

Evolução orbital dos maiores objetos transnetunianos

LUIZ GOMES

Evolução orbital dos maiores objetos transnetunianos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr Rafael Sfair

Guaratinguetá

2023

G633e	Gomes, Luiz Claudio Evolução orbital dos maiores objetos transnetunianos / Luiz Claudio Gomes - Guaratinguetá, 2023. 45 f : il. Bibliografia: f. 38-41 Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair 1. Asteroides - Órