica peculiar destes objetos.

Morbidelli e Levison (2004) testam cinco diferentes cenários para a origem dinâmica dos objetos tipo Sedna:

- 1 – A passagem de Netuno por uma fase de excentricidade alta;
- 2 – A possível existência de massivos embriões planetários no cinturão de Kuiper ou no disco espalhado;
- 3 – A presença de um disco de planetesimais transnetunianos massivos em alguma época inicial que perturbou os objetos com altas inclinações do disco espalhado;
- 4 – Encontros estelares que perturbaram as órbitas de alguns objetos transnetunianos;
- 5 – A captura de objetos extra-solares de anãs marrons ou pequenas estrelas em encontros próximos com o Sistema Solar.

Eles concluíram que apenas os mecanismos 4 e 5 são capazes de destacar objetos como CR₁₀₅ e Sedna para suas órbitas correntes, sendo o mecanismo 04 mais eficiente.

Gomes e colaboradores, 2006, propõem que as órbitas de objetos do tipo Sedna poderiam ser formado por meio de perturbações de uma hipotética companheira solar de massa planetária. Neste trabalho, esta hipótese é testada através de simulações computacionais utilizando-se vários valores de massas, semieixos maiores, excentricidades e inclinações para companheiras solares com o objetivo de se determinar os elementos orbitais das companheiras que podem produzir objetos componentes da borda interna da nuvem de Oort. Várias simulações foram realizadas utilizando-se 500 partículas sem massa uniformemente distribuídas entre $27 < a < 29$ UA e 500 partículas entre $31 < a < 33$ UA, todas as partículas com inclinações randomicamente distribuídas entre 0 e 1° , excentricidades randomicamente distribuídas entre 0 e 0.1, e os quatro gigantes gasosos em suas órbitas atuais, sendo o tempo total para cada integração numérica indo até 10^9 anos. Realizaram também uma única integração numérica considerando um modelo completo de evolução planetária em que os quatro planetas gigantes inicialmente se encontram em órbitas compactas e um disco de planetesimais massivos externos ao último planeta. Neste modelo, o disco interage com os planetas induzindo uma migração orbital através da troca de momento angular entre os planetesimais e os planetas, em um modelo conhecido como Modelo de Nice (Tsiganis e colaboradores, 2005; Morbidelli e colaboradores, 2005; Gomes e colaboradores, 2005). O disco é composto por 1×10^4 planetesimais totalizando uma massa de $35 M_\oplus$, distribuídos entre $15.5 < a < 35$ UA com uma densidade superficial proporcional a r^{-1} . Neste modelo, os parâmetros da companheira são $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e massa $M_c = 10^{-4} M_\odot$. Também são considerados os efeitos de maré galáctica. Como resultado, é mostrado neste trabalho que os efeitos da perturbação secular sobre objetos do disco espalhado podem produzir objetos destacados próximos da região de Sedna e CR₁₀₅, para companheiras com elementos orbitais e massas diversas. Considerando pequenos valores em

excentricidades, a massa mínima exigida para que uma companheira possa produzir objetos do tipo Sedna é de uma massa de Netuno orbitando com um semieixo maior de 2000 UA, ou de uma massa de Júpiter orbitando com semieixo maior de 5000 UA e de 8 massas de Júpiter em 10000 UA. É mostrado também que uma companheira com uma massa terrestre em 1000 UA, com uma excentricidade de $e_c = 0.94$ e inclinação de 5° também é capaz de destacar objetos para a região de Sedna, de forma que o modelo envolvendo uma companheira solar de massa planetária é eficiente em produzir objetos destacados com altos valores de periastro e semieixo maior.

Brasser e colaboradores, 2006, desenvolveram de maneira mais detalhada o cenário de encontros estelares por meio de simulações computacionais. A hipótese fundamental deste trabalho é que o Sol se originou em um aglomerado estelar imerso em gás, e que nesta fase inicial o número de encontros estelares com o Sistema Solar era elevado. Estes encontros estelares mais o potencial do gás são capazes de destacar o periastro de planetesimais que são espalhados por Júpiter e Saturno para regiões fora do domínio gravitacional destes dois planetas. Foram utilizadas 2000 partículas sem massa distribuídas uniformemente entre 4 e 12 UA, com valores médios de excentricidades e inclinações de 0.02 e 0.01 radianos, respectivamente, e mais 200 partículas entre 20 e 50 UA para representar um cinturão de Kuiper primordial. Júpiter e Saturno são colocados inicialmente em órbitas pré-bombardamento pesado tardio (Júpiter em 5.45 UA e Saturno em 8.2 UA), de acordo com o modelo de Nice. A massa de cada estrela é sorteada seguindo uma função de distribuição com uma eficiência de formação de 25%, as posições e velocidades sendo randomicamente retiradas de uma função polítopo de ordem $n = 5$ (Binney e Tremaine, 1987) através do método de exclusão de Von Neumann (Methods of Celestial Mechanics, 1961). Desta forma, é montado um catálogo de massas, posições e velocidades para as estrelas. Uma vez obtidas todas as condições iniciais, as estrelas são integradas sob a influência do potencial de Plummer (o potencial de Plummer é utilizado por simular o efeito do potencial do gás e das estrelas do aglomerado), sendo desconsiderado os efeitos gravitacionais individuais de uma estrela sobre a outra. Sempre que uma estrela se aproxima de uma determinada distância – normalmente metade de um raio de Plummer para elevados valores da densidade central inicial do aglomerado e 01 raio de Plummer para densidades mais baixas – é impresso em um arquivo de saída o tempo do encontro, as massas, posições e velocidades das estrelas que estão sofrendo o encontro próximo. Após obterem uma lista de encontros entre as estrelas, novas integrações são realizadas, considerando cada estrela com massa entre 0.8 e 1.2 massas solares, como sendo o Sol (corpo central do sistema). Nesta integração são incluídos Júpiter, Saturno, os planetesimais, a estrela considerada como o Sol mais os efeitos do potencial de Plummer sobre todos os componentes do sistema. Encontros estelares são adicionados nesta fase, segundo a base de dados obtida conforme descrito acima. As densidades centrais iniciais

de cada aglomerado estelar utilizadas vão de $10^2 - 10^6 \text{ M}_\odot\text{pc}^{-3}$. Como resultado, planetesimais espalhados por Júpiter e Saturno são destacados para região de Sedna apenas para densidades $\rho_0 \geq 10^4 \text{ M}_\odot\text{pc}^{-3}$, sendo que quanto maior a densidade central inicial mais interno ao Sistema Solar é a borda interna da nuvem de Oort resultante.

Desta maneira, dentre todos os cenários propostos para a formação dinâmica de órbitas dos objetos pertencentes a nuvem interna de Oort, os que mais acumulam sucesso são os cenários da companheira solar de massa planetária e do aglomerado estelar imerso. Para o cenário da companheira solar, a maior crítica é devida à formação desta companheira, já que planetas devem se formar em regiões mais próximas do Sol (Planet Formation, Cambridge University Press, 2006). Para o cenário do aglomerado estelar denso, as maiores críticas são devidas as incertezas relativas as propriedades (densidades, números de componentes estelares, etc.) do aglomerado estelar em que o Sol surgiu.

Uma recente pesquisa observacional por objetos distantes foi realizada por Schwamb e colaboradores, 2010, utilizando o telescópio Samuel Oschin localizado no Observatório Palomar (este é o mesmo telescópio que detectou Sedna pela primeira vez). Um total de 52 objetos componentes do cinturão de Kuiper e Centauros foram observados, dos quais 25 objetos foram observados pela primeira vez. Sedna foi observado novamente, mas nenhum objeto do tipo Sedna com periastro acima de 45 UA foi obtido, apesar do fato de que esta pesquisa observacional tinha a capacidade de detectar objetos lentos em até 1000 UA com uma magnitude visual de ~ 21.5 . Baseado em suas observações e assumindo que objetos do tipo Sedna são formados pelo cenário descrito por Brassier e colaboradores, 2006, Schwamb e colaboradores argumentam que o único valor plausível para a densidade central inicial do aglomerado estelar que o Sol surgiu é de $10^4 \text{ M}_\odot\text{pc}^{-3}$.

No capítulo 2, descreveremos com detalhes os cenários da companheira solar de massa planetária e do aglomerado estelar, e reproduziremos os principais resultados obtidos por intermédio destes cenários. Apresentaremos também um terceiro cenário que parte da hipótese de que um certo número de objetos componentes da nuvem interna de Oort formada por um dos mecanismos descritos acima deve ter origem extra solar, e alguns destes objetos possivelmente podem ser futuramente observados. No capítulo 3 é realizado uma comparação entre estes cenários por meio da utilização de um simulador observacional de objetos transnetunianos, visando coletar informações que nos levem a determinar restrições que nos auxiliem a determinar qual cenário reproduz de maneira mais eficaz as órbitas dos objetos componentes da nuvem interna de Oort. No capítulo 4 tecemos nossas conclusões e descrevemos futuras pesquisas acerca deste trabalho.

2 – Os cenários para a formação da nuvem interna de Oort

Neste capítulo serão apresentados os 3 principais cenários para a origem das órbitas de objetos do tipo Sedna. O primeiro cenário é o modelo da companheira solar de massa planetária (Gomes e colaboradores, 2006), o segundo é o cenário do aglomerado estelar imerso em gás (Brasser e colaboradores, 2006) e o terceiro cenário é o da origem extra solar (Levison e colaboradores, 2010 apresenta um modelo semelhante, porém adaptado ao estudo da nuvem de Oort externa).

Como apenas um objeto componente da nuvem interna de Oort foi observado até o momento, não temos muita informação acumulada para definir todas as características desta suposta população. Porém, podemos sugerir algumas propriedades que acreditamos ser plausíveis, baseado nos elementos orbitais deste objeto e do conhecimento acumulado em observações realizadas dos objetos transnetunianos. Seguiremos as sugestões propostas por Gomes e colaboradores, 2006:

1 - Para a distribuição no espaço a - q em um semieixo maior de ~ 500 UA, Sedna deve estar dentro ou na borda inferior da distribuição em q , já que se Sedna estivesse na parte superior, estatisticamente é esperado que outros objetos com q menor já seriam sido descobertos;

2 - A primeira condição também seria esperada para órbita do objeto CR₁₀₅ em aproximadamente 220 UA, entretanto 04 outros objetos com $a \sim 220$ UA já foram descobertos, porém com periastros menores que CR₁₀₅. Desta maneira, CR₁₀₅ pode ser componente da parte superior em periastro da distribuição em a - q em torno de 220 UA;

3 - Sedna deve pertencer também à borda interna da distribuição no espaço a - q para valores de $q \sim 76$ UA. Não é estatisticamente esperado encontrar muitos outros objetos com o mesmo periastro e com valores menores que ~ 500 UA, pois estes objetos provavelmente seriam observados primeiro;

4 - A distribuição de inclinações em torno do Sedna deve conter uma boa proporção de objetos com pequenas inclinações. Sedna foi descoberto em uma órbita com inclinação baixa por uma pesquisa em *all-sky survey* (Brown, Trujillo e Rabinowicz, 2004), o que fortalece o fato que Sedna possivelmente pertença a uma população que possua baixos valores de inclinação.

Uma teoria que pretenda explicar as órbitas de uma possível população de corpos do tipo Sedna deve ser capaz de gerar um número razoável de objetos com algumas destas características descritas acima, em regiões em torno de Sedna.

2.1 - O cenário da companheira solar de massa planetária

A investigação é realizada através de integrações numéricas considerando dois modelos distintos: o modelo completo que inclui a migração planetária e um modelo em que os planetas inicialmente estão em suas órbitas correntes, baseado no artigo de Gomes e colaboradores, 2006. O código utilizado para realizar estas integrações foi o MERCURY (Chambers e Migliorini, 1997).

2.1.1 – O modelo com os planetas em suas órbitas correntes

Com o objetivo de se determinar os melhores valores de massa e parâmetros orbitais de uma companheira solar de massa planetária, construímos um modelo simplificado, a fim de se economizar tempo computacional. Este modelo considera todos os quatro maiores planetas em suas presentes órbitas e uma companheira solar de massa planetária. Todas as partículas não possuem massa e iniciam próximo a Netuno, com o objetivo de serem espalhadas pelo planeta. Inicialmente são 1000 partículas, 500 partículas uniformemente distribuídas com semieixo maior entre 27 e 29 UA, 500 partículas uniformemente distribuídas com semieixo maior entre 31 e 33 UA. As excentricidades iniciais são randomicamente distribuídas entre 0 e 0.1 e as inclinações iniciais randomicamente distribuídas entre 0 e 1°. Iremos comparar a distribuição gerada por cinco companheiras diferentes, todas com mesmo semieixo maior, mas com massas, inclinações e excentricidades diferentes. O tempo de integração utilizado para todos os resultados é de 4.5 bilhões de anos. Desta maneira, dado um valor fixo em semieixo maior, podemos verificar os parâmetros orbitais destas 5 companheiras e inferir sobre as características da população de objetos gerada, baseado nos resultados,

A figura 2 mostra a distribuição no espaço a versus q gerada por uma companheira de massa $M_c = 5 \cdot 10^{-5} M_\odot$ (esta massa é equivalente a 01 massa de Netuno), $a = 1500$ UA, $e = 0.0$ e inclinação $i = 0, 45, 135$ e 180° . Os círculos em preto representam os objetos com inclinação $> 15^\circ$, os círculos em verde representam os objetos com inclinação $< 15^\circ$. Para as companheiras inclinadas de 45 e 135°, a população gerada cobre a região de interesse, mas o número de partículas com baixas inclinações é menor quando comparamos com os resultados obtidos para as companheiras

inclinadas de 0 e 180°. Na figura 3 montamos um histograma para visualizar a distribuição em inclinações para todos os objetos com $a > 300$ UA e $q > 50$ UA. As companheiras com baixas inclinações geram um bom número de objetos também com baixas inclinações, porém o número de objetos com órbitas retrógradadas é muito menor que o número de objetos com órbitas prógradas. As companheiras com $i = 45, 180^\circ$ apresentam um número maior de órbitas retrógradadas, porém um número muito menor de objetos com inclinações baixas.

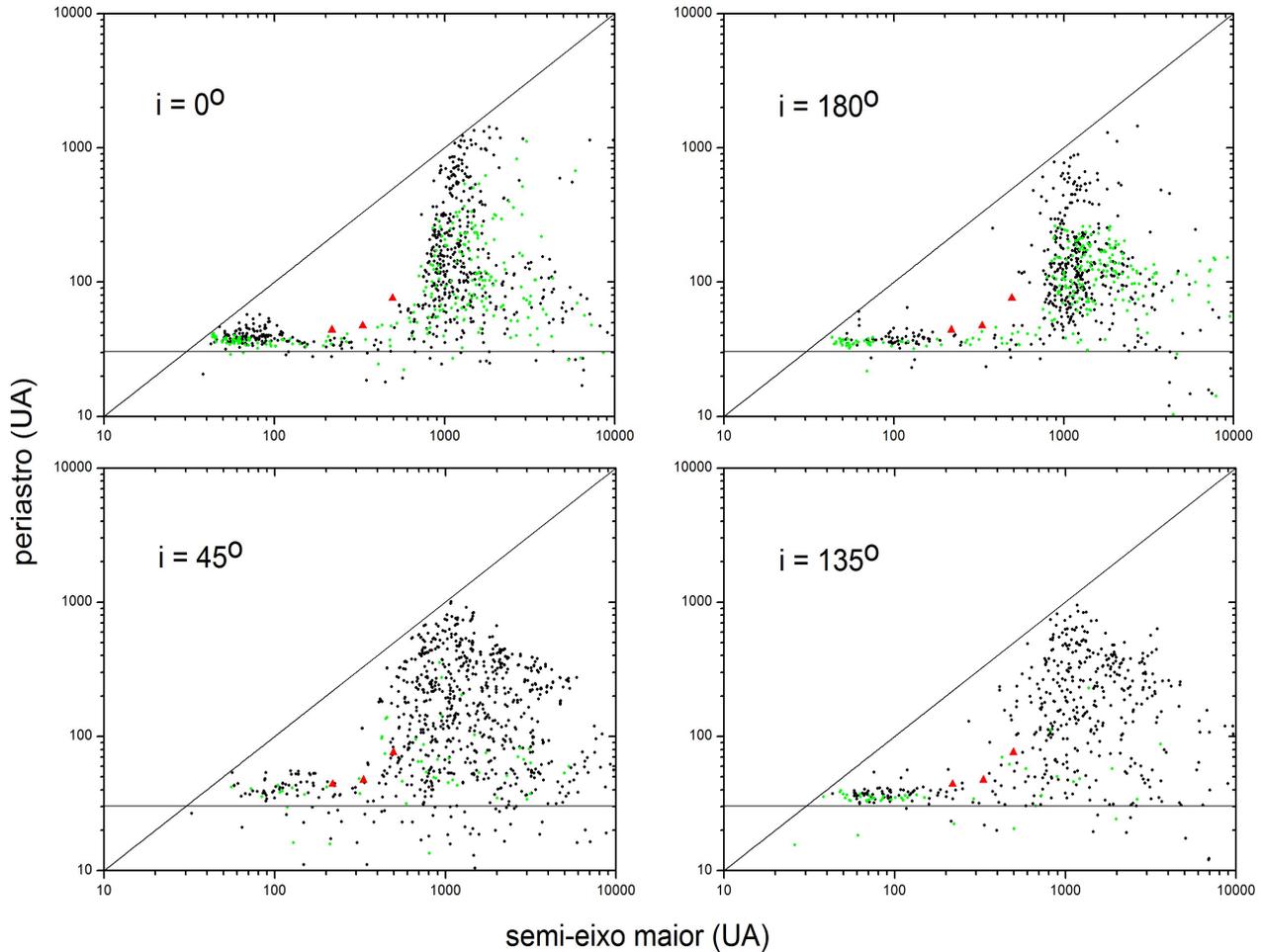


Figura 02: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro inicialmente próximas a Netuno após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $M_c = 5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.0$ e inclinações $i = 0, 45, 135$ e 180° .

A figura 4 mostra a distribuição obtida no espaço a versus q gerada por uma companheira com os mesmos parâmetros orbitais utilizada na construção da figura 2, porém com uma excentricidade $e = 0.80$ e $M_c = 1.5 \cdot 10^{-5} M_\odot$ (esta massa é equivalente a 05 massas da Terra). Podemos observar que obtemos objetos destacados para a região de CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Para $i = 0^\circ$, o número de partículas com inclinações com valores baixos é maior, porém o número de objetos com semieixo maior em torno de 500 UA e periastro abaixo de 76 UA é elevado. Estatisticamente

estes objetos deveriam ser observados antes de se observar Sedna. A figura 5 mostra em um histograma a distribuição de inclinações para todos os objetos com $a > 300$ UA e $q > 50$ UA. Para a companheira com inclinação nula a distribuição de objetos com baixas inclinações é cerca de 45% do total de objetos e a distribuição de objetos com órbitas retrógradadas representa cerca de 27% do total de objetos. Para as demais inclinações da companheira, o número de objetos com valores baixos de inclinações é muito menor, e o número de objetos com órbitas prógradas e retrógradadas é praticamente uniforme.

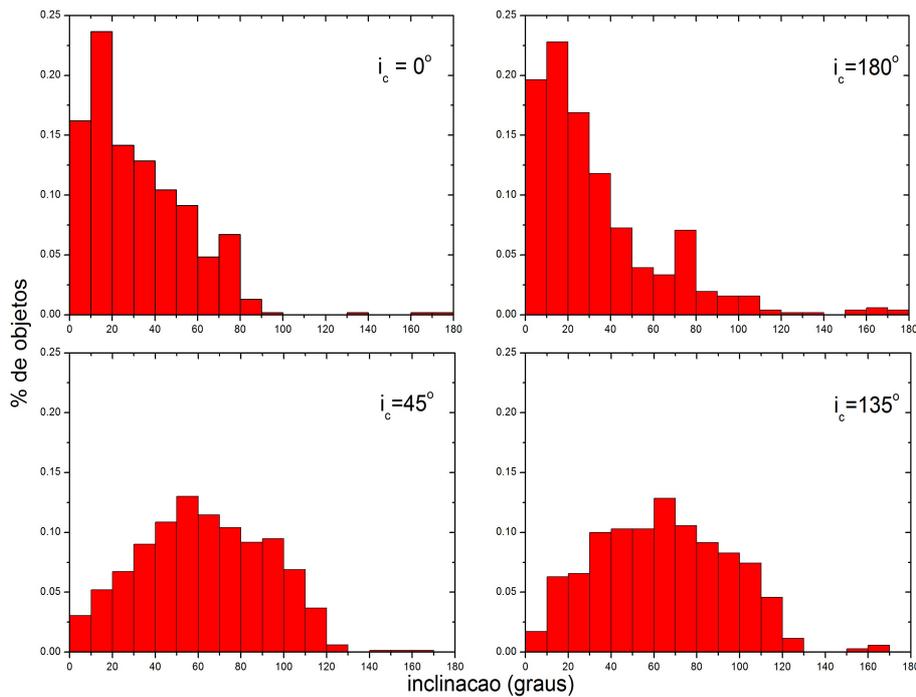


Figura 03: Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $M_c = 5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.0$ e inclinações $i = 0, 45, 135$ e 180° .

A figura 6 mostra a distribuição obtida para três companheiras com massas diferentes, todas com semi eixo maior igual a 1500 UA. O primeiro caso, mostra o resultado obtido para uma companheira de massa próxima a massa da Terra, $M_c = 3.6 \cdot 10^{-6} M_\odot$, $i_c = 90^\circ$ e uma órbita altamente excêntrica, $e_c = 0.955$. A distribuição apresenta um número grande de partículas com inclinações abaixo de 15° para os objetos do tipo Sedna. O segundo caso é para uma companheira com massa $M_c = 2.5 \cdot 10^{-5} M_\odot$ (aproximadamente 8 massas da Terra), $i_c = 90^\circ$ e $e_c = 0.8$. Este resultado é interessante, pois podemos observar que temos partículas destacadas cobrindo todas as regiões de interesse, sendo que a região em torno de 500 UA não apresenta partículas com periastro $q < 76$ UA. A maior parte dos objetos com baixas inclinações se localizam em valores de periastro abaixo de 50 UA. A nuvem interna de Oort obtida por esta companheira possui uma distribuição quase uniforme para $a > 500$ UA. A distribuição obtida para uma companheira com massa $M_c = 5 \cdot 10^{-5} M_\odot$

(1 massa de Netuno), $i_c = 90^\circ$ e $e_c = 0.8$ mostra um resultado semelhante ao apresentado para a companheira com massa $M_c = 2.5 \cdot 10^{-5} M_\odot$. Porém, a região ocupada pelo Sedna apresenta uma população mais numerosa, onde encontramos um determinado número de partículas com $a < 500$ UA e $q \sim 76$ UA, que são estatisticamente mais prováveis de serem observadas que Sedna. A figura 7 mostra o histograma para as inclinações de todos os objetos com $a > 300$ UA e $q > 50$ UA para as 03 companheiras. A companheira menor e altamente excêntrica produz cerca de 50% do número de objetos pertencentes a nuvem interna de Oort com inclinações baixas (abaixo de 30°), sendo o restante dos objetos igualmente distribuídos em órbitas prógradas e retrógradas. Para as outras duas companheiras maiores, o número de objetos com inclinações baixas é pequeno, e o número de órbitas prógradas e retrógradas é semelhante.

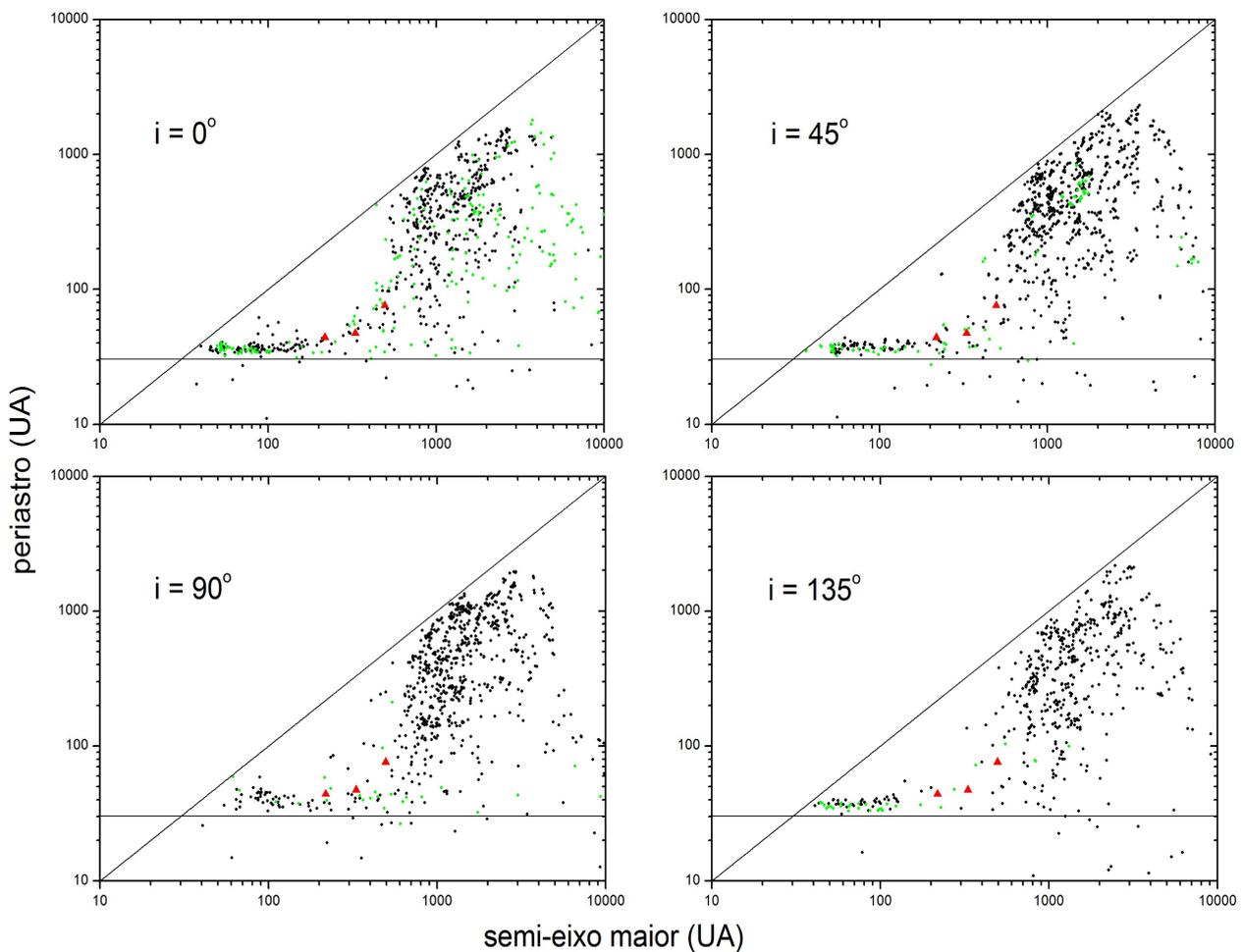


Figura 04: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastron inicialmente próximas a Netuno após $4.5 \cdot 10^9$ anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $M_c = 1.5 \cdot 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.8$ e inclinações $i = 0, 45, 90$ e 135° .

No próximo tópico, iremos apresentar os resultados para um modelo mais completo, seguindo o trabalho de Gomes e colaboradores, 2006, em que os planetesimais são espalhados pelos

planetas em um modelo evolução planetária conhecido como modelo de Nice (Gomes e colaboradores, 2005; Tsiganis e colaboradores, 2005 e Morbidelli e colaboradores, 2005). Este modelo acumula um grande número de resultados positivos, entre eles a corrente posição dos planetas gigantes com valores observados de semieixo maior, excentricidade e inclinação; o bombardeamento pesado tardio, em intensidade e tempo de ocorrência, e a formação dos asteroides troianos.

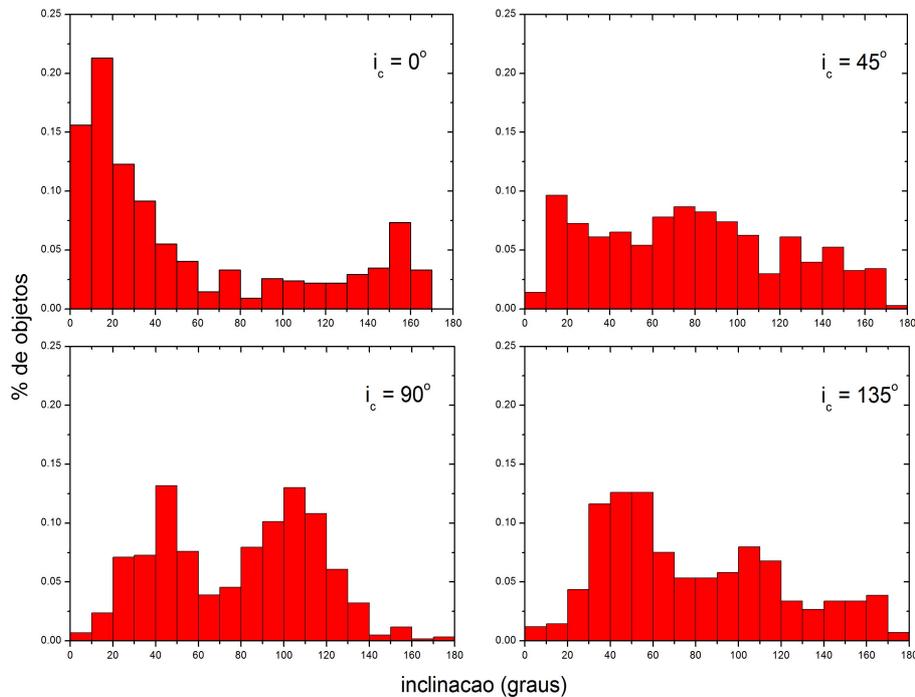


Figura 05: Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $M_c = 1.5 \times 10^{-5} M_\odot$, $a = 1500$ UA, $e = 0.8$ e inclinações $i = 0, 45, 90, 135^\circ$.

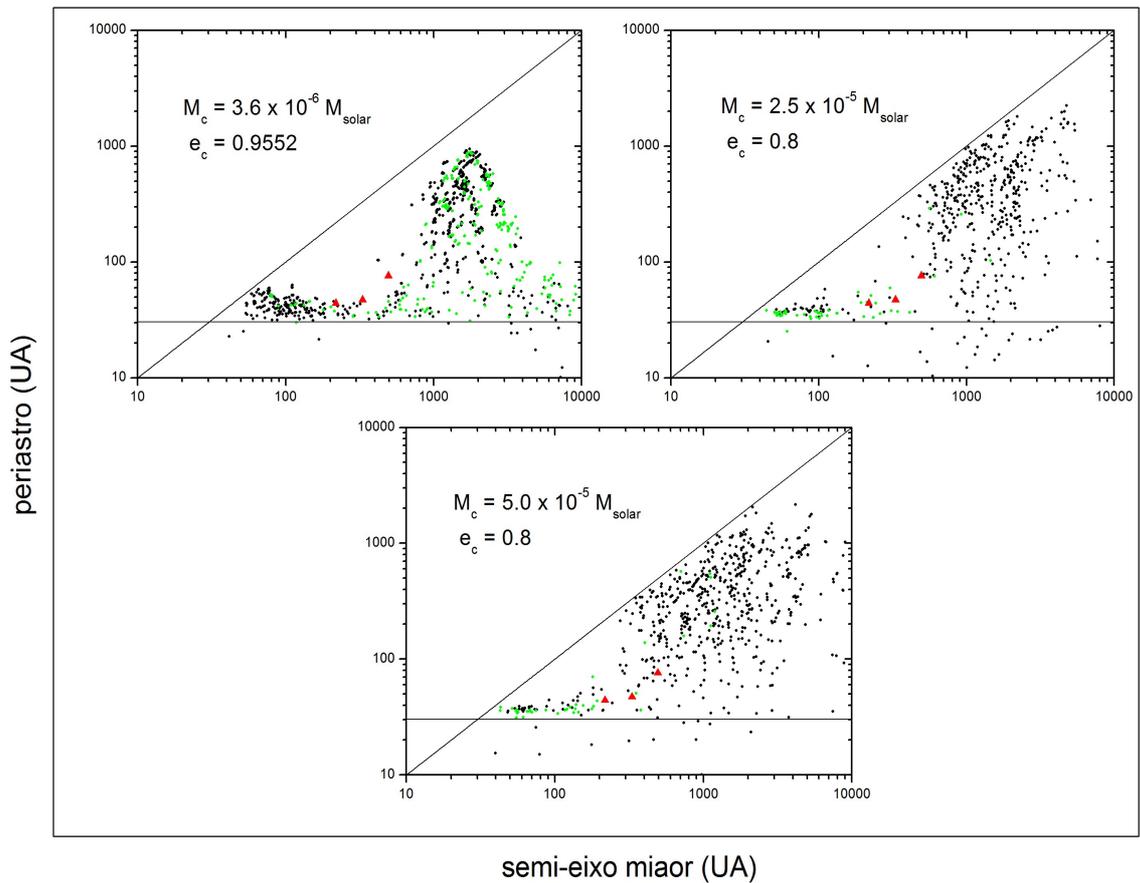


Figura 06: Distribuição de partículas em semi-eixo maior versus periastró inicialmente próximas a Netuno após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira estão indicados nos gráficos, e todas as companheiras com inclinação $i = 90^\circ$ e semi-eixo maior $a = 1500$ UA.

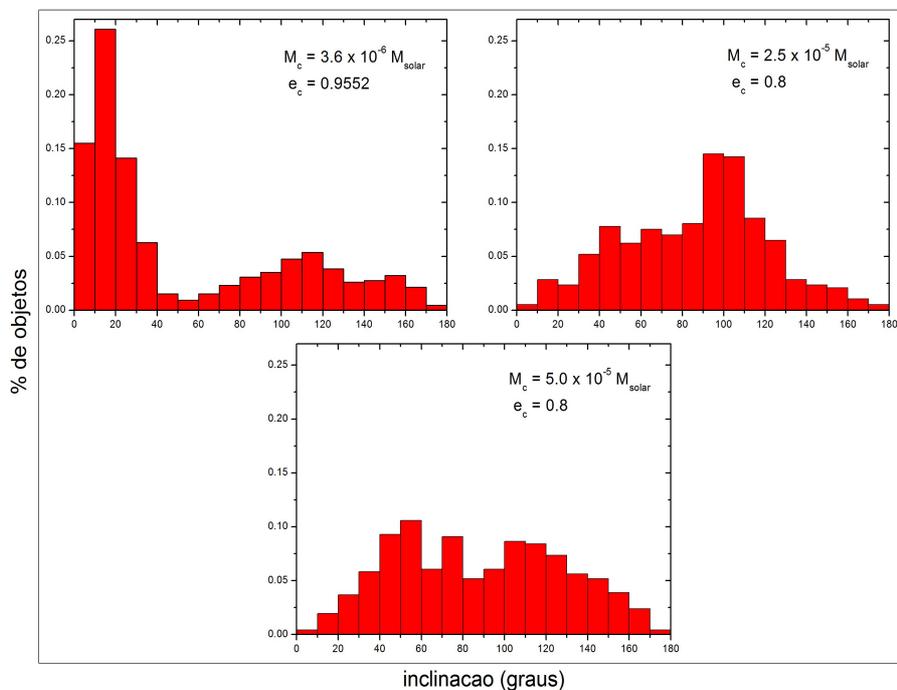


Figura 07: Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastró > 50 UA para a distribuição de objetos resultante das três companheiras apresentadas na figura 05.

2.1.2 – O modelo da migração planetária

Neste modelo é considerada a hipótese de que os planetas primordialmente se encontravam em órbitas mais compactas e a existência de um disco de planetesimais próximo do planeta mais externo. Os semieixos maiores iniciais dos planetas são 5.45, 8.18, 11.5 e 14.2 UA, e um disco de planetesimais entre 15.5 UA até 34 UA com uma densidade superficial proporcional a r^{-1} . Este disco é composto por 10000 partículas massivas iguais totalizando uma massa de $35 M_{\oplus}$. Os planetas e os planetesimais que compõe o disco inicialmente possuem inclinações e excentricidades próximo de zero. A migração planetária é induzida devido à interação entre o disco de planetesimais e os planetas, de acordo com o modelo de Nice (Gomes e colaboradores, 2005; Tsiganis e colaboradores, 2005 e Morbidelli e colaboradores, 2005). Também é considerado nesta integração numérica as perturbações de maré galática. As acelerações são definidas por um sistema de referência galático $\{ \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z} \}$ dado por:

$$F_x = \Omega_0^2 \tilde{x} \quad , \quad F_y = -\Omega_0^2 \tilde{y} \quad , \quad F_z = -4\pi G \rho_0 \tilde{z}$$

com $\Omega_0 = 26 \text{ km/s/kpc}$ e $\rho_0 = 0.1 M_{\odot}/\text{pc}^3$.

Dois integrações numéricas são realizadas para este modelo (no trabalho de Gomes e colaboradores apenas uma integração para este modelo foi realizada, considerando a inclinação da companheira igual a 40°), para um tempo igual a 4.5 bilhões de anos, diferenciadas apenas pelas inclinações da companheira utilizada. Utilizaremos companheiras com inclinações de 40° e 80° . Na primeira integração a companheira possui parâmetros orbitais $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_{\odot}$ (figura 07). Na segunda integração a companheira possui parâmetros orbitais $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 80^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_{\odot}$, sendo que esta massa é equivalente a duas vezes a massa de Netuno (figura 08). Em ambos os gráficos, os círculos em verde representam objetos com $i < 15^\circ$, os círculos em preto representam os objetos com $i > 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam, em todos os gráficos, em ordem crescente de semieixo maior, CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna.

Resumidamente, o que ocorre é que os planetesimais interagem com os planetas, trocando energia e momento angular, o que leva os planetas à uma migração de suas órbitas inicialmente compactas para órbitas mais externas ao sistema solar. Os planetesimais massivos são espalhados para órbitas com elevados valores em semi eixo maior e excentricidade. Os planetesimais com semi eixo maior acima de 2000 UA passam a sofrer forte influência da maré galática, que tende a elevar o valor de seus periastrós, retirando-os da zona de influência gravitacional planetária e formando a

nuvem de Oort. A perturbação secular provocada pela companheira solar de massa planetária permite o aumento do periastro de planetesimais que inicialmente pertenceriam ao disco espalhado, retirando-os da influência gravitacional dos planetas gigantes e armazenando-os temporariamente em órbitas com valores altos de periastro, formando a nuvem de Oort interna. Estes planetesimais esporadicamente podem ser colocados novamente na zona de influência gravitacional dos planetas gigantes, de forma que os objetos da nuvem interna de Oort formados por este mecanismo permanecem dinamicamente ativos.

Na figura 8, que corresponde à companheira com uma inclinação de 40° , podemos observar que objetos são destacados para a região de CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Já na figura 9, a região do VN₁₁₂ fica praticamente vazia. O resultado obtido para o modelo com a companheira com uma inclinação $i = 80^\circ$ é qualitativamente melhor que o resultado obtido para o modelo com a companheira com uma inclinação $i = 40^\circ$, e isto será confirmado ao realizarmos uma análise estatística sobre os resultados. Em ambos os resultados obtemos um número muito pequeno de objetos com baixas inclinações.

A figura 10 mostra ambos resultados para o espaço q versus i . Os círculos em verde representam o resultado para a companheira com inclinação $i = 80^\circ$, os círculos em preto para a companheira com inclinação $i = 40^\circ$. Estão representados apenas os objetos com semieixo maior $100 < a < 550$ UA, de forma a verificarmos apenas os objetos componentes da borda interna da nuvem de Oort. Podemos observar um número muito pequeno de objetos próximos a Sedna. Para a companheira com uma inclinação de 40° , obtemos uma distribuição em inclinações limitada a um valor de 100° , enquanto que para a companheira com inclinação de 80° , a distribuição de inclinações é praticamente uniforme no espaço, com exceção de um acúmulo de planetesimais próximos ao CR₁₀₅ e ao VN₁₁₂. Se ao serem observados outros objetos na borda interna da nuvem de Oort a distribuição destes objetos contiver componentes com órbitas retrógradas, uma companheira com inclinação de 40° e elementos orbitais como os utilizados deverá ser descartada. A figura 11 apresenta o histograma em inclinações para todos os objetos com $a > 300$ UA e $q > 50$ UA para as distribuições de objetos resultantes destas integrações numéricas. Para a companheira inclinada de 40° , o número de objetos com inclinações baixas é um pouco maior, em comparação com o número de objetos com inclinações baixas obtidos pela companheira inclinada de 80° . A distribuição do número de orbitas prógradas e retrógradas em ambos os resultados é praticamente uniforme para os objetos componentes da borda interna da nuvem de Oort.

Gomes e colaboradores (2005) mostram que é possível, marginalmente, reproduzir orbitas como a do CR₁₀₅ em um alcance em semieixo maior em torno de 250 UA apenas com as perturbações dos planetas conhecidos, através da superposição de ressonâncias de movimento

médio e ressonância de Kozai, colocando a órbita do CR₁₀₅ como um limite entre a borda interna da nuvem de Oort e a região do disco de objetos espalhados de alto periastro, justificando a descoberta de objetos com periastro até 60 UA e semieixo maior em torno da região de 250 UA.

Podemos concluir que o modelo da companheira solar de massa planetária é robusto em produzir objetos pertencentes a borda interna da nuvem de Oort que incluem as órbitas do CR₁₀₅, do VN₁₁₂ e do Sedna. No próximo subcapítulo apresentamos uma proposta que em essência difere bastante do modelo da companheira solar de massa planetária. A construção dos resultados segue o artigo publicado por Brassier e colaboradores, 2006.

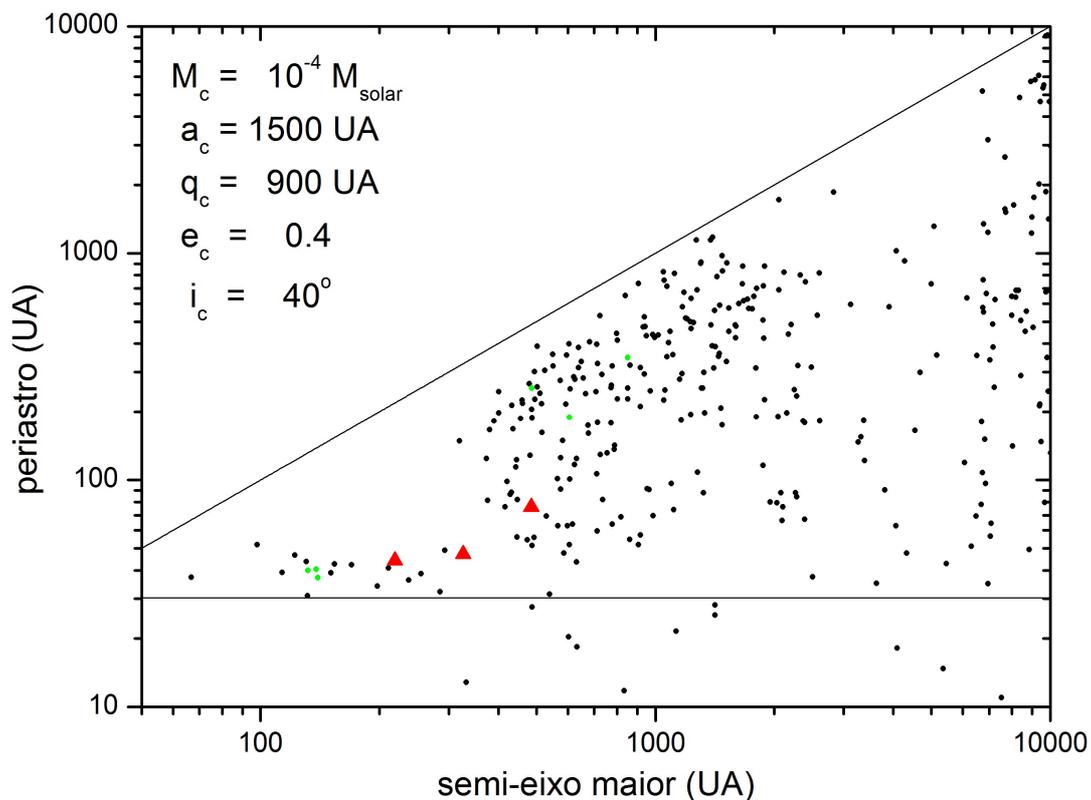


Figura 08: Distribuição de planetesimais em semi-eixo maior versus periastro para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\odot$.

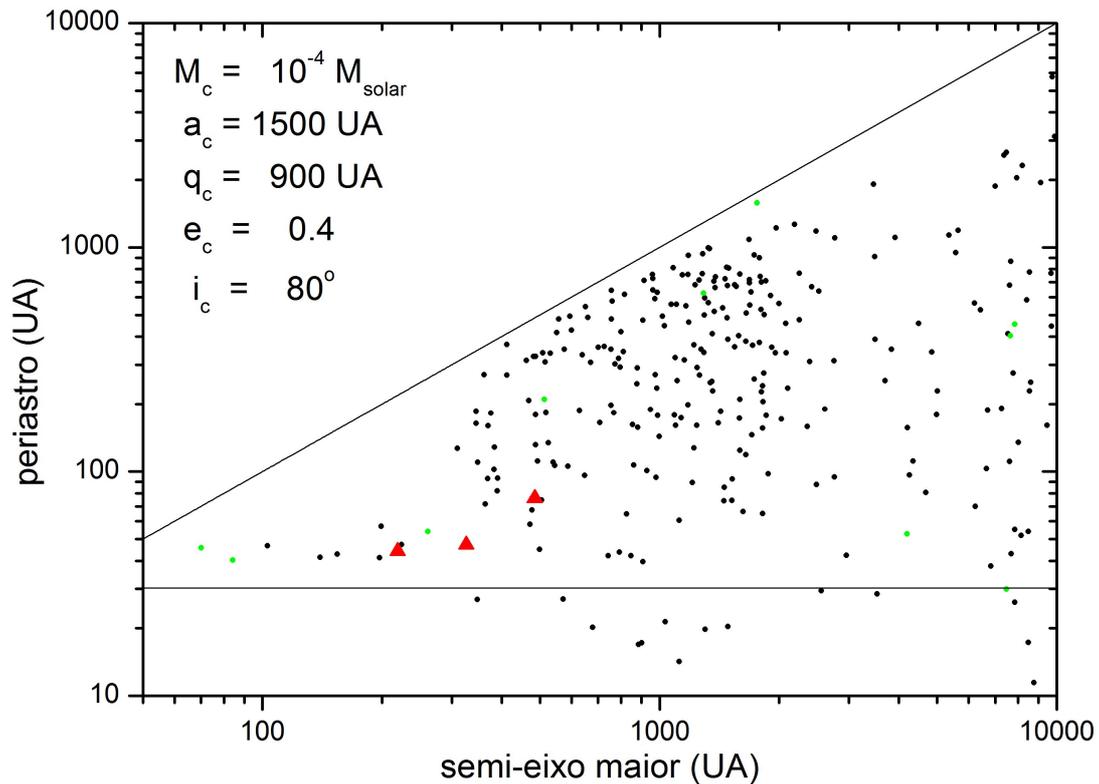


Figura 09: Distribuição de planetesimais em semieixo maior versus periastro para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500 \text{ UA}$, $e_c = 0.4$, $i_c = 80^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\oplus$.

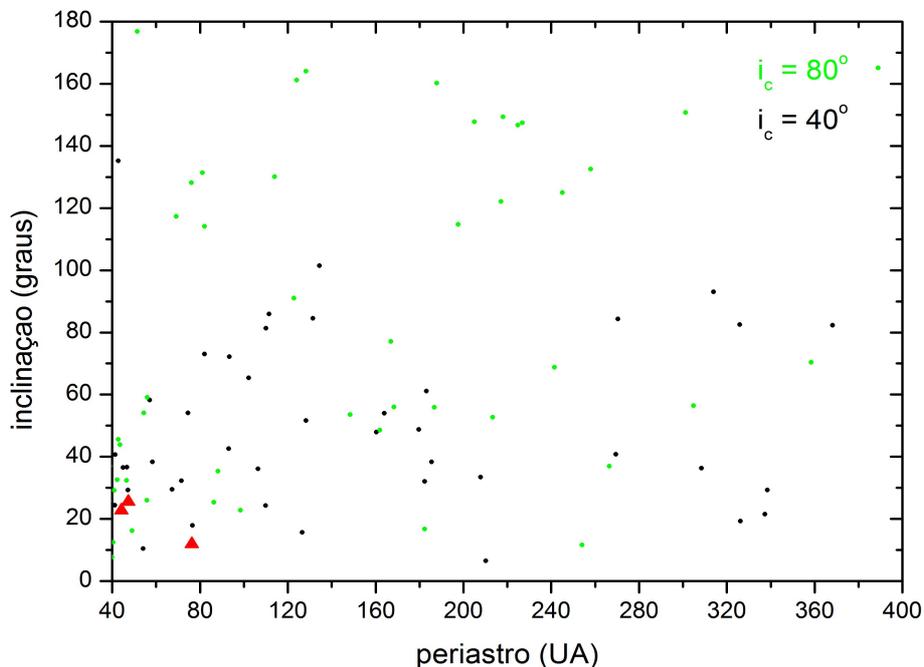


Figura 10: Distribuição de planetesimais em periastro versus inclinação para o modelo de migração planetária após 4.5×10^9 anos. Apenas as partículas com semieixo maior entre $100 < a < 550 \text{ UA}$ estão representadas. Os círculos em preto representam as partículas correspondentes à companheira com $i = 40^\circ$, os círculos em verde representam as partículas correspondentes à companheira com $i = 80^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. Os parâmetros das companheiras são os mesmos utilizados nas figuras 7 e 8.

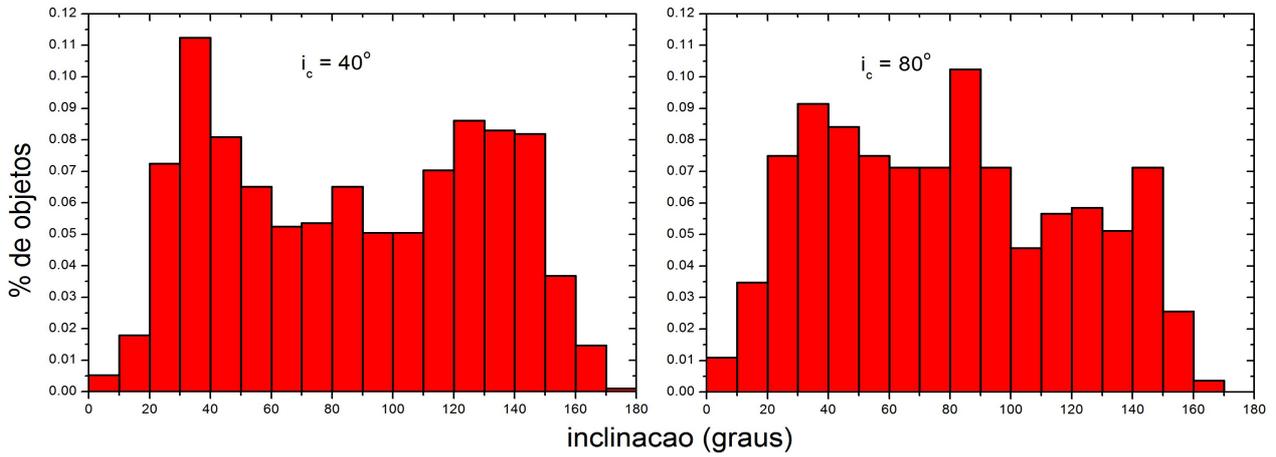


Figura 11: Histograma para as inclinações dos objetos com semi eixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, parâmetros orbitais da companheira $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $M_c = 10^4 M_\odot$ e inclinações 40 e 80° respectivamente.

2.2 - O cenário do aglomerado estelar

Este modelo se baseia no fato de que estrelas surgem em aglomerados estelares densos em nuvens moleculares gigantes. Desta maneira, o Sol possivelmente retém evidências da história dinâmica de encontros estelares e da influência do efeito de maré gerado pelo aglomerado (Brasser e colaboradores, 2006). Reconstruímos o modelo para uma razão em que a massa de estrelas e gás do aglomerado é constante, de forma que o gás do aglomerado não se dissipa, conhecido como modelo de Plummer. Neste modelo, o potencial $\Phi(r)$ e a densidade $\rho(r)$ são dados como funções da distância (Binney e Tremaine, 1987), de acordo com as equações

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{\sqrt{(r^2 + c^2)}} ; \quad \rho(r) = \frac{\rho_0}{(r^2 + c^2)^{5/2}} , \quad (1)$$

sendo M a massa total de gás e estrelas do aglomerado, r é a distância até o centro do aglomerado, c é o raio de Plummer e ρ_0 é a densidade central de gás e estrelas. Este potencial segue a propriedade que a massa total pode ser escrita como

$$M = \int_0^\infty 4\pi r^2 \rho(r) dr = \frac{4}{3} \pi \rho_0 c^3 \quad (2)$$

e a massa dentro de um raio r partindo do centro do aglomerado é

$$M(r) = \int_0^r 4\pi x^2 \rho(x, c) dx = M \frac{r^3}{(r^2 + c^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Neste modelo simples, cada estrela possui uma órbita sobre a influência do potencial central, e nesta fase de desenvolvimento, não será considerado a influência gravitacional de uma estrela

sobre a outra. Entretanto, dado o potencial descrito em (1), a órbita da estrela é sub-Kepleriana, e a forma da trajetória é uma roseta.

As massas das estrelas são selecionadas utilizando-se uma função geratriz com um corte de $0.01 M_{\odot}$, fornecida pela equação

$$M_j = 0.01 + \frac{0.19 \xi^{1.55} + 0.05 \xi^{0.6}}{(1 - \xi)^{0.58}} \quad (4)$$

sendo M_j a massa da j -ésima estrela em massas solares e $\xi \in [0,1)$ é um número randômico. A distribuição (4) nos fornece uma massa estelar média de $0.379 M_{\odot}$. Para a densidade central do aglomerado, ρ_0 , utilizamos três valores, $1.0 \cdot 10^4$, $3.0 \cdot 10^4$ e $1 \cdot 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ com uma eficiência de formação estelar de 25%.

Uma vez especificado os valores do raio de Plummer e da densidade central do aglomerado, a massa total de gás mais estrelas é obtida por meio da equação (2). Para a eficiência de formação estelar de 25%, o número de estrelas representa 0.66 do total da massa do aglomerado. Para designarmos uma distribuição espacial para cada estrela, inverte-se a equação (3), e assim obtemos um raio para cada estrela e consecutivamente colocamos cada uma randomicamente em um ponto de uma esfera com o dado raio obtido. Para designarmos uma velocidade para cada estrela, é assumido que o modelo de Plummer possui uma distribuição de velocidades isotrópica, que preserva a densidade de volume do espaço de fases seguido de um polítopo de índice $n = 5$ (Binney e Tremaine, 1987). Obtemos a magnitude v do vetor velocidade de uma distribuição que é proporcional a $v^2(\Phi(r) - v^2/2)^{7/2}$, sendo $\Phi(r)$ obtido pela equação (1). Tendo especificado anteriormente o valor de r para cada estrela, a velocidade é obtida através da técnica de rejeição de Von Neumann (Methods of Celestial Mechanics, 1961).

Desta maneira, tendo as massas, as posições e velocidades iniciais de cada estrela componente do aglomerado, integramos as órbitas das estrelas utilizando o ODE, submetidas às forças derivadas do potencial do gás e das estrelas distantes fornecido pela equação (1). Interações entre as estrelas não são adicionadas nesta fase. Para cada estrela com massa entre 0.8 – 1.2 massas solares, um catálogo de parâmetros de encontros estelares é guardado em um arquivo de saída. Estes parâmetros são o tempo, as posições e as velocidades de cada estrela que entra em uma esfera de influência de meio raio de Plummer. A tabela 01 mostra em cada coluna, respectivamente, o valor da densidade central inicial utilizada, o valor do raio da esfera de influência, o número de estrelas componentes do aglomerado, a massa total (gás+estrelas) do aglomerado e o número de estrelas com massa entre 0.8 – 1.2 massas solares.

ρ_0 (M_\odot/pc^{-3})	c (pc)	N	M (M_\odot)	n
1×10^4	0.20	228	335	07
3×10^4	0.15	268	373	14
1×10^5	0.10	286	419	10

Tabela 01: Parâmetros de referência utilizado nos cenários do aglomerado estelar imerso e da captura extra solar. Da esquerda para a direita, temos a densidade central inicial do aglomerado estelar, o raio de Plummer, o número de estrelas em cada aglomerado, a massa total (estrelas + gás) e o número de estrelas de massa solar de cada aglomerado.

No próximo passo, um total de 2000 partículas sem massa é utilizado na simulação computacional. Este modelo inclui os efeitos gravitacionais do Sol, Júpiter e Saturno; com os dois gigantes gasosos colocados em órbitas compactas (Júpiter em 5.45 UA e Saturno em 8.2 UA, de acordo com o modelo de Nice), juntamente com o potencial de maré devido ao aglomerado e os efeitos de encontros próximos com as estrelas previamente selecionadas na primeira etapa. As integrações foram realizadas utilizando o MERCURY, acrescentando-se algumas modificações no código para acrescentar os encontros próximos com as estrelas e a influência do campo de marés exercido pelo potencial de Plummer. As 2000 partículas teste são colocadas em órbitas frias com semieixo maior uniformemente distribuídas entre 4 e 12 UA. Os valores médios das inclinações e excentricidades das partículas são 0.02 e 0.01 radianos, respectivamente. Como o Sol orbita em torno do centro do aglomerado sob a influência do potencial dado pela equação (1), os efeitos de maré devido ao aglomerado estelar mudam de acordo com sua posição na órbita. O passo de tempo utilizado nesta etapa é de 0.4 anos e a integração total indo até três milhões de anos. A partícula é removida caso se distancie de metade do raio de Plummer, colida com algum planeta ou com o corpo central.

A aceleração total produzida sobre uma partícula é descrita pela equação:

$$\ddot{\vec{d}} = -G \frac{(m_\odot + m_c)}{d^3} \vec{d} + G \frac{M}{(r_\odot^2 + c^2)^{3/2}} \vec{r}_\odot - G \frac{M}{(|\vec{r}_\odot + \vec{d}|^2 + c^2)^{3/2}} (\vec{r}_\odot + \vec{d})$$

onde o vetor \vec{d} representa a posição da partícula com relação ao Sol, o vetor \vec{r}_\odot representa a posição do Sol com relação ao centro do aglomerado, M é a massa total do aglomerado estelar e m_\odot , m_c são respectivamente a massa do Sol e a massa da partícula.

O primeiro termo do lado direito é devido à atração direta do Sol sobre a partícula, o segundo termo é devido à força de maré exercida sobre o Sol pelo aglomerado estelar (gás + estrelas), que aparece devido ao Sol ser tomado como origem das coordenadas e o terceiro termo é devido à força de maré do aglomerado sobre a partícula. Os dois últimos termos do lado direito da equação podem ser escritos como ∇R , sendo R uma função perturbadora que pode ser expandida em termos do vetor posição da partícula com relação ao corpo central, conforme mostrado em

Brasser e colaboradores (2006). Resumidamente, o efeito de maré induz uma oscilação acoplada entre a excentricidade e a inclinação das partículas, semelhante ao mecanismo de Kozai. Para algum valor crítico da inclinação, o argumento do periastro das partículas pode mudar de circulação para libração e a amplitude da variação da excentricidade pode aumentar drasticamente. O Sol orbita o centro do aglomerado estelar sob a influência do potencial de Plummer em uma órbita excêntrica, o campo de maré pulsa ritmicamente, aumentando e diminuindo em força. O torque resultante sobre as partículas pode aumentar seus periastrós, removendo-os da região planetária e armazenando-os temporariamente na nuvem de Oort por um tempo igual ao tempo de precessão (que pode ser $\gg 10^6$ anos). Adicionalmente, as estrelas passantes podem colocar as partículas em regiões em que a maré não atua (quando a escala de tempo é grande quando comparada com o tempo de vida do aglomerado), e estas partículas devem permanecer fossilizadas nestas regiões.

A distribuição de partículas obtida depende da órbita da estrela com relação ao centro do aglomerado (por causa da dependência do potencial de Plummer com a posição) e do número de encontros abaixo de um certo valor em semieixo maior que esta estrela sofre com outras estrelas. Estrelas que possuem órbitas mais próximas do centro do aglomerado tendem a sofrer mais encontros próximos, o que aumenta a probabilidade de um encontro próximo abaixo de 1000 UA, o que por sua vez gera fortes perturbações sobre as partículas. Portanto, para cada uma das três densidades centrais iniciais dos aglomerados utilizadas neste trabalho, mostraremos, respectivamente, o resultado da distribuição das partículas para três estrelas de massa solar com órbitas diferentes, uma órbita mais interna, uma intermediária e uma mais distante do centro do aglomerado estelar.

A figura 12 mostra a distribuição das partículas ao final da integração para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ para três estrelas de massa solar com órbitas diferentes, conforme descrito no último parágrafo. Para a estrela mais interna, obtemos partículas destacadas para a região do objeto VN₁₁₂ e de Sedna, mas a região do objeto CR₁₀₅ é preenchida apenas de maneira limítrofe, o que não representa um problema para o modelo nesta densidade central inicial porque objetos pertencentes a região do objeto CR₁₀₅ podem ser gerados pelo mecanismo de Gomes e colaboradores (2005). Podemos observar que para as estrelas com órbitas mais afastadas do centro do aglomerado a borda interna da nuvem de Oort se forma, respectivamente, em regiões com valores em semieixo maior mais elevados. Isto significa que, a princípio, se o aglomerado estelar que foi progenitor do Sol apresentava esta densidade central inicial, para que a borda interna da nuvem de Oort se inicie em valores de semieixo maior esperados para se explicar a origem dinâmica de objetos do tipo Sedna, o Sol deveria inicialmente se formar mais internamente ao centro do aglomerado.

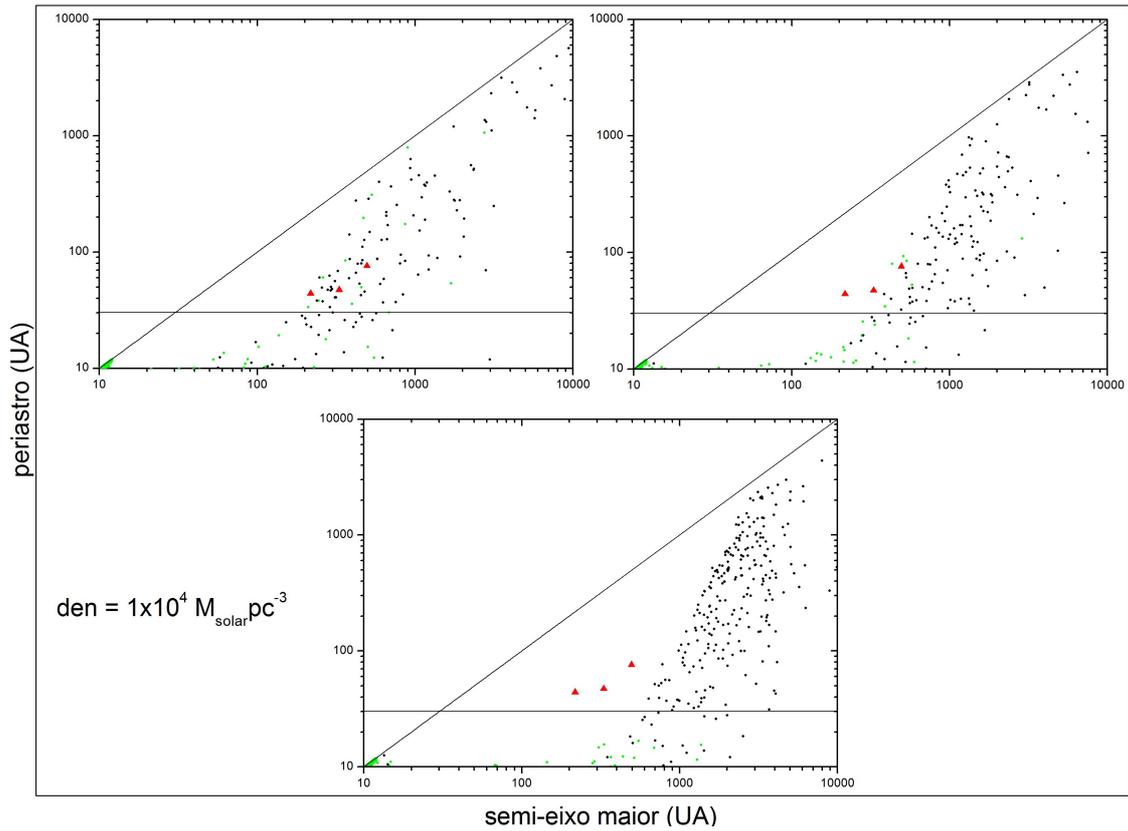


Figura 12: Distribuição de partículas em semi-eixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a direita, correspondem respectivamente a estrela com órbita interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar aparece abaixo, correspondente a densidade $10^4 M_\odot \text{pc}^{-3}$.

A figura 13 mostra a distribuição das partículas para a densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_\odot \text{pc}^{-3}$, que é uma densidade intermediária entre 10^4 e $10^5 M_\odot \text{pc}^{-3}$. Devido aos encontros próximos com estrelas passantes, a borda externa da nuvem interna de Oort atinge um valor máximo de 2000 UA. Com exceção do resultado para a estrela com uma órbita mais distante ao centro do aglomerado, temos partículas destacadas para todas as regiões de interesse. A distribuição é otimizada para o caso da estrela intermediária. Conforme o esperado, para a estrela mais distante do centro do aglomerado o efeito de maré provocado por estrelas distantes e gás é menor que o efeito de maré sobre a estrela com órbita mais interna, e o número de encontros com estrelas passantes também é menor. Desta maneira, as partículas destacadas para valores de $q > 76$ UA se apresentam apenas em regiões com $a > 800$ UA. Podemos perceber também que para a estrela com órbita intermediária ao centro do aglomerado estelar a nuvem interna de Oort se forma mais internamente que para a estrela com órbita mais interna ao centro do aglomerado. Isto é devido ao caráter estocástico dos encontros estelares com o Sol.

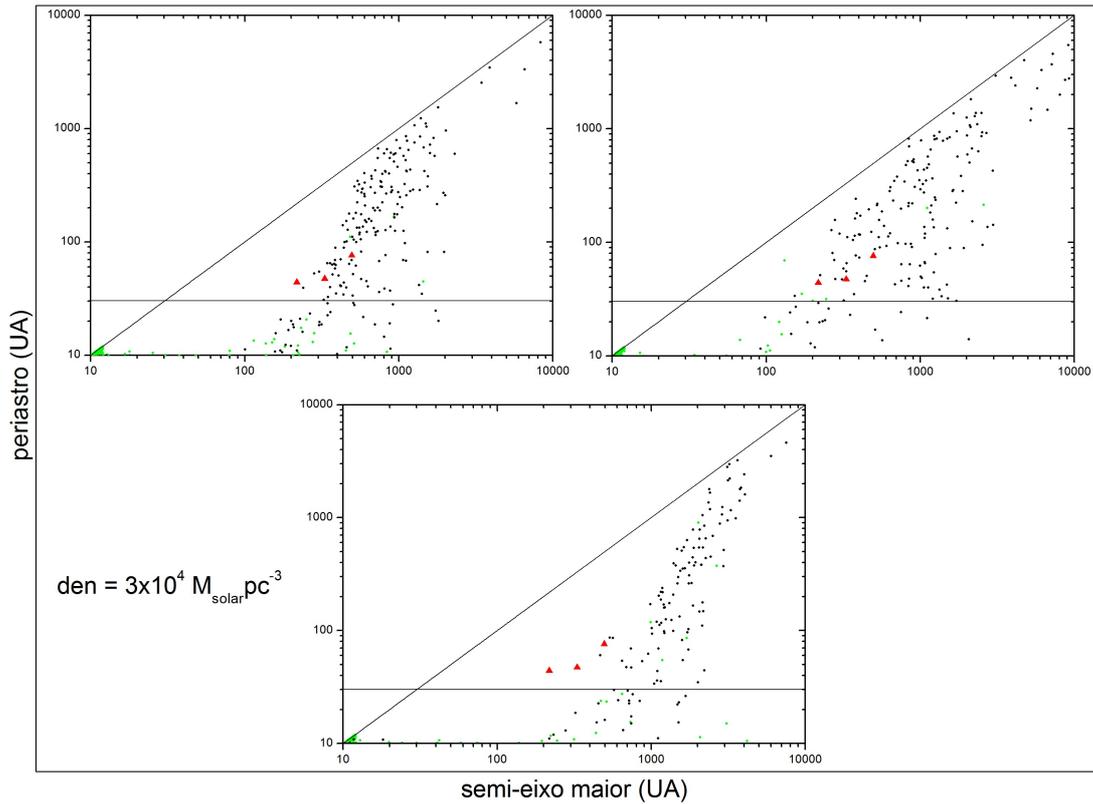


Figura 13: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a direita, correspondem respectivamente a estrela interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar aparece abaixo, correspondente a densidade $3 \times 10^4 M_\odot \text{pc}^{-3}$.

A figura 14 apresenta a distribuição de partículas para a densidade inicial central de $1 \times 10^5 M_\odot \text{pc}^{-3}$. Para este elevado valor de densidade central inicial, o número de partículas destacadas para a região da nuvem interna de Oort é muito grande para todas as estrelas consideradas, sendo que a borda interna da nuvem de Oort obtida aumenta em semieixo maior a medida que consideramos estrelas com órbitas mais distantes ao centro do aglomerado estelar, o que significa que para que este mecanismo seja eficiente em destacar objetos que possuam as propriedades que esperamos que esta população apresente, devemos considerar que o Sol inicialmente tinha uma órbita mais externa ao centro do aglomerado com esta dada densidade central inicial. Assim como ocorre para a densidade central inicial igual a $3 \times 10^4 M_\odot \text{pc}^{-3}$, podemos perceber também que para a estrela com órbita intermediária ao centro do aglomerado estelar a nuvem interna de Oort se forma mais internamente que para a estrela com órbita mais interna ao centro do aglomerado. Isto é devido ao caráter estocástico dos encontros estelares com o Sol.

A figura 15 apresenta os histogramas para as inclinações das partículas com $a > 300$ UA e $q > 50$ UA, para os melhores resultados obtidos, respectivamente a estrela de massa solar com órbita

mais interna para a densidade $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, a estrela intermediária para a densidade $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e a estrela mais externa ao centro do aglomerado para a densidade $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Todas as distribuições apresentam um número uniforme de órbitas prógradas e retrógradas. Para a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ temos o maior número de objetos com valores baixos de inclinação. Qualitativamente, estes resultados são muito semelhantes aos resultados obtidos para o modelo da companheira solar de massa planetária, mostrando que em uma análise superficial, ambos os modelos apresentam resultados análogos.

O cenário do aglomerado estelar imerso apresenta resultados que reproduzem a borda interna da nuvem de Oort em sua forma e distribuição de partículas para semieixo maior, excentricidade e periastro que estão de acordo com as características que esperamos que estes objetos possuam. No próximo subcapítulo apresentaremos um modelo alternativo, baseado neste cenário do aglomerado estelar imerso e que considera algumas hipóteses diferentes para a formação da nuvem interna de Oort.

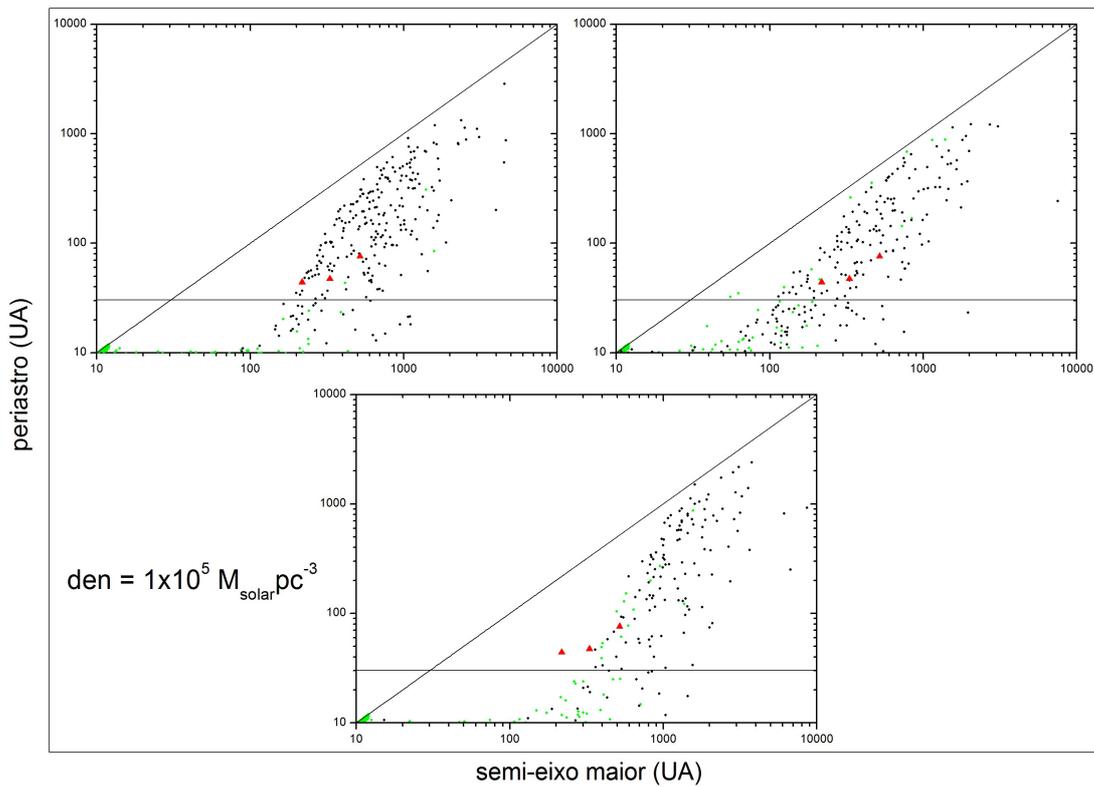


Figura 14: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o modelo da estrela passante após 3×10^6 anos. Os círculos em verde representam as partículas com inclinação $< 15^\circ$, os círculos em preto, representam as partículas com inclinação $> 15^\circ$ e os triângulos em vermelho representam CR_{105} , VN_{112} e Sedna, respectivamente. As figuras, da esquerda para a direita, correspondem respectivamente a estrela interna, a intermediária e a estrela mais externa ao centro do aglomerado estelar aparece abaixo, correspondente a densidade $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

2.3 - O cenário da origem extra solar

Neste cenário iremos considerar que cada estrela componente do aglomerado estelar primordial possui um disco de planetesimais do tipo obtido no capítulo 2.2, ou seja, um disco de planetesimais espalhado por planetas e cujos periastrós tenham sido aumentados por meio de encontros com estrelas passantes e pelo efeito de maré devido a estrelas distantes e gás. O número de planetesimais que cada estrela carrega é proporcional à massa da estrela, tomado como base o disco obtido pelo cenário do aglomerado estelar imerso para uma estrela de uma massa solar. As condições iniciais das partículas em torno de cada estrela são as mesmas condições finais encontradas para as partículas através do cenário do aglomerado estelar, para o melhor resultado obtido para cada densidade central inicial do aglomerado. Desta maneira, estrelas com massas maiores que $1.0 M_{\odot}$ carregam um disco de planetesimais maior e estrelas com massas menores carregam um disco de planetesimais menor. Para cada densidade central inicial do aglomerado, selecionamos, uma a uma, todas as estrelas com massa entre 0.8 e $1.2 M_{\odot}$ como sendo o nosso Sol hipotético. As partículas componentes do disco de planetesimais são consideradas sem massa, e as órbitas das estrelas são integradas diretamente, sendo considerado a ordem dos encontros próximos obtidos na seção 2.2. As estrelas passantes são retiradas da tabela de encontros próximos construída na seção 2.2, mantendo-se o potencial de Plummer relativo ao tempo em que a estrela foi catalogada.

As integrações levam em consideração a atração gravitacional mútua entre o Sol e a estrela, entre o Sol e as partículas e entre a estrela e as partículas em um sistema de referência heliocêntrico, juntamente com a força de maré devido ao aglomerado estelar e o gás, sendo o sistema de referência da órbita solar tomado com relação ao centro do aglomerado estelar. O tempo total de integração é de três milhões de anos, e partículas e estrelas são retiradas da integração quando atingem uma distância de metade do raio de Plummer utilizado, conforme mostrado na tabela 01.

Se o encontro estelar ocorrer a uma distância muito grande do Sol não ocorrerão transferências de partículas entre a estrela e o Sol. Porém, mesmo que o encontro não seja muito distante, mas a velocidade da estrela com relação ao Sol for muito grande, também não ocorrerão transferências de partículas entre a estrela e o Sol. Desta maneira, de todos os encontros estelares com o Sol, obtidos no capítulo 2.2, selecionamos apenas aqueles em que a estrela possui uma distância no periastro $q < 6000$ UA e uma excentricidade instantânea no periastro $e < 3.0$, o que gera uma grande economia no esforço computacional.

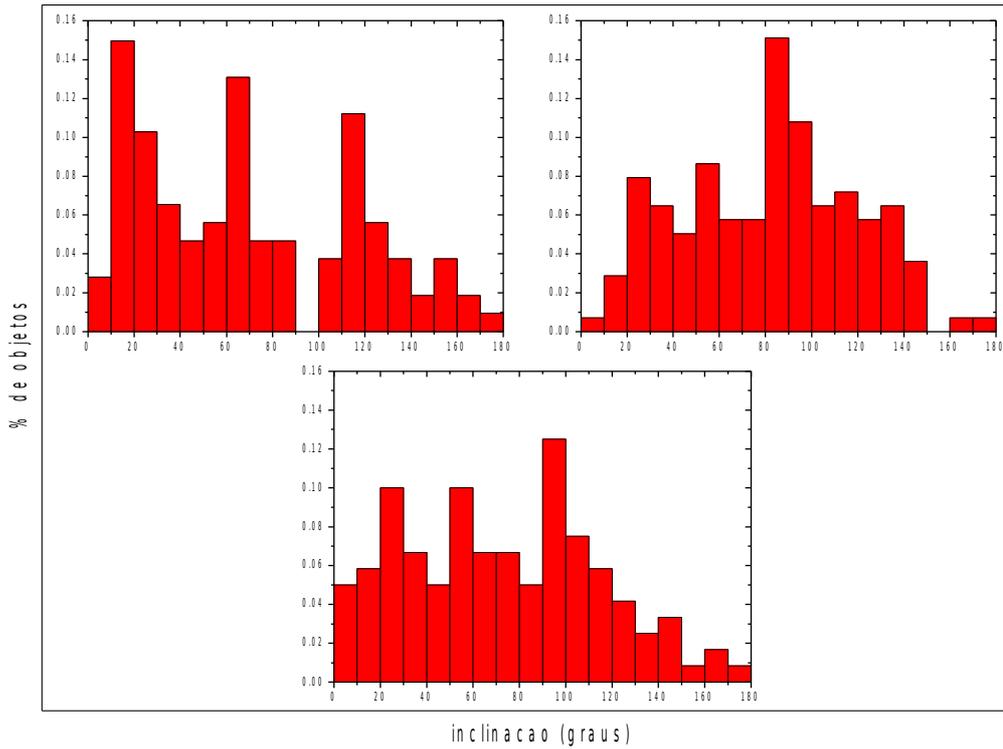


Figura 15: Histograma para as inclinações dos objetos com semieixo maior > 300 UA e periastro > 50 UA, para o modelo do aglomerado estelar imerso. Da esquerda para a direita, a distribuição em inclinações para $\rho_0 = 1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ (estrela mais interna ao aglomerado), $\rho_0 = 3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ (estrela intermediária ao aglomerado) e $\rho_0 = 1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ (estrela mais externa ao aglomerado).

Para cada passagem estelar, é verificado o número de partículas capturados pelo Sol. Se houver captura, estes planetesimais passam a fazer parte do disco de planetesimais que compõe o disco do Sol na passagem da próxima estrela da lista, sendo mantidas suas posições e velocidades obtidas ao final da integração anterior. A cada passagem estelar, pode então existir captura de planetesimais do disco estelar, porém também pode haver espalhamento de planetesimais que já estavam em órbita do Sol pela estrela passageira. Ao final de todo o processo temos as posições e velocidades das partículas que permaneceram em órbita do Sol, sendo estas partículas as componentes da nuvem interna de Oort de origem extra solar.

A eficiência de capturas de partículas extra solares na fase gasosa do aglomerado estelar é muito baixo, variando de 0% a 15% do número de partículas utilizado inicialmente no disco de partículas de uma estrela de massa solar, e depende de um jogo entre o número de encontros próximos com valores suficientemente baixos em semieixo maior e da velocidade da passagem estelar no periastro. Esta eficiência aumenta drasticamente durante a dissipação do gás, porém apenas para cometas distantes, que não são componentes da nuvem interna de Oort, chegando a atingir 90% do número de cometas que compõe a nuvem de Oort estimada atualmente (Levison e colaboradores, 2010). Estrelas com órbitas inicialmente mais internas ao aglomerado estelar, em

média, sofrem mais encontros estelares, o que aumenta a probabilidade de passagens estelares com semieixos maiores abaixo de 1000 UA, que por sua vez pode aumentar o número de partículas capturadas pelo Sol (pode também reduzir o número de partículas capturadas por encontros anteriores devidos ao espalhamento gravitacional provocado pelo encontro atual). As estrelas mais externas ao centro do aglomerado não apresentam capturas de partículas, dado o baixo número de encontros próximos estelares, conforme apresentado na tabela 02.

A figura 16 apresenta a distribuição de partículas em $a \times q$, a distribuição em $q \times i$ e o histograma para as inclinações obtido para uma densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. A estrela considerada como sendo o Sol sofreu 6 encontros próximos com semieixo maior abaixo de 6000 UA e excentricidade no periastro menor que 3.0. O número de partículas que compõe o disco de uma estrela de 1 massa solar é de 2170 partículas e cada estrela carrega um disco de partículas que é proporcional a massa da estrela. Cerca de 5% do número de planetesimais deste disco de partículas permaneceu em órbita solar. Obtemos partículas em torno da região de Sedna e VN₁₁₂, mas nenhuma partícula próximo a CR₁₀₅. Poucos planetesimais apresentam inclinações $i < 40^{\circ}$, ou seja, se a hipótese que objetos que compõe a borda interna da nuvem de Oort devem apresentar baixos valores de inclinação estiver correta, este método não é eficiente para formar objetos componentes desta população, porém, como o número de objetos reais observados componentes desta população (1 objeto, apenas Sedna) é muito baixo, esta hipótese é fraca, sendo que sua confirmação depende da observação de novos objetos nestas regiões de interesse. O histograma para inclinações mostra a pequena porcentagem de objetos com inclinações baixas. A maior parte dos planetesimais apresenta inclinações entre 70 e 80°, e o número de objetos com órbitas prógradas e retrógradas é uniforme.

A figura 17 apresenta a distribuição de partículas em $a \times q$, a distribuição em $q \times i$ e o histograma para as inclinações obtido para uma densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. O resultado é semelhante ao obtido para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. O número de partículas que compõe o disco para uma estrela com 01 massa solar para esta densidade é de 1720 partículas e cerca de 4% do número de objetos deste disco padrão permaneceu em órbita solar ao final da integração. Uma distribuição de objetos do tipo Sedna é obtida também para esta densidade central inicial. O número de partículas com inclinações $i < 40^{\circ}$ é um pouco maior quando comparamos com o resultado obtido pela densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. A distribuição de objetos com órbitas prógradas e retrógradas é uniforme. A eficiência da captura de planetesimais é menor, porém isto pode ser devido ao número de planetesimais que compõe o disco padrão de planetesimais também ser menor.

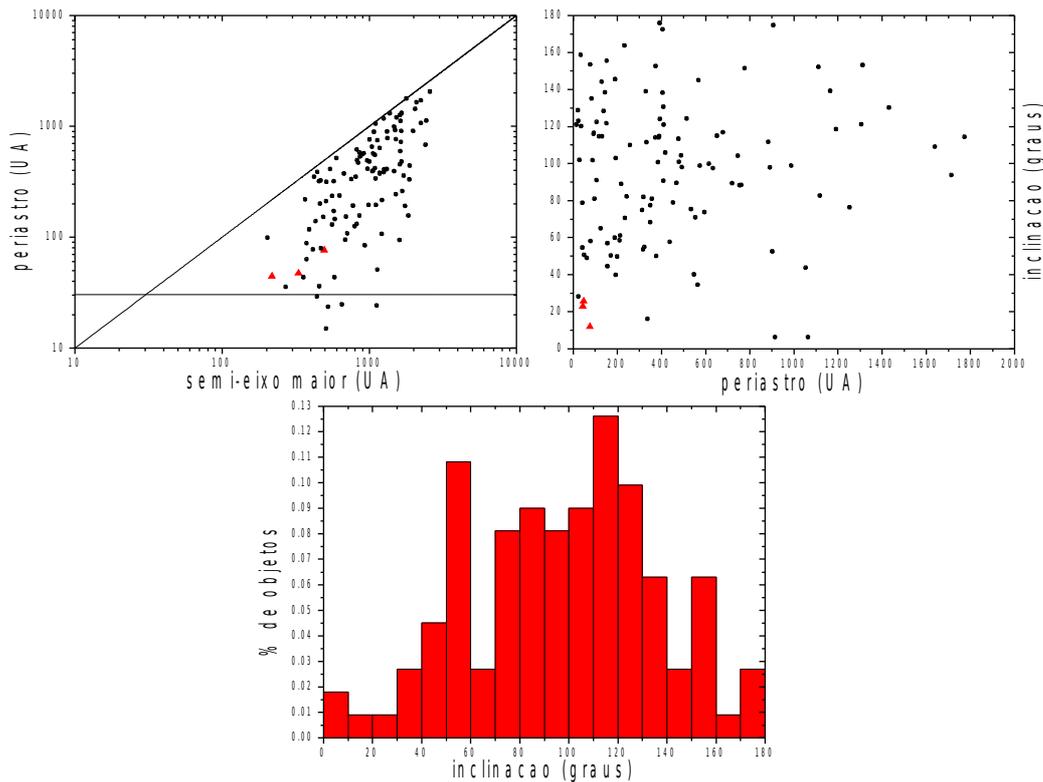


Figura 16: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares. Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central inicial $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida.

A figura 18 apresenta a distribuição de partículas em $a \times q$, a distribuição em $q \times i$ e o histograma para as inclinações obtido para uma densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. O número de partículas que compõe o disco para uma estrela com 01 massa solar para esta densidade é de 2025 partículas e cerca de 11% do número de planetesimais deste disco padrão permaneceu em órbita solar ao final da integração. A distribuição é praticamente uniforme entre valores de semieixo maior de 100 – 1000 UA, e não representa uma população de objetos do tipo Sedna que é esperado. A existência de um número grande de partículas com $a < 500$ UA e periastron $q \sim 76$ UA inviabiliza o resultado. Estatisticamente estes objetos deveriam ser observados antes de se observar Sedna. Isto é devido ao grande número de encontros com estrelas devido ao alto valor da densidade inicial central, e podemos perceber que a borda externa da distribuição em semieixo maior é truncada em 1000 UA. O histograma das inclinações mostra que o número de planetesimais com inclinações abaixo de 40° é maior que o obtido utilizando-se densidades centrais iniciais menores. O número de órbitas prógradas e retrógradas é semelhante aos resultados anteriores.

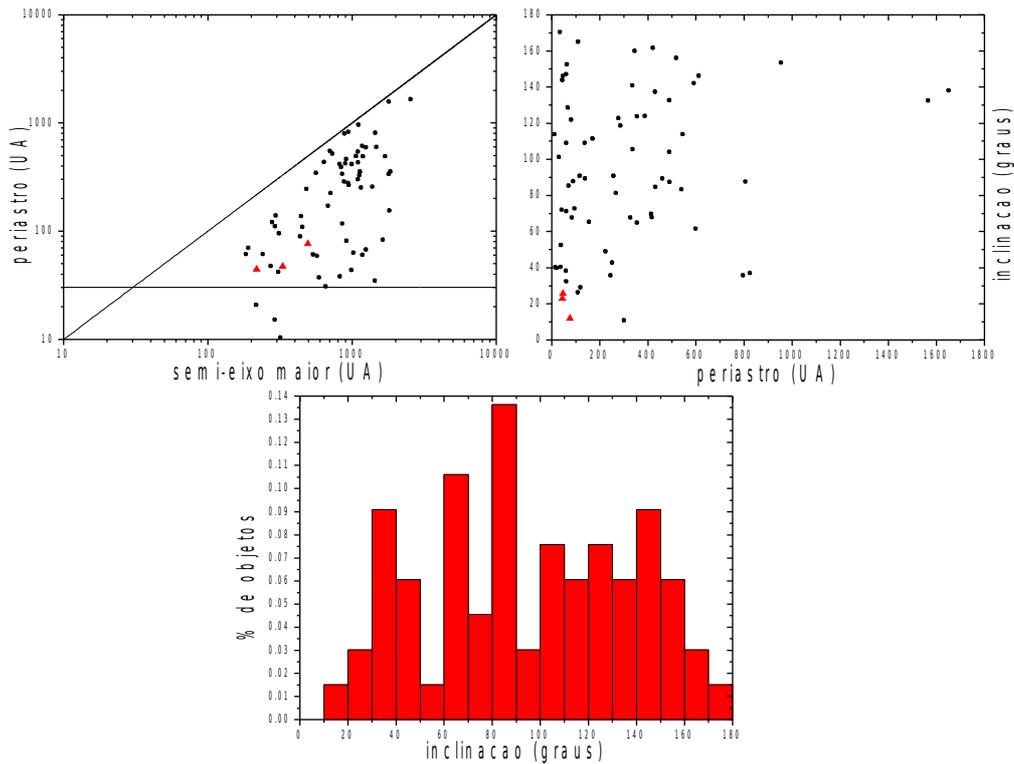


Figura 17: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam CR_{105} , VN_{112} e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central inicial $3 \times 10^4 M_{\odot} pc^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida.

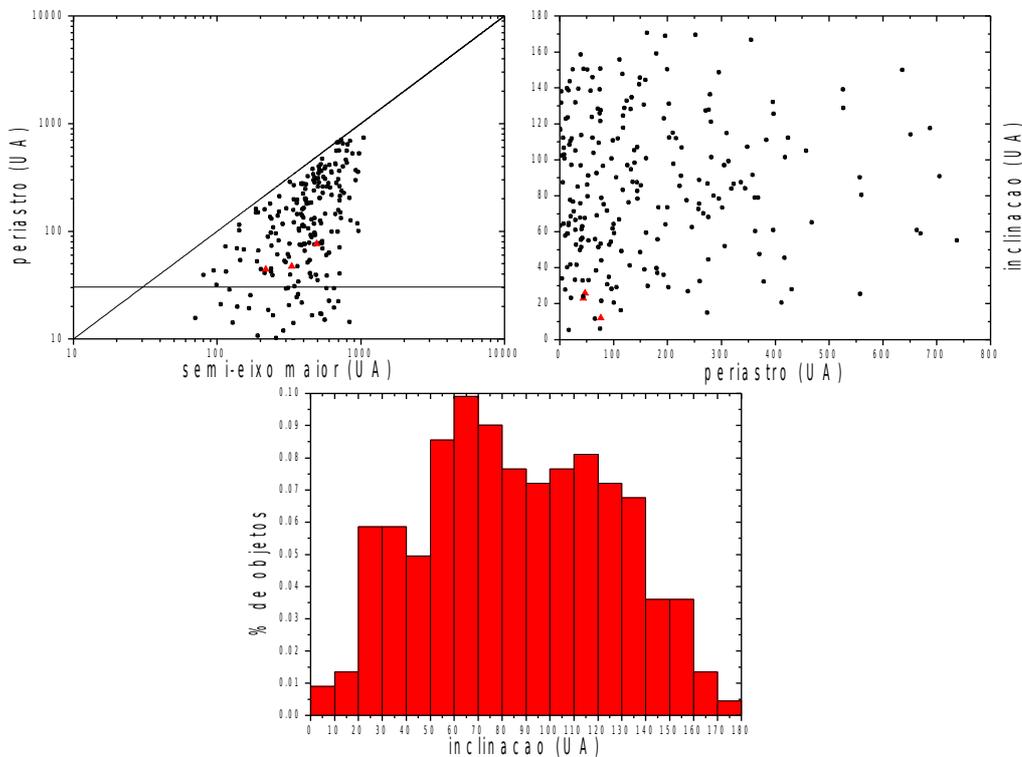


Figura 18: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro, periastro versus inclinação e o histograma para as inclinações para o modelo das capturas extra solares Os círculos em preto representam as partículas e os triângulos em vermelho representam o CR_{105} , o VN_{112} e Sedna, respectivamente. As figuras representam os resultados para a densidade central inicial $1 \times 10^5 M_{\odot} pc^{-3}$ para a melhor eficiência de captura obtida.

Este modelo simples que acabamos de apresentar é robusto em formar objetos componentes da borda interna da nuvem de Oort, apresentando valores em semieixo maior, excentricidade e periastro compatíveis com os objetos reais observados atualmente. Porém o número de objetos produzidos representam no máximo apenas 11% do total de objetos com origem solar obtidos por meio do cenário do aglomerado estelar imerso. Em trabalhos futuros pretendemos modificar a construção deste cenário, pois mostramos aqui que é possível que tenhamos planetesimais de origem extra solar componentes da borda interna da nuvem de Oort passíveis de serem observados. Podemos modificar o modelo acrescentando as perturbações mútuas entre as estrelas componentes do aglomerado estelar imerso, o que iria alterar o número de encontros próximos entre as mesmas e as condições iniciais entre os encontros. Esta modificação faria com que cada vez mais as passagens estelares se tornem mais distantes, fazendo com que os planetesimais capturados pelas primeiras passagens estelares permaneçam fossilizados em semieixos maiores mais internos ao Sistema Solar, reduzindo a probabilidade de serem espalhados por passagens estelares posteriores, aumentando assim a eficiência na transferência de planetesimais. Um modelo mais realístico também deve considerar que a quantidade de gás do aglomerado estelar deve diminuir com o passar do tempo, e que nem todas as estrelas do aglomerado estelar possuem um disco de planetesimais.

No próximo capítulo, através do emprego de um simulador observacional de corpos trans-netunianos, iremos comparar os diversos modelos quanto a sua eficiência em produzir objetos do tipo Sedna.

ρ_0 (M_{\odot}/pc^{-3})	Nome	número de encontros	número de partículas	%
1×10^4	star_013	06	111	4.40
	star_014	02	00	0.00
	star_017	05	11	0.50
	star_028	03	06	0.28
	star_118	00	00	0.00
	star_135	00	00	0.00
	star_188	00	00	0.00
3×10^4	star_003	04	21	1.22
	star_012	05	00	0.00
	star_035	06	67	3.90
	star_049	02	34	2.00
	star_104	00	00	0.00
	star_108	02	03	0.70
	star_133	00	00	0.00
	star_168	00	00	0.00
	star_175	00	00	0.00
	star_178	00	00	0.00
	star_181	00	00	0.00
	star_183	02	22	1.30
	star_187	01	00	0.00
	star_239	00	00	0.00

1x10 ⁵	star_016	04	03	0.15
	star_047	07	43	2.12
	star_101	05	222	11.00
	star_105	03	02	0.10
	star_135	02	00	0.00
	star_164	00	00	0.00
	star_219	03	03	0.15
	star_233	02	08	0.40
	star_267	00	00	0.00
	star_281	00	00	0.00

Tabela 02: Parâmetros de referência utilizados no cenário da captura extra solar. Da esquerda para a direita, temos a densidade central inicial do aglomerado estelar, o rótulo utilizado para a estrela de massa solar, o número de encontros estelares com semi eixo maior < 6000 UA e excentricidade < 3.0, o número de planetesimais que foram capturados pelo Sol ao final da integração numérica e a porcentagem que este número representa em relação ao número de planetesimais que compõe o disco padrão utilizado para cada densidade central inicial do aglomerado.

3 – Comparação dos cenários através de um simulador observacional

Neste capítulo, iremos construir nossos resultados através da comparação estatística das distribuições de planetesimais na região da nuvem interna de Oort ($300 < a < 2000$ UA, $q > 50$ UA) obtidos através dos cenários da companheira solar de massa planetária e do aglomerado estelar imerso. De acordo com a definição adotada acima para a nuvem interna de Oort, as análises serão direcionadas aos objetos do tipo Sedna, de forma que os objetos CR₁₀₅ e VN₁₁₂ serão considerados como marginalmente pertencentes a esta população e não serão inclusos nas análises. Utilizaremos como ferramenta principal na construção das análises um simulador observacional de objetos transnetunianos, e iremos, sempre que possível, comparar as análises com dados observacionais. Analisaremos também a possibilidade de “observarmos” objetos de origem extra solar em comparação com o cenário do aglomerado estelar imerso.

3.1 - O simulador observacional de objetos transnetunianos

O simulador observacional de objetos transnetunianos é um código escrito em linguagem FORTRAN 90/95. Ele se baseia na possibilidade de um determinado objeto distante ser observado, dado seu tamanho, sua magnitude e sua distância à Terra. Inicialmente escolhemos um arquivo de saída gerado por um determinado cenário. Este arquivo deve conter uma lista de objetos transnetunianos com os seguintes dados em cada linha: semieixo maior, excentricidade, inclinação, longitude do nodo ascendente, longitude do periastro e longitude média para um sistema heliocêntrico. Aleatoriamente escolhemos uma determinada linha (órbita do planetesimal) deste arquivo. Também substituímos a longitude média deste objeto, escolhendo aleatoriamente entre 0° e 360° uma nova longitude. Atribuímos um raio para este objeto, por meio de uma distribuição cumulativa de raios de objetos transnetunianos dado por

$$N(r) = N_0 r^{-q}$$

onde $N(r)$ representa o número de objetos com raio maior que r , N_0 é uma constante de ajuste, r é o raio do objeto e q é o coeficiente de decaimento da lei de potência. Fraser e colaboradores (2010) obtém valores para o coeficiente de decaimento q calculados para as populações quente e fria do cinturão de Kuiper iguais a $q_{frio} = 4.1$ e $q_{quente} = 1.75$ (objetos da população quente $\rightarrow 38 < a < 55$ UA e $i > 5^\circ$, objetos da população fria $\rightarrow 38 < a < 55$ UA e $i < 5^\circ$). Assumimos, a princípio, um valor de $q = 3.0$ para este trabalho, representando o valor médio entre os coeficientes de decaimento

das populações quente e fria do cinturão de Kuiper. Na seção 3.4 analisamos os resultados para outros valores de q . Assumindo um valor para o raio do maior corpo, teremos $N(r=\text{maior corpo}) = 1$, e para o menor corpo, escolhemos um raio que nos forneça uma magnitude visual $M \sim 25$ em uma distância de ~ 50 UA. Geramos aleatoriamente um valor entre 1 e $N_{\text{menor corpo}}$ e obtemos o raio do objeto.

Em seguida, sorteamos a longitude média do objeto entre 0 e 360°, e calculamos sua distância ao Sol. Obtemos a distância do objeto à Terra por meio da equação $d_T = \sqrt{d_{sol}^2 + 1 - 2d_{sol} \cos(\alpha)}$, onde α é escolhido aleatoriamente entre 0 e 180° e a distância do Sol à Terra é 1 UA. Assumimos um albedo médio de 0.20 para todos os objetos e calculamos sua magnitude visual,

$$Mag = 14.11 - 5 \log_{10}(\text{raio}) - 2.5 \log_{10}(\text{albedo}) + 5 \log_{10}(d_T d_{sol})$$

Se a magnitude visual do objeto for menor que um determinado valor, o objeto é considerado “observado” (magnitudes visuais menores que 23, em geral, de acordo com Schwamb e colaboradores, 2010). O simulador observacional nos permite também limitar os valores em latitude em que as “observações” serão realizadas. Porém, como Sedna foi descoberto em uma pesquisa do tipo “all-sky survey” por Brown e colaboradores (2004), neste trabalho não colocaremos restrição nos valores em latitude.

3.2 – Análises estatísticas para o cenário da companheira solar de massa planetária

Iniciaremos nossas análises para o cenário da companheira solar de massa planetária, para as distribuições obtidas por meio do modelo completo que considera a migração planetária e maré galáctica, descrito no tópico 2.1.2, figuras 8 e 9. Para este modelo, o tempo total de integração é de 4.5 bilhões de anos, o que nos gera uma população de objetos que deve representar o que se é observado atualmente. Foram utilizados 10000 planetesimais, totalizando uma massa inicial de $35 M_{\oplus}$. Definiremos a nuvem interna de Oort como sendo todos os objetos que possuem $300 < a < 2000$ UA e $q > 50$ UA. Desta maneira, a massa total que compõe a nuvem interna de Oort obtida por este cenário foi de $0.325 M_{\oplus}$ para a companheira com $i_c = 40^\circ$ e $0.313 M_{\oplus}$ para a companheira com $i_c = 80^\circ$. Esta massa armazenada na nuvem interna de Oort através do mecanismo descrito para o cenário da companheira solar de massa planetária é muito menor que o valor estimado inicialmente para esta população por Brown e colaboradores (2004), cerca de $5.0 M_{\oplus}$, baseado na distribuição de tamanhos dos objetos do cinturão de Kuiper. Porém, resultados de pesquisas

observacionais recentes por objetos do tipo Sedna (Schwamb e colaboradores, 2010) não obtiveram sucesso, sendo plausível especular que esta massa inicialmente estimada para a nuvem interna de Oort possa ser muito menor, já que apenas o próprio Sedna foi observado atualmente.

Analisaremos a possibilidade de se observar um objeto componente da nuvem interna de Oort. Atualmente, temos apenas 1 objeto real observado na nuvem interna de Oort, que é Sedna (Brown e colaboradores, 2004), de um total de 132 objetos reais observados com $a > 50$ UA e $q > 30$ UA. Iremos executar o simulador observacional para a distribuição completa de objetos obtida pelas duas companheiras, colocando a restrição de que o código finalize sua execução quando um objeto com $300 < a < 2000$ UA e $q > 50$ UA seja “observado”. Executaremos 300 realizações do simulador a fim de se construir os dados estatísticos. Objetos com semieixo maior e periastro pequenos (menores que o semieixo maior e periastro do Sedna) são mais prováveis de serem observados e, portanto, esperamos que sejam observados primeiro e várias vezes antes de se obter um objeto pertencente a nuvem interna de Oort.

Na figura 19 apresentamos o resultado para 300 realizações do simulador observacional sobre a população de objetos obtida para o modelo da companheira solar de massa planetária em um modelo completo de evolução orbital, para a companheira com inclinação de 40° . Utilizamos como maior objeto possível para ajustar a distribuição de tamanhos um corpo com raio de 2 plutões (diâmetro de Plutão $\sim 2296,08$ km), e consideramos como menor corpo um objeto com magnitude visual de 25 em 50 UA. Todos os círculos representam os objetos obtidos por meio deste cenário, sendo que os círculos em verde representam todos os objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna. Todos os objetos do tipo Sedna “observados” estão representados com círculos em rosa. Os triângulos em vermelho representam os objetos reais com $a > 60$ UA observados atualmente, e a linha tracejada delimita a borda da nuvem interna de Oort, como foi definido acima. Objetos com valores menores que Sedna em semieixo maior e periastro são observados primeiro e várias vezes, sendo que o programa finaliza sua execução quando um objeto do tipo Sedna é obtido. Portanto a relação entre objetos representados por círculos verdes e rosas deve ser interpretada com cuidado, pois os objetos em rosa foram obtidos apenas uma única vez para cada realização do simulador, enquanto que os objetos em verde normalmente são obtidos várias vezes na mesma realização do simulador observacional antes de obtermos um objeto em rosa. A análise estatística sobre os dados nos fornece uma média de 74 “observações” necessárias antes de se obter um Sedna, com um valor de mediana igual a 57, ou seja, um objeto do tipo Sedna é obtido 50% das vezes em um número menor que 57 “observações”. A figura 20 apresenta o histograma para o número de “observações” necessárias para se observar um objeto do tipo Sedna para as 300 realizações do simulador observacional. Sedna foi o 82º objeto real com $a > 50$ UA e q

> 30 UA observado (dados retirados do Minor Center Planet, *minorplanetcenter.net*), em um total de 132 objetos reais observados, ou seja, um valor próximo do valor médio que obtivemos. Outra característica interessante em nosso resultado é que a maior parte dos objetos da nuvem interna de Oort que o simulador observacional selecionou está em torno de Sedna, mostrando um indício que realmente deveria ser observado primeiro, dentro da região da nuvem interna de Oort, um objeto próximo a Sedna, assumindo que sua órbita realmente tenha se formado por este cenário.

Na figura 21 apresentamos a mesma análise anterior para uma companheira com inclinação igual a 80° . Novamente executamos 300 realizações do simulador observacional, o qual finaliza sua execução ao obter um objeto do tipo Sedna. Novamente, objetos com valores menores de semieixo maior e periastro são observados primeiro e com maior frequência, antes de obtermos um corpo dentro da região da nuvem interna de Oort. Este resultado é qualitativamente semelhante ao resultado apresentado na figura 19, porém podemos observar a diferença entre os dois em suas estatísticas. Para este caso, a média de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna é de 79.4, valor este que se aproxima do número de objetos reais observados antes de Sedna ser observado. A figura 22 apresenta o histograma para o número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna. O pico da distribuição se desloca para a direita, quando comparamos este resultado com a figura 19, mostrando que para este caso é necessário um número maior de objetos “observados” para se obter um componente da nuvem interna de Oort. A mediana foi de 51, significando que em 50% das realizações do simulador observacional, obtemos um objeto do tipo Sedna após 51 outros objetos serem “observados”.

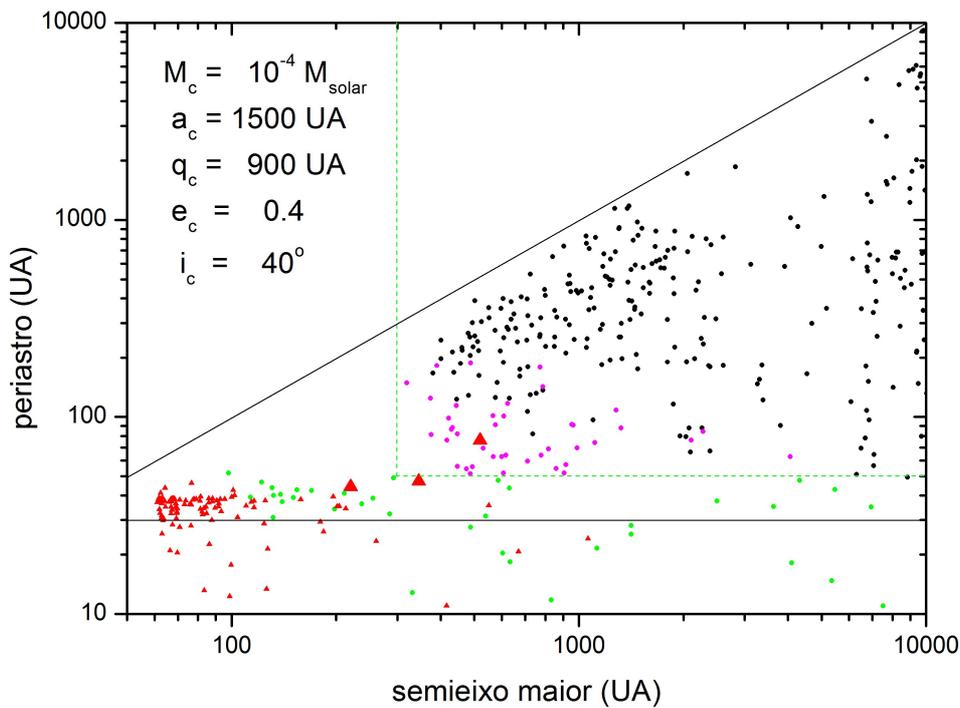


Figura 19: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da companheira solar em que consideramos a migração planetária. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este modelo, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $i_c = 40^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\odot$.

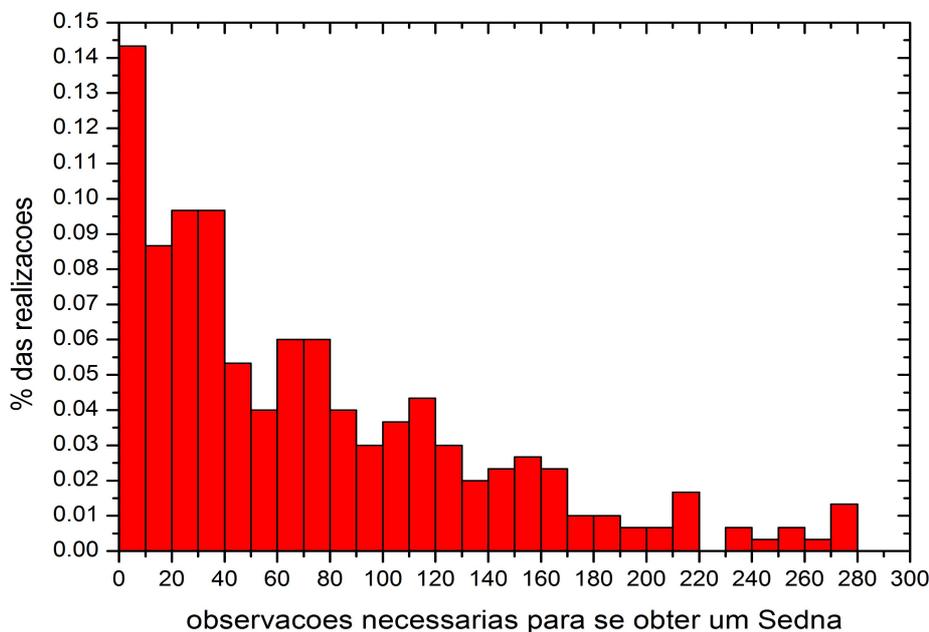


Figura 20: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar apresentado na figura 18. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 74 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 57.

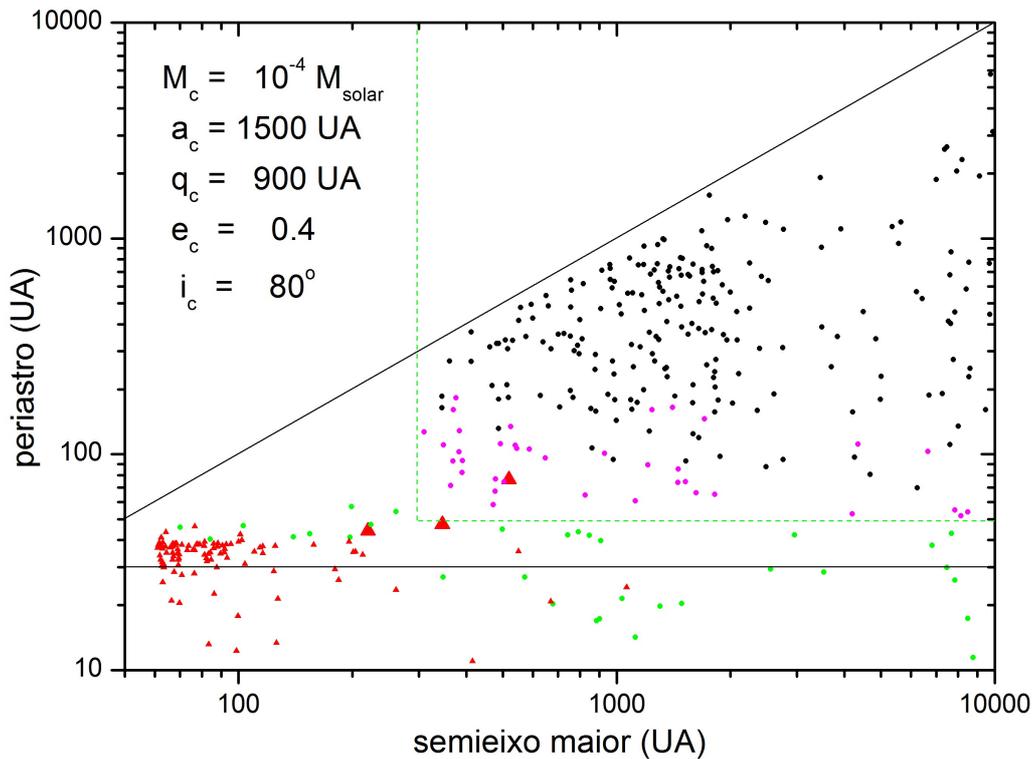


Figura 21: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da companheira solar em que consideramos a migração planetária. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este modelo, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort. Os parâmetros da companheira são $a_c = 1500$ UA, $e_c = 0.4$, $i_c = 80^\circ$ e $M_c = 10^{-4} M_\odot$.

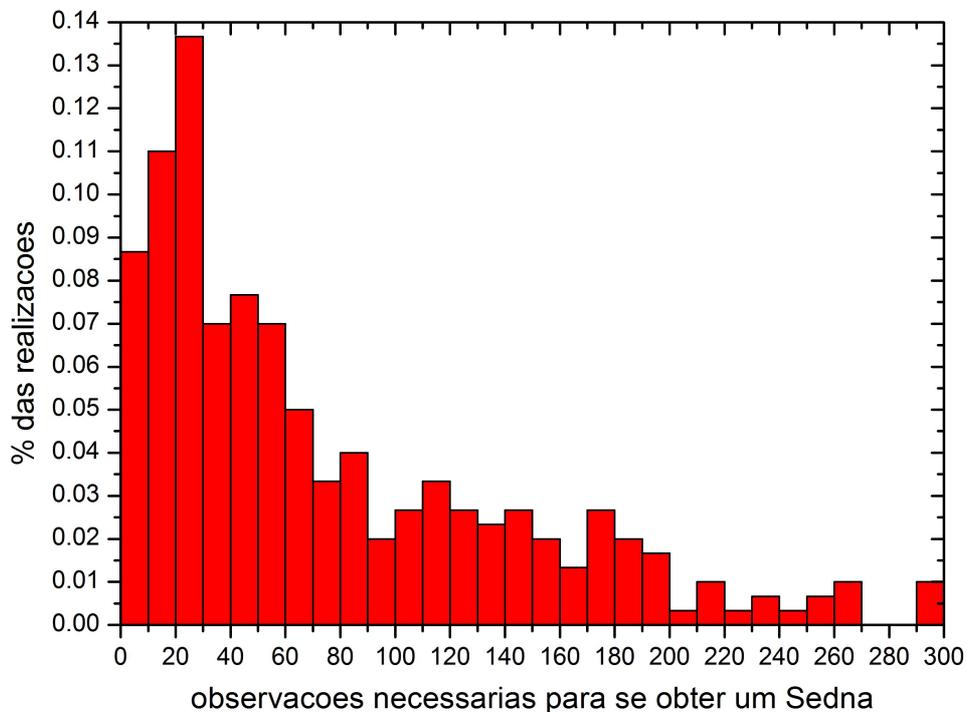


Figura 22: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar apresentado na figura 18. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 79.4 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 51.

3.3 – Análises estatísticas para o cenário do aglomerado estelar

Realizaremos as análises estatísticas para o cenário do aglomerado estelar imerso para os três valores de densidade central inicial apresentados na tabela 1 e cujos resultados são representados graficamente nas figuras 12, 13 e 14. Para cada um destes resultados, o tempo total de integração foi de 3 milhões de anos, que representa o tempo médio em que o gás se dispersa do aglomerado. Para este modelo, apenas Júpiter e Saturno são considerados e, portanto, os planetesimais são inicialmente espalhados por estes dois planetas e posteriormente podem ter seus periastro aumentados devido a influência da força de maré derivada do potencial de Plummer e por encontros próximos entre o Sistema Solar e estrelas passantes. Estima-se que a massa inicial na região entre Júpiter e Saturno era de $200 M_{\oplus}$, sendo necessário $50 M_{\oplus}$ para se formar núcleos rochosos com $10 M_{\oplus}$ capazes de acretar material gasoso e, portanto, formar os planetas gigantes (Levison e colaboradores, 2010), restando então cerca de $150 M_{\oplus}$ para serem espalhadas por estes planetas. Objetos pequenos (diâmetros menores que ~ 30 km) não conseguem atingir distâncias longas o suficiente para serem afetados pelo efeito de maré e dos encontros estelares, devido ao efeito de arraste exercido pelo gás circunestelar, de forma que apenas $50 - 75 M_{\oplus}$ de material sólido irão atingir valores grandes em semieixo maior (Brasser e colaboradores, 2007). As análises serão realizadas apenas para os melhores resultados que obtivemos, ou seja, o resultado para a estrela com órbita mais interna ao aglomerado estelar para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, a estrela com órbita intermediária ao centro do aglomerado para a densidade de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e a estrela com órbita mais externa ao centro do aglomerado para a densidade de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

Como o tempo total de integração numérica considerado para este modelo é de três milhões de anos, iremos considerar em nossas análises estatísticas para o cenário do aglomerado estelar imerso apenas os objetos que estejam dentro de uma região delimitada por $q > 50$ UA e $a < 2000$ UA. Para uma evolução de 4.5 bilhões de anos, objetos com periastros menores que 50 UA estariam sobre a influência dos planetas gigantes e objetos com semieixo maior acima de 2000 UA estariam sobre a influência do efeito de maré galáctica. Desta forma, com o objetivo de comparar as análises estatísticas entre os cenários da companheira solar e do aglomerado estelar imerso, realizamos uma integração numérica para um tempo total de 4.5 bilhões de anos, considerando os quatro gigantes gasosos mais um conjunto de planetesimais igualmente massivos (totalizando uma massa de $35 M_{\oplus}$ para os planetesimais), em um cenário segundo o modelo de Nice, de forma que obtemos como resultado um disco de planetesimais espalhados. Acrescentamos a este resultado os objetos obtidos pelo cenário do aglomerado estelar imerso. Porém, como cada planetesimal simulado no modelo do

aglomerado estelar imerso é cerca de 37 vezes mais massivo (se considerarmos uma massa espalhada por Júpiter e Saturno inicialmente de $50 M_{\oplus}$) que cada planetesimal vindo da simulação do modelo de Nice, realizamos uma clonagem para os objetos obtidos pelo cenário do aglomerado estelar, com o objetivo de compatibilizar o número de objetos entre os modelos (a idéia é que o número total de planetesimais em cada modelo seja proporcional a massa total obtida em cada população pelo modelo considerado). Nesta clonagem mantemos os mesmos elementos orbitais da partícula original, com exceção da longitude média, que é escolhida aleatoriamente. Porém, como o semieixo maior e a excentricidade das partículas são os mesmos, os clones não aparecem nos gráficos em que representamos o semieixo maior versus o periastro. Realizaremos a mesma análise feita para os resultados obtidos pelo cenário da companheira solar de massa planetária. Para cada uma das distribuições de planetesimais obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso (figuras 12, 13 e 14), executaremos 300 realizações do simulador observacional, e em cada realização, iremos finalizar a execução do código quando “observarmos” um objeto componente da nuvem interna de Oort, de forma que poderemos então construir um histograma para a porcentagem de realizações que executamos versus o número de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna. Nos próximos gráficos, os círculos com $a < 2000$ UA e $q > 50$ UA representam os objetos obtidos por meio do cenário do aglomerado estelar imerso, os demais círculos representam os objetos obtidos pela integração numérica descrita no último parágrafo. Os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa representam os objetos do tipo Sedna “observados” e os triângulos em verde representam os objetos reais com $a > 50$ UA e $q > 30$ UA observados atualmente.

Na figura 23 apresentamos o gráfico de semieixo maior por periastro para a distribuição de objetos obtida por uma densidade inicial central do aglomerado de $1 \times 10^4 M_{\oplus} \text{pc}^{-3}$, para a estrela mais interna ao aglomerado. Estamos considerando que inicialmente a massa total dos planetesimais no início da integração numérica foi de $50 M_{\oplus}$, o que gera para este modelo uma nuvem interna de Oort que possui uma massa de $2.15 M_{\oplus}$. Qualitativamente o resultado obtido para este cenário é semelhante ao resultado apresentado nas figuras 19 e 21, ou seja, o simulador observacional seleciona primeiramente os objetos com valores menores em semieixo maior e periastro, antes de se obter um objeto do tipo Sedna. Porém, para cada objeto dentro da nuvem interna de Oort que podemos observar neste gráfico, temos na realidade mais 37 objetos, e este fato produz uma diferença considerável na estatística realizada, conforme apresentado na figura 24. Em média, o simulador observacional seleciona um objeto do tipo Sedna a cada 55 “observações” de objetos espalhados, sendo a mediana da distribuição igual a 40, ou seja, em cerca de 50% das realizações do

simulador observacional, um objeto do tipo Sedna é obtido em um número menor que 40 “observações”. Estes valores diferem dos resultados obtidos pelo cenário da companheira solar e do fato de que Sedna foi o 82º objeto com $a > 50$ UA e $q > 30$ UA a ser observado. Isto ocorre devido a grande diferença entre a massa da população de planetesimais inicialmente espalhado por Júpiter e Saturno e a massa dos planetesimais posteriormente espalhada principalmente por Netuno.

Qual seria a massa total de sólidos entre a região de Júpiter e Saturno que seria espalhada durante a sua formação de forma que ao analisarmos o resultado da integração numérica através do simulador observacional obteríamos um objeto do tipo Sedna observado depois de 81 outros objetos? Para responder esta pergunta, reduziremos consecutivamente esta massa total inicial e realizaremos a análise estatística nos resultados, até o ponto em que os resultados sejam equivalentes. Iniciando com $40 M_{\oplus}$, encontramos que em média um objeto do tipo Sedna é obtido a cada 65 objetos “observados”, com uma mediana = 50 e a massa da nuvem interna de Oort é de $1.76 M_{\oplus}$. Passando a massa inicial para $30 M_{\oplus}$, a média de observações em que obtemos um objeto do tipo Sedna aumenta para 83 com uma mediana = 60 e a massa da nuvem interna de Oort é de $1.29 M_{\oplus}$. Com exceção da massa armazenada na nuvem interna de Oort, encontramos uma equivalência entre os resultados obtidos pelos diferentes cenários. A medida em que reduzimos o valor da massa total inicial, o número médio de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna aumenta. Brasser e colaboradores (2008) argumentam que cerca de $50 M_{\oplus}$ em sólidos foram espalhadas por Júpiter e Saturno no período em que estes planetas estavam imersos em um disco gasoso circunstelar. Porém, combinando nossa análise estatística com os dados da descoberta do Sedna, encontramos que a massa inicialmente espalhada por Júpiter e Saturno deve ser de $30 M_{\oplus}$.

Para a densidade central inicial do aglomerado igual a $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, a massa armazenada na nuvem interna de Oort ao final da integração numérica foi de $2.48 M_{\oplus}$, considerando que a massa inicial total espalhada por Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$. Aplicando o simulador observacional, encontramos que o número médio de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna é de 54.5 observações, com uma mediana igual a 38. Reduzindo a massa inicial total para $40 M_{\oplus}$, a massa armazenada na nuvem interna de Oort reduz para $1.98 M_{\oplus}$ e o número médio de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna é de 67 observações, com uma mediana igual a 45. Para uma massa inicial total de $30 M_{\oplus}$, a massa armazenada na nuvem interna de Oort se reduz para $1.49 M_{\oplus}$, e o número médio de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna é de 80 observações, com uma mediana igual a 57. A massa inicial total que compatibiliza os resultados para esta densidade central inicial do aglomerado é a mesma massa que

encontramos para a densidade central inicial menor, porém a massa armazenada na nuvem interna de Oort é um pouco maior.

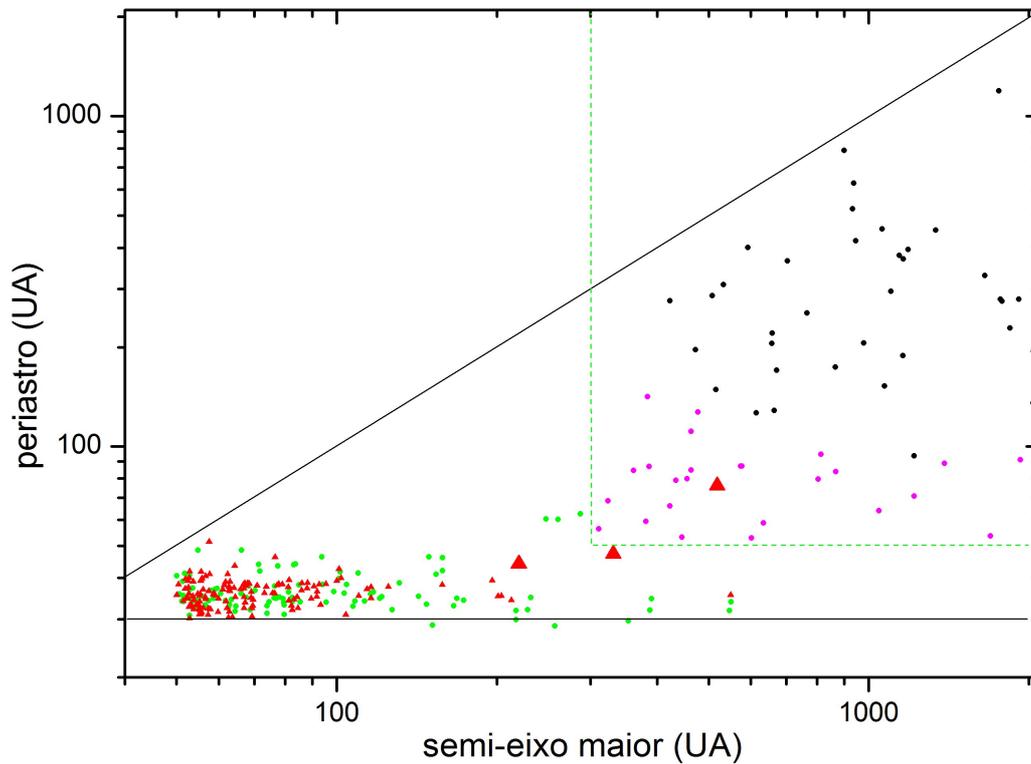


Figura 23: Distribuição de partículas em semi-eixo maior versus periastro para o cenário do aglomerado estelar imerso, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos representam a distribuição de objetos obtida por este cenário, sendo que os círculos em verde representam os objetos “observados” pelo simulador observacional antes de se obter um objeto do tipo Sedna, os círculos em rosa são os objetos do tipo Sedna “observados”, os triângulos em vermelho representam os objetos reais com $a > 50$ UA e $q > 30$ UA observados atualmente. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada delimita a borda interna da nuvem de Oort.

Realizando a mesma análise para a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, encontramos que para uma massa inicial total de $50 M_{\oplus}$, a massa armazenada na nuvem interna de Oort ao final da integração numérica é de $2.43 M_{\oplus}$, e aplicando o simulador observacional a este resultado, encontramos que o número médio de objetos “observados” antes de se obter um objeto do tipo Sedna é de 73 observações, com uma mediana igual a 2.43. Para uma massa inicial total de $40 M_{\oplus}$, a massa armazenada na nuvem interna de Oort é de $1.94 M_{\oplus}$, e o número médio de objetos observados antes de se obter um objeto do tipo Sedna é de 85 observações com uma mediana igual a 61. Para este valor da densidade central inicial, os resultados se compatibilizam quando utilizamos uma massa inicial total de $40 M_{\oplus}$, valor este próximo da massa inicial sugerido por Brassier e colaboradores (2008).

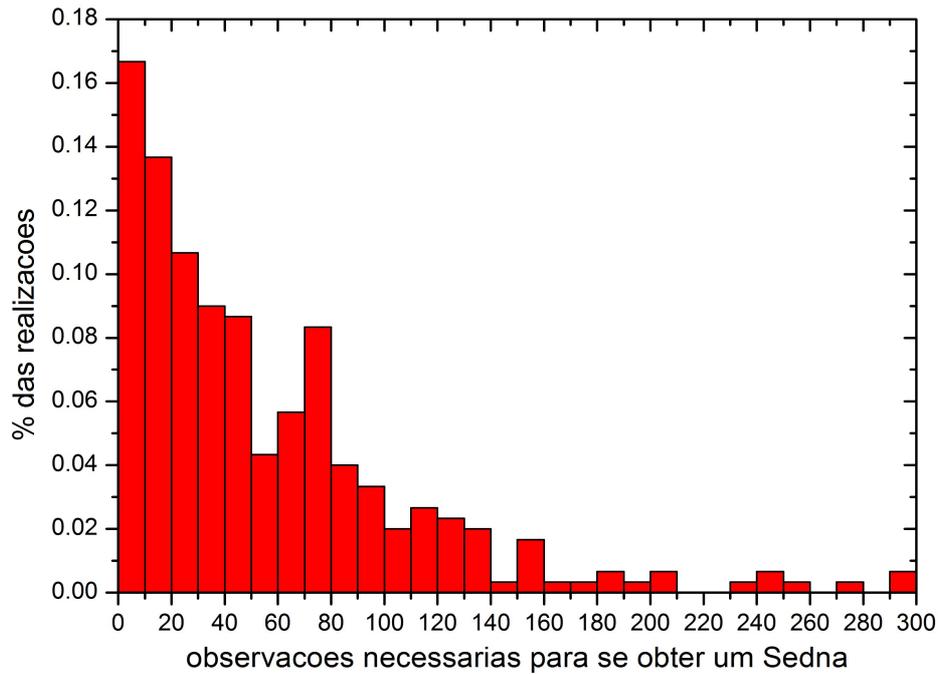


Figura 24: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário do aglomerado estelar imerso apresentado na figura 22. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 55.2 observações, sendo a mediana da distribuição igual a 40. Neste exemplo consideramos que a massa total inicial na região de Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\odot}$.

3.4 – Análises estatísticas utilizando valores do coeficiente de decaimento $q \neq 3.0$

As análises estatísticas realizadas nos subcapítulos 3.2 e 3.3 foram executadas considerando um valor médio para o coeficiente de decaimento da lei de potência da função cumulativa para os raios dos objetos, baseado nos valores encontrados por Fraser e colaboradores (2010), calculados para os objetos de altas e baixas inclinações do cinturão de Kuiper. Realizaremos aqui as análises estatísticas para a população de objetos obtida pelo cenário da companheira solar, para a companheira com inclinação igual a 80° , e para a população de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, para a densidade central inicial igual a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e massa inicialmente espalhada igual a $50 M_{\odot}$ (para a estrela com órbita mais interna ao centro do aglomerado), utilizando os valores de coeficiente de decaimento $q_{\text{frio}} = 4.1$ e $q_{\text{quente}} = 1.8$, que são os coeficientes de decaimento relativos à população fria e quente do cinturão de Kuiper.

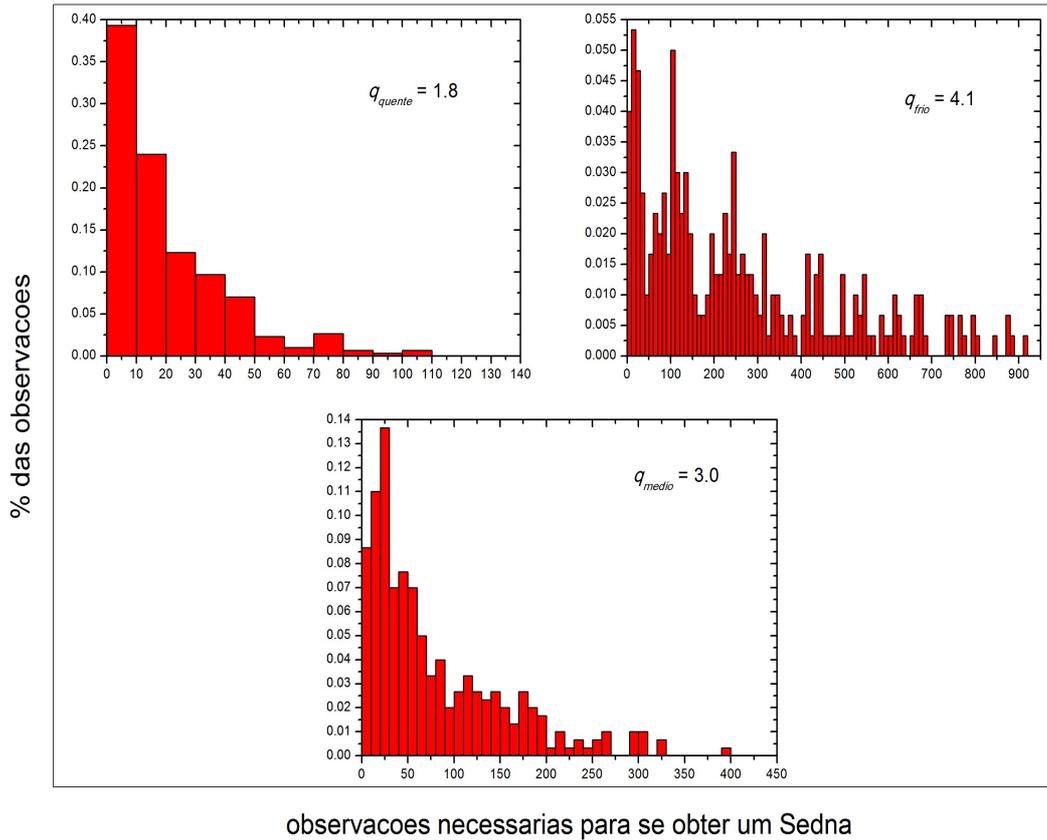


Figura 25: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário da companheira solar de massa planetária em que variamos o coeficiente de decaimento q . Foram executadas 300 realizações do simulador observacional.

Realizamos as mesmas análises estatísticas apresentadas nas seções 3.2 e 3.3, utilizando os valores para o coeficiente de decaimento $q_{frio} = 4.1$ e $q_{quente} = 1.8$ para a população de objetos resultante da integração para o cenário da companheira solar, para a companheira com inclinação igual a 80° . A figura 25 mostra o resultado desta análise para $q_{frio} = 4.1$, $q_{quente} = 1.8$ e $q = 3.0$. Encontramos que para se obter um objeto do tipo Sedna é necessário, em média 297.1 “observações”, com uma mediana igual a 210.5, utilizando o coeficiente de decaimento $q_{frio} = 4.1$. Para o coeficiente de decaimento $q_{quente} = 1.8$ um objeto do tipo Sedna é obtido em média em 20.2 “observações” com uma mediana igual a 15. Para $q = 3.0$, encontramos que um objeto do tipo Sedna é obtido em média em 79.4 “observações” com uma mediana igual a 51. Se considerarmos como parâmetro de comparação o fato que Sedna foi o 82º objeto real com $a > 50$ UA e periastro maior que 30 UA a ser observado, temos que o melhor valor do coeficiente de decaimento que se ajusta a esta condição é o coeficiente médio $q = 3.0$, que é mais próximo do valor de decaimento estabelecido para a população de objetos com $i < 5^\circ$ do cinturão de Kuiper.

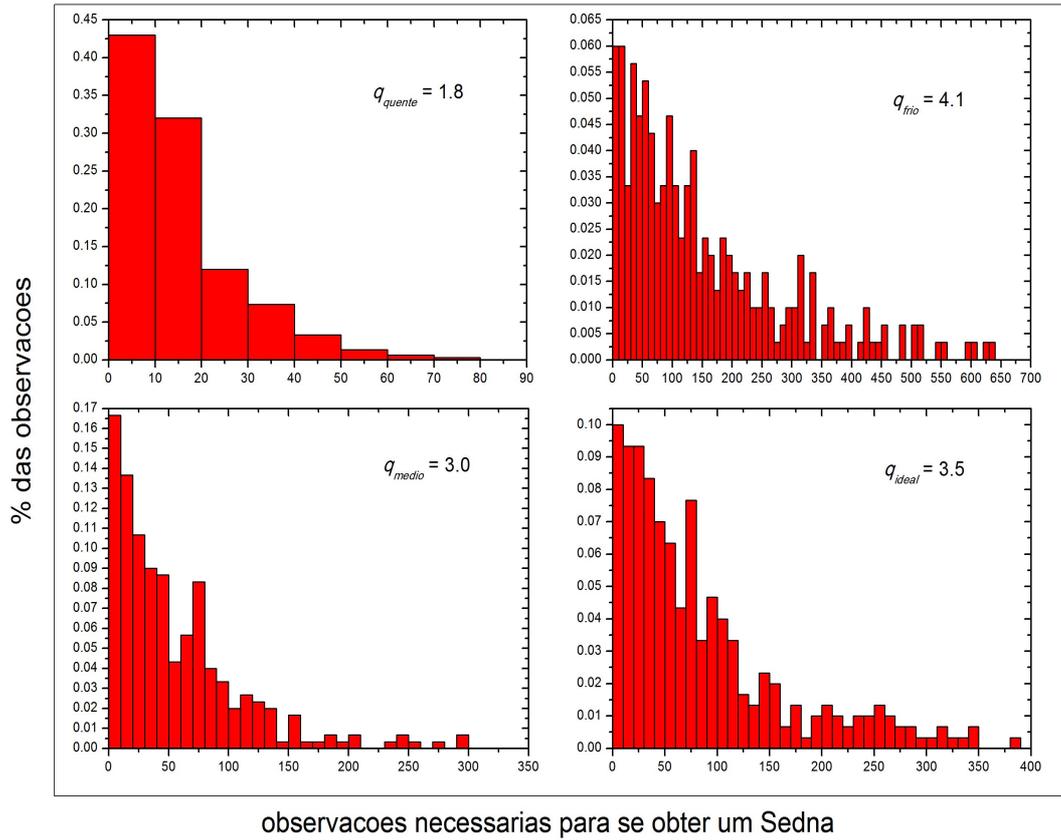


Figura 26: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto do tipo Sedna para o cenário do aglomerado estelar imerso em que variamos o coeficiente de decaimento q . Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. Consideramos que a massa total inicial na região de Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$.

Realizaremos esta mesma análise para a população de objetos resultante da integração para o cenário do aglomerado estelar imerso ($\rho_0 = 1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, estrela com órbita mais interna ao centro do aglomerado estelar), fixando o valor da massa total inicialmente espalhada por Júpiter e Saturno igual a $50 M_{\oplus}$. A figura 26 mostra o resultado para esta análise para $q_{frio} = 4.1$, $q_{quente} = 1.8$ e $q = 3.0$. Encontramos que para se obter um objeto do tipo Sedna é necessário, em média 169.0 “observações”, com uma mediana igual a 110, utilizando o coeficiente de decaimento $q_{frio} = 4.1$. Para o coeficiente de decaimento $q_{quente} = 1.8$ um objeto do tipo Sedna é obtido em média em 14.4 “observações” com uma mediana igual a 11. Para $q = 3.0$, encontramos que um objeto do tipo Sedna é obtido em média em 55.2 “observações” com uma mediana igual a 40. No subcapítulo 3.3 variamos a massa total inicialmente espalhada por Júpiter e Saturno com o objetivo de compatibilizar o resultado com o parâmetro de referência que utilizamos, que é o número de objetos reais observados com $a > 50$ UA e periastro maior que 30 UA antes de se observar Sedna, e utilizamos um valor de coeficiente de decaimento igual a 3.0 para obtermos o raio dos objetos “observados” por intermédio do simulador observacional. Encontramos que para que os resultados sejam compatíveis, a massa de objetos inicialmente espalhada por Júpiter e Saturno deveria ser 30

M_{\oplus} . Brasser e colaboradores (2007) argumentam que a massa inicialmente espalhada deve ser de $50 M_{\oplus}$, o que indica que o coeficiente de decaimento deve ser diferente do valor médio que utilizamos. Encontramos que um valor de coeficiente de decaimento igual a 3.5 produz um resultado de 84.2 objetos “observados” antes de se obter um Sedna, com uma mediana igual a 59. Este valor de coeficiente de decaimento que obtemos se aproxima mais do valor encontrado por Fraser e colaboradores (2010) para a população fria do cinturão de Kuiper.

3.5 – Análises estatísticas para o cenário da captura extra solar de planetesimais

Realizaremos as análises estatísticas para o cenário da captura extra solar de planetesimais que inicialmente faziam parte do disco de planetesimais de estrelas do aglomerado estelar imerso, para as três densidades iniciais centrais que apresentamos na tabela 1, para as estrelas que obtiveram a maior eficiência na captura de objetos extra solares. As integrações numéricas que realizamos para este cenário foram desenvolvidas para um tempo máximo de 3 milhões de anos. Em cada gráfico que apresentaremos para a análise dos resultados obtidos por intermédio deste cenário, os círculos em preto representam o disco de planetesimais que cada estrela que possui uma massa de $1 M_{\odot}$ transporta. Esta população foi clonada antes da integração principal (para cada objeto representado por círculos em preto temos 19 clones), onde cada clone possui o mesmo semieixo maior, excentricidade e inclinação de seu progenitor. Apenas a longitude média é escolhida randomicamente, de maneira que nos gráficos de semieixo maior versus periastro apenas um objeto em preto é representado. Os círculos em verde representam a população de planetesimais extra solares capturados pela estrela devido a todos os encontros estelares, os círculos em rosa representam as 300 primeiras “observações” dos objetos extra solares selecionados pelo simulador observacional e os triângulos representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. A massa total dos objetos armazenados na nuvem interna de Oort por meio deste cenário é de $0.11 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial do aglomerado igual a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, $0.10 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial igual a $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e $0.27 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial do aglomerado igual a $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

A figura 27 apresenta o resultado obtido para a distribuição correspondente a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram selecionados apenas os planetesimais com $q > 50 \text{ UA}$, em ambas as populações. Os objetos em preto representam a população de objetos pertencentes a região obtida pelo modelo do aglomerado estelar imerso, os demais planetesimais representam a população

extra solar capturada pelo Sol. Cada objeto em preto apresentado neste gráfico representa na realidade outros 19 objetos com longitudes médias diferentes. Executamos 300 realizações do simulador observacional, e em cada realização o código é finalizado ao se selecionar um objeto extra solar observado, ou seja, queremos saber quando obteremos um objeto extra solar passível de ser observado em uma pesquisa por planetesimais dentro da nuvem interna de Oort. Os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados”, sendo que vários deles foram selecionados várias vezes. Sedna poderia ter uma origem extra solar? Uma primeira análise qualitativa nesta figura nos diz que a possibilidade é plausível, se desconsiderarmos a pequena eficiência de captura apresentada na tabela 2. Na figura 28 apresentamos o resultado da análise estatística. A maior parte dos objetos extra solares selecionados pelo simulador observacional é obtida com menos de 100 observações. Em uma pesquisa por objetos extra solares dentro da nuvem interna de Oort, necessitamos “observar” em média 103 objetos dentro desta população antes de obtermos um objeto extra solar, com uma mediana igual a 80. Para esta densidade central inicial do aglomerado estelar imerso, este resultado nos revela que, se considerarmos este cenário plausível, para este modelo simplificado que apresentamos, ainda assim será muito difícil obtermos um objeto extra solar como sendo o primeiro objeto observado pertencente a esta população.

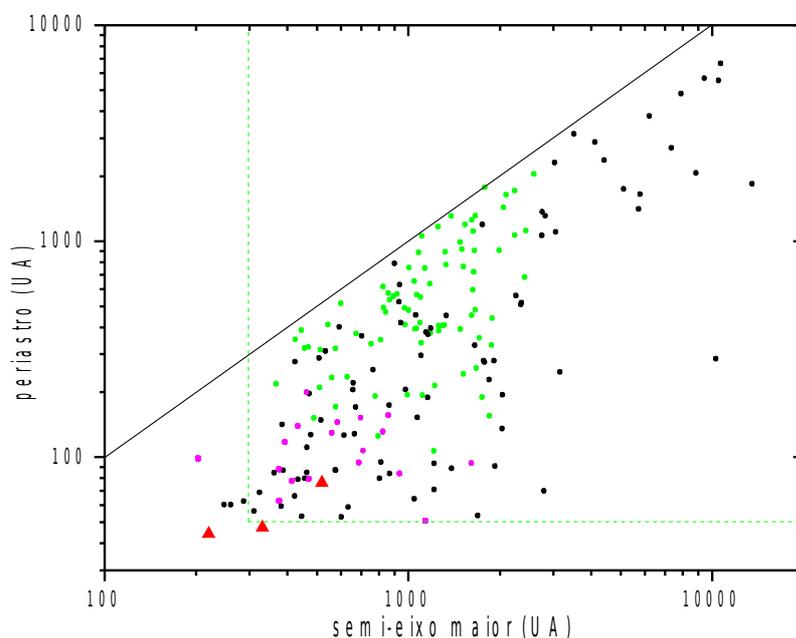


Figura 27: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort.

A figura 29 apresenta o resultado obtido para a distribuição correspondente a densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, para a mesma análise descrita no parágrafo anterior. Para este valor da densidade central inicial, a borda interna da população extra solar se forma a partir de um semi eixo maior igual a 184 UA, fazendo com que objetos extra solares sejam estatisticamente mais fáceis de serem selecionados pelo simulador observacional. Os planetesimais com uma combinação de semi eixo maior e periastro menores são selecionados pelo simulador repetidas vezes. A figura 30 apresenta o histograma do número de observações necessárias para se obter um objeto de origem extra solar para as 300 realizações do simulador observacional. Este resultado difere bastante do resultado apresentado na figura 28, pois nos mostra que para a distribuição de planetesimais para este valor da densidade central inicial o número médio de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar cai para 44 “observações”, com uma mediana igual a 31. Seria necessário, portanto, uma média de 44 objetos reais com periastro acima de 50 UA para observarmos um objeto que possivelmente tenha origem extra solar. Esta distribuição de objetos extra solares que é apresentada na figura 29 também não é favorável a descoberta de objetos do tipo Sedna, no aspecto de que temos pelo menos 3 objetos com $a < 300$ UA e $50 < q < 76$ UA, sendo estes objetos estatisticamente mais prováveis de serem observado antes que Sedna.

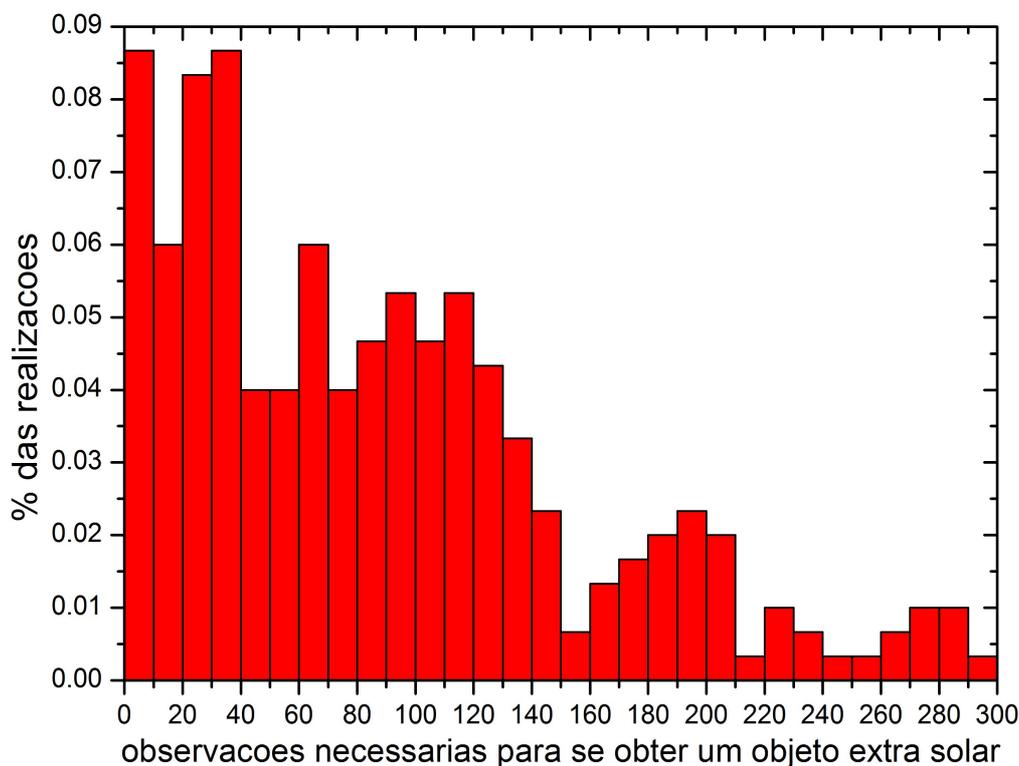


Figura 28: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 103 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 80.

A figura 31 apresenta o resultado obtido para a distribuição correspondente a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, para a mesma análise descrita nos parágrafos anteriores. Para este valor de densidade central inicial do aglomerado, a distribuição de planetesimais extra solares capturados pelo Sol possui sua borda interna iniciando em ~ 100 UA, ou seja, obtemos um número razoável de objetos extra solares com valores em semieixo maior menores que 300 UA e periastros acima de 50 UA. Estes objetos são rapidamente selecionados pelo simulador observacional, conforme representado na figura 32. Em 300 realizações do simulador observacional, obtemos um objeto extra solar, em média, a cada 3.7 observações com uma mediana igual a 3.

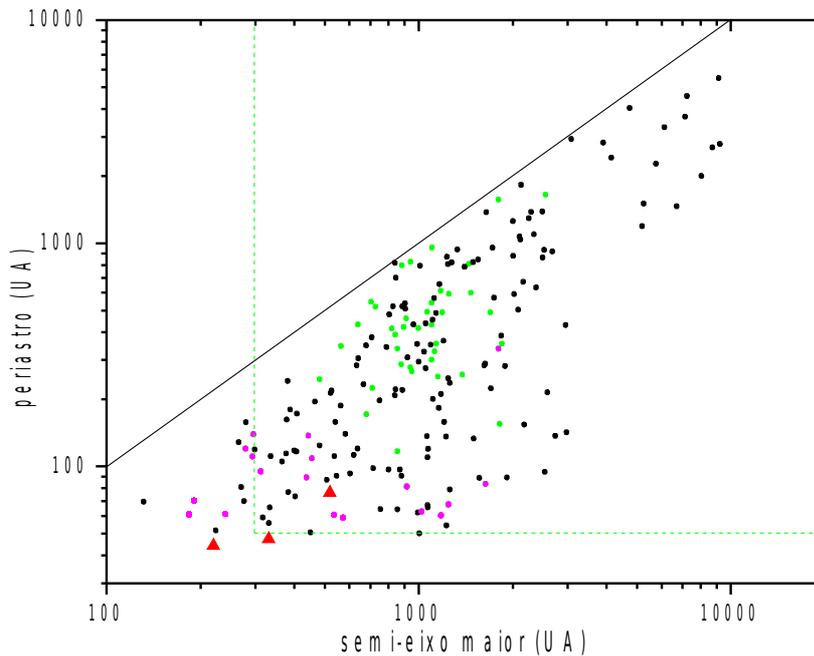


Figura 29: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort.

Se desprezarmos o fato que a eficiência em se capturar planetesimais extra solares que obtemos para este cenário é muito pequena, e que apenas uma ou duas estrelas em cada aglomerado estelar que utilizamos é capaz de manter um disco extra solar até o final da integração numérica, podemos concluir que os valores para as densidades centrais iniciais iguais a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ são plausíveis, por formarem objetos que possuem suas órbitas dentro da nuvem interna de Oort e compatíveis com o fato de Sedna ser o primeiro objeto real observado atualmente. Um modelo mais completo, que leve em consideração a diminuição contínua do gás do aglomerado

estelar e a mudança das órbitas estelares devido a encontros próximos entre as estrelas, pode levar a resultados mais otimistas, pois o número de encontros entre as estrelas estatisticamente deve diminuir, fazendo com que possivelmente mais planetesimais fiquem em órbitas “solares”, aumentando também o número de estrelas que possivelmente são capazes de manter estes planetesimais até o tempo em que o gás se dispersa do aglomerado estelar. Dentre os planetesimais capturados, após a ejeção do gás do aglomerado estelar, aqueles que apresentarem $a < 2000$ UA e $q > 50$ UA possivelmente permanecerão fossilizados em suas órbitas pelo tempo de duração do Sistema Solar.

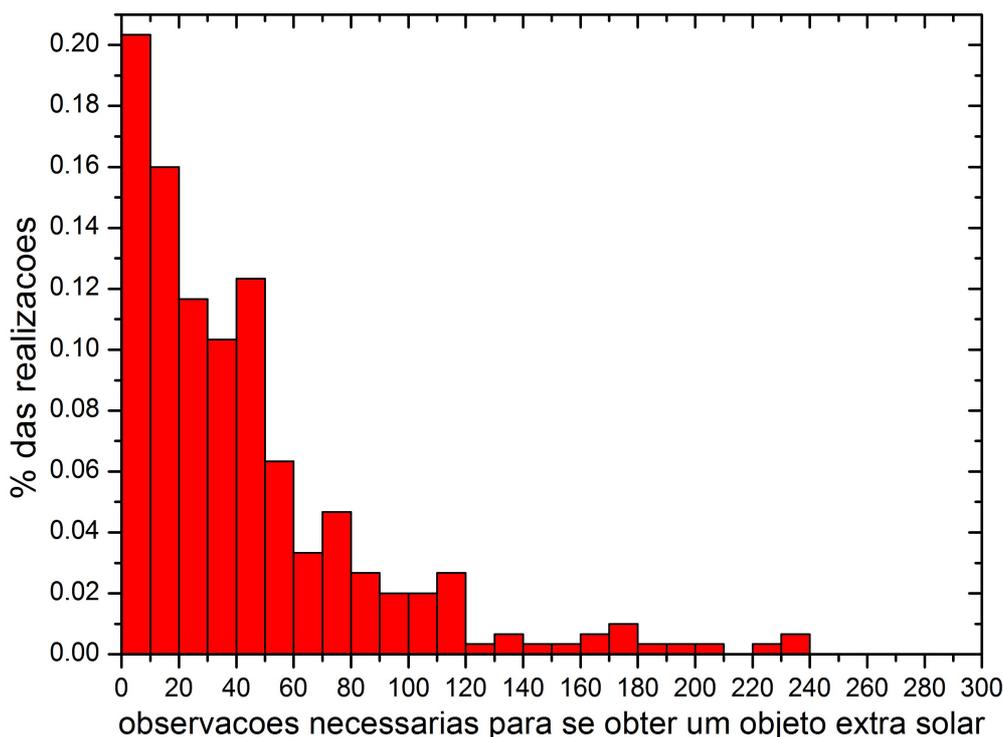


Figura 30: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $3 \times 10^4 M_{\odot} pc^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 44 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 31.

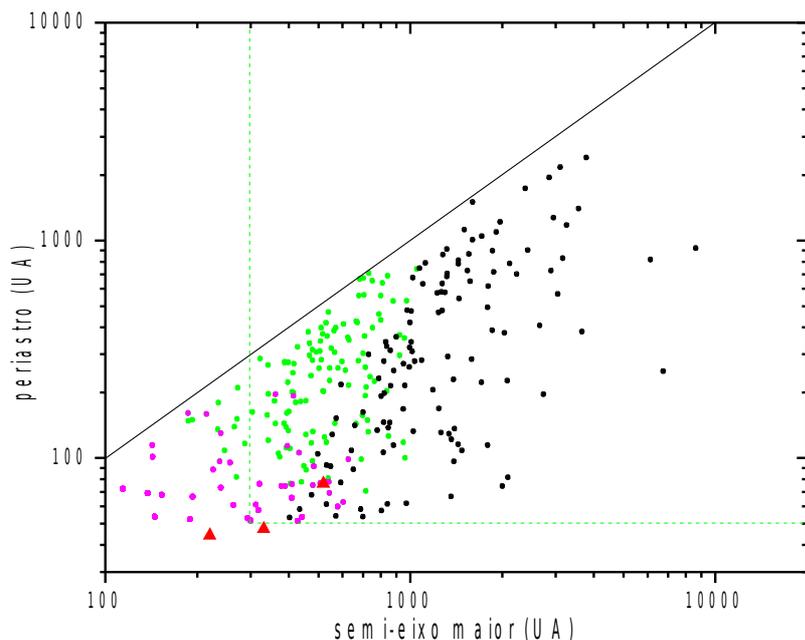


Figura 31: Distribuição de partículas em semieixo maior versus periastro para o cenário da captura extra solar de planetesimais, para uma densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Os círculos em preto representam a distribuição de objetos obtida pelo cenário do aglomerado estelar imerso, sendo que os círculos em verde representam os objetos extra solares capturados, os círculos em rosa representam os objetos extra solares “observados” pelo simulador observacional e os triângulos em vermelho representam os objetos CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. A linha tracejada em verde delimita a borda interna da nuvem de Oort.

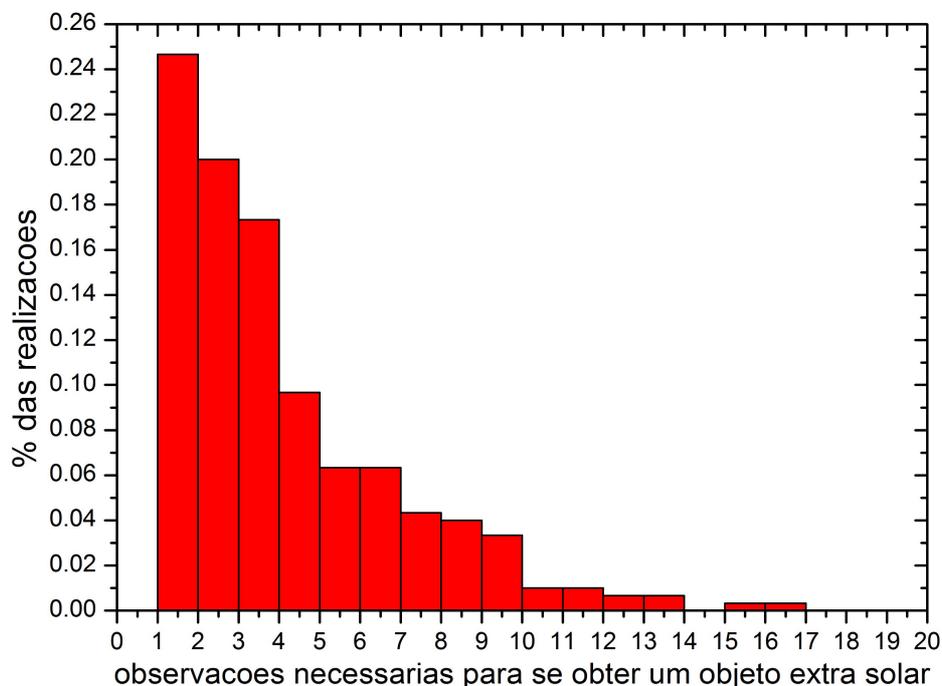


Figura 32: Histograma do número de “observações” necessárias para se obter um objeto extra solar para uma densidade inicial central do aglomerado igual a $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Foram executadas 300 realizações do simulador observacional. O valor médio obtido foi de 3.7 observações necessárias antes de se obter um objeto extra solar, sendo a mediana da distribuição igual a 03.

4 – Conclusões

Neste trabalho reconstruímos os dois principais cenários que se propõem a explicar a origem dinâmica de objetos do tipo Sedna, e comparamos estatisticamente os resultados obtidos por intermédio destes cenários utilizando um simulador observacional de objetos transnetunianos. Propomos também um terceiro cenário, baseado na possível captura de planetesimais extra solares por encontros próximos entre estrelas e o Sistema Solar primordial. Os cenários da companhia solar de massa planetária e do aglomerado estelar imerso reproduzem as órbitas de objetos do tipo Sedna de maneira qualitativamente idêntica, fazendo-se necessário então um estudo profundo de ambos os cenários com o objetivo de se identificar qual dentre os dois é mais plausível de representar a realidade física desta possível população de objetos. Tal objetivo se torna atualmente complexo, devido ao fato de que somente um objeto desta possível população foi observado, e resultados conclusivos devem ser endereçados ao futuro, mediante novas observações.

O cenário da captura extra solar é capaz de colocar objetos de origem extra solar em regiões do Sistema Solar em que a observação dos mesmos se faz factível. Porém, ao compararmos a parcela dos objetos da nuvem interna de Oort formada por este mecanismo com os objetos formados pelo modelo do aglomerado estelar imerso, encontramos que seria necessário em média observar 103 objetos da nuvem interna de Oort para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ antes de obtermos um objeto extra solar, 44 objetos observados para a densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e 4 objetos observados para a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Desta maneira, a observação de um objeto extra solar se torna estatisticamente viável apenas para o maior valor de densidade central inicial, de forma que possivelmente Sedna não tem uma origem extra solar, pois foi o primeiro e único objeto desta suposta população a ser observado, se considerarmos CR₁₀₅ e VN₁₁₂ como estando marginalmente entre a nuvem interna de Oort e o disco de objetos destacados. Por outro lado, para este elevado valor de densidade central inicial, os objetos de origem extra solar não possuem órbitas semelhantes às órbitas dos objetos do tipo Sedna.

Encontramos algumas limitações no modelo da captura extra solar de planetesimais que utilizamos. Primeiro, a taxa de captura é muito baixa, conforme apresentamos na tabela 02. Isto ocorre porque uma vez que alguma estrela deixa planetesimais no Sistema Solar em um encontro, posteriormente outra estrela pode retirá-los, e isto ocorre de forma randômica. Segundo, o número de estrelas de massa solar que ao final da integração numérica consegue manter um disco de planetesimais extra solares é muito pequeno, cerca de apenas 10% de todas as estrelas com massa solar (aproximadamente uma estrela para as densidades estelares mais baixas e duas para a

densidade mais alta). Isto ocorre devido a posição orbital da estrela com relação ao centro do aglomerado estelar. Estrelas com órbitas mais internas ao centro do aglomerado tendem a sofrer um número maior de encontros estelares com potencial de troca de planetesimais (que definimos como sendo todas as estrelas com $a < 6000$ UA e $e < 3.0$), enquanto que estrelas com órbitas mais externas ao centro do aglomerado estelar sofrem poucos (ou nenhum) encontros com potencial troca de planetesimais.

Reconstruímos também o cenário do aglomerado estelar imerso em uma densa nuvem molecular gasosa (Brasser e colaboradores; 2006, 2007 e 2008). Obtivemos objetos destacados para a região ocupada pelo CR₁₀₅, VN₁₁₂ e Sedna para valores de densidade central inicial a partir de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, sendo que para valores de densidade mais baixos a nuvem interna de Oort também é formada, porém para valores maiores de semieixo maior. Por intermédio do simulador observacional analisamos a possibilidade de se obter objetos do tipo Sedna. Utilizamos como parâmetro de comparação o fato de Sedna ter sido o 82º objeto do tipo espalhado com $a > 50$ UA e $q > 30$ UA. Encontramos que são necessários, em média, 55 objetos observados antes de se obter um Sedna para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, 55 para a densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ e 73 objetos observados antes de se obter um Sedna para a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. Para isto, consideramos que a massa inicial total de sólidos espalhados por Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$, de acordo com Brasser e colaboradores (2007). Para compatibilizar os resultados com o parâmetro de comparação que utilizamos, encontramos que a massa inicial total espalhada por Júpiter e Saturno deveria ser de apenas $30 M_{\oplus}$. Realizamos portanto uma segunda análise, fixando o valor da massa total inicial em $50 M_{\oplus}$ e modificamos o valor do coeficiente de decaimento da lei de potência cumulativa para o raio dos objetos, que inicialmente assumimos como sendo $q = 3.0$, que representa o valor médio do coeficiente fixado para as populações de objetos quentes e frios do cinturão de Kuiper. Encontramos que um valor de $q = 3.5$ compatibiliza nossos resultados com o parâmetro de comparação que utilizamos, indicando que a população de objetos da nuvem interna de Oort obtida por meio deste cenário é melhor representada por um valor de $q = 3.5$, de forma que esta população seria mais semelhante a população fria do cinturão de Kuiper (pequenos objetos) que a população quente, porém devemos considerar que existem incertezas em vários parâmetros utilizados. Este valor do coeficiente de decaimento da lei de potência cumulativa é muito maior que o valor $q = 2.0$ para a população de objetos do disco espalhado estimado por Fraser e colaboradores (2010). O fato que o Sol tenha se originado em um aglomerado estelar propicia um mecanismo que nos permite justificar a origem de objetos do tipo Sedna, porém é necessário um valor mínimo de densidade central inicial igual a $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ para

se destacar objetos de um disco de planetesimais espalhados por Júpiter e Saturno para regiões da nuvem interna de Oort. Além disto, teremos objetos destacados para a nuvem interna de Oort somente para algumas estrelas com valores de uma massa solar, dependendo de sua órbita com relação ao centro do aglomerado estelar.

O cenário da companheira solar de massa planetária (Gomes e colaboradores, 2006) também é capaz de produzir objetos pertencentes a nuvem interna de Oort, para vários parâmetros orbitais e massas de diferentes companheiras, conforme apresentado neste trabalho. Focamos nossa atenção para os objetos produzidos por duas companheiras que diferem apenas em suas inclinações, em um modelo completo de migração orbital dos planetas gigantes. Realizamos a mesma análise estatística que foi feita para a população de objetos obtida por meio do cenário do aglomerado estelar. Utilizando um valor de coeficiente de decaimento da lei de potencia cumulativa que fornece o raio dos objetos igual a 3.0 (valor médio do coeficiente encontrado com base nas populações de objetos quentes e frios do cinturão de Kuiper), encontramos que para a companheira com inclinação igual a 40° é necessário um número médio de 74 objetos observados antes de se obter um Sedna, enquanto que para a companheira com inclinação igual a 80° é necessário um número médio de 80 objetos observados antes de se obter um Sedna. A companheira com inclinação de 40° não produz objetos com órbitas retrógradas para objetos com $100 < a < 550$ UA. Uma diferença fundamental entre a população de objetos produzidos pelo cenário da companheira e a população de objetos produzidos pelo cenário do aglomerado estelar imerso é que os objetos produzidos pelo cenário da companheira são dinamicamente ativos, enquanto que os objetos obtidos pelo cenário do aglomerado estelar são fossilizados em suas posições. A maior crítica com relação ao cenário da companheira solar é quanto à origem da companheira, já que planetas não se formam em distâncias tão grandes com relação ao centro do Sistema Solar. Entre os mecanismos plausíveis para a formação da órbita peculiar de uma companheira solar de massa planetária, podemos citar o espalhamento de um possível planeta por Júpiter em um período inicial do Sistema Solar seguido de um posterior aumento em seu periastro pelos efeitos de maré gerados por um aglomerado estelar primordial, ou a captura extra solar de uma companheira durante um encontro entre três corpos no período inicial do Sistema Solar (um encontro entre o Sol, uma estrela e a companheira que possui uma órbita em torno da estrela em questão).

Uma segunda comparação entre o cenário da companheira solar de massa planetária e o cenário do aglomerado estelar imerso pode ser feito através da comparação da massa esperada para a população de objetos introduzidos na nuvem interna de Oort por meio de um dos cenários aqui descritos. Na época em que Sedna foi descoberto, Brown e colaboradores (2004) estimaram que a massa total da população de objetos do tipo Sedna seria aproximadamente $5.0 M_\oplus$. O cenário da

companheira solar de massa planetária para o modelo em que incluímos a migração orbital dos planetas gigantes nos fornece uma massa para a população da nuvem interna de Oort igual a $0.325 M_{\oplus}$ para a companheira com $i_c = 40^\circ$ e $0.313 M_{\oplus}$ para a companheira com $i_c = 80^\circ$. Para o modelo do aglomerado estelar imerso, encontramos uma massa igual a $2.15 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial de $1 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, $2.48 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial de $3 \times 10^4 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, e $2.43 M_{\oplus}$ para a densidade central inicial de $1 \times 10^5 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, considerando que a massa total inicial de sólidos espalhados por Júpiter e Saturno foi de $50 M_{\oplus}$. Desta maneira, os resultados para a massa da nuvem interna de Oort obtidos pelo modelo do aglomerado estelar imerso se aproximam mais do valor da massa estimada inicialmente. Porém, recentes pesquisas observacionais por objetos distantes não obtiveram sucesso em encontrar objetos pertencentes a nuvem interna de Oort, fazendo com que possivelmente a massa inicialmente estimada para esta população esteja muito grande.

Com relação à inclinação dos objetos do tipo Sedna obtidos pelo cenário da companheira solar de massa planetária, temos que companheiras com inclinações próximas de zero nos fornecem o maior número de objetos com inclinações abaixo de 15° , com exceção da companheira com massa terrestre e inclinação igual a 90° , que também fornece um bom número de objetos com baixas inclinações. Para o modelo com migração orbital dos planetas, o número de objetos do tipo Sedna com baixas inclinações é pequeno, sendo este resultado muito semelhante ao resultado obtido pelo cenário do aglomerado estelar para todos os valores de densidade central inicial utilizados.

Concluimos portanto que tanto o cenário do aglomerado estelar imerso quanto o cenário da companheira solar de massa planetária são capazes de descrever a formação dinâmica de objetos do tipo Sedna, sendo necessário futuras observações de outros componentes desta população para que, através de resultados como os que obtivemos neste trabalho, seja talvez possível argumentar sobre qual cenário é mais plausível de se representar a realidade física da formação destes objetos, enriquecendo portanto nosso conhecimento acerca da formação do Sistema Solar.

Levison e colaboradores (2010) estudaram a formação da nuvem de Oort através de um modelo de aglomerado estelar imerso, com o objetivo de se explicar o déficit de massa da nuvem de Oort. Em particular, os modelos computacionais que descrevem a formação da nuvem de Oort apresentam como resultado uma massa total de objetos muito menor que os resultados estatísticos baseados em observações de novos cometas de longos períodos. Neste trabalho são analisadas as dinâmicas de estrelas componentes do aglomerado estelar primordial em duas fases de evolução do aglomerado: a fase em que o aglomerado está imerso em uma nuvem molecular gasosa e a fase em que esta nuvem se dissipou. Cada estrela transporta consigo um disco de planetesimais distribuídos uniformemente entre 1000 e 5000 UA. Desta forma eles conseguem obter uma nuvem de Oort

composta por objetos extra solares que corresponde a um total de 90% da massa da nuvem de Oort obtida pelos modelos computacionais que consideram apenas objetos espalhados inicialmente por Júpiter e Saturno. Porém, a nuvem de Oort obtida por este mecanismo é formada para valores em semieixo maior acima de 1000 UA e periaistros acima de 100 UA. Apesar do mecanismo utilizado por Levison e colaboradores ser semelhante, porém mais completo que o mecanismo que utilizamos para as capturas de planetesimais extra solares, mostramos que a borda interna da nuvem de Oort extra solar pode ser mais interna ao centro do Sistema Solar que o obtido por Levison e colaboradores, de forma que um modelo mais detalhado para a análise da captura destes objetos extra solares se faz importante e pode fornecer resultados que nos ajude a entender melhor os mecanismos dinâmicos responsáveis pela formação da nuvem de Oort.

Pretendemos em trabalhos futuros aprimorar o cenário da captura extra solar de planetesimais, modificando o modelo que utilizamos neste trabalho. Em futuras modificações acrescentaremos as perturbações individuais entre as estrelas que compõe o aglomerado estelar, o que provoca uma diminuição paulatina do número de encontros estelares e possivelmente um aumento na eficiência entre a transferência de planetesimais entre as estrelas. Outra modificação importante é a redução da massa de gás do aglomerado com relação ao tempo, estendendo nossas integrações numéricas a períodos em que todo o gás do aglomerado tenha se dispersado. Este modelo mais detalhado poderá nos fornecer informações sobre a formação da nuvem interna de Oort extra solar e a captura de objetos de massa planetária vindo de outras estrelas, possivelmente nos fornecendo um mecanismo que possa, ou não, justificar a existência de uma companheira de massa planetária dentro da nuvem de Oort.

BIBLIOGRAFIA

- Binney, J., and Tremaine, S., (1987) Galactic Dynamics. *Princeton University Press*
- Brasser, R., Duncan, M.J., and Levison, H.F., (2006) Embedded star cluster and the formation of the Oort Cloud. *Icarus*, 184, 59 – 82
- Brasser, R., Duncan, M.J., and Levison, H.F., (2007) Embedded star cluster and the formation of the Oort Cloud II. The effect of the primordial solar nebula. *Icarus*, 191, 413 – 433
- Brasser, R., Duncan, M.J., and Levison, H.F., (2008) Embedded star cluster and the formation of the Oort Cloud III. Evolution of the inner cloud during the Galactic phase. *Icarus*, 196, 274 – 284
- Brown, M.E., Trujillo, C., and Rabinowitz, D., (2004) Discovery of a candidate inner Oort cloud planetoid. *Astrophys. J.*, 617, 645 – 649
- Brouwer, D., Clemence, G.M., (1961) Methods of Celestial Mechanics. *Academic Press Inc.*
- Chambers, J.E. And Migliorini, F., (1997) A new software package for orbital integrations. *Bull. American Astron. Soc.*, 29, 1024
- Duncan, M., Quinn, T., Tremaine, S., (1987) The formation and extent of the Solar System comet cloud. *Astro. J.*, 94, 1330 – 1338
- Fraser, W.C., Brown, M.E., Schwamb, M.E., (2010) The luminosity function of the hot and cold Kuiper belt populations. *Icarus*, 210, 944 – 955
- Gladman, B., Marsden, B. G., VanLaerhoven, C., (2008) Nomenclature in the outer Solar System. *The Solar System beyond Neptune*, 43 - 56
- Gladman, B., Holman, M., Grav, T., Kavlaars, J., Nicholson, P., Aksnes, K. And Petit, J.M. (2002) Evidence for an extended scattered disk. *Icarus*, 157, 269 – 279
- Gomes, R.S., (2003) The origin of the Kuiper belt high-inclination population. *Icarus*, 61, 404 - 418
- Gomes, R.S., Gallardo, T., Fernández, J.A., Brunini, A., (2005) On the origin of the high-perihelion scattered disk: The role of the Kozai mechanism and mean motion resonances. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 91, 109 – 129
- Gomes, R.S., Levison, H.F., Tsiganis, K. And Morbidelli, A., (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435, 466 – 469
- Gomes, R.S., Matese, J., and Lissauer, J., (2006) A distant planetary-mass solar companion may have produced distant detached objects. *Icarus*, 184, 589 – 601

- Gomes, R.S., Soares, J.S., (2009) Sedna, 2004 VN₁₁₂ and 2000 CR₁₀₅: The tip of an iceberg. *Ice body of the Solar System – IAU Symposium*, 263, 67 – 75
- Levison, H.F., Duncan, M.J., Brassier, R., and Kaufmann, D.E., (2010) Capture of Sun's Oort cloud from in its birth cluster. *Science*, 329, 187 – 190
- Levison, H.F., Thommes, E., Duncan, M., (2010) Modeling the formation of giants planets cores. I. Evaluating key processes. *Astro. J.*, 139, 1297 – 1314
- Malhotra, R., (1995) The origin of Pluto's orbit: Implications for the Solar System Beyond Neptune. *Astron. J.*, 110, 420 – 429
- Brower, D., Clemence, M.G., (1961) *Methods of Celestial Mechanics. Hardcover, Academic press*
- Morbidelli, A., Levison, H.F., (2004) Scenarios for the origin of the orbits of the trans-Neptunian objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna). *Astro. J.*, 128, 2564 – 2576
- Morbidelli, A., Levison, H.F., Tsiganis, K., Gomes, R., (2005) Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435, 462 – 465
- Oort, J.H., (1950) The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, 11, 91 – 110
- Planet Formation: theory, observations and experiments (2006) *Cambridge University Press*
- Schwamb, M.E., Brown, M.E., Rabinowitz, D.L., and Ragozzine, D., (2010) Properties of the distant Kuiper belt: Results from the Palomar Distant Solar System survey. *Astrophys. J.*, 720, 1691 – 1707
- Tsiganis, K., Gomes, R.S., Morbidelli, A., and Levison, H.F., (2005) Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435, 459 – 461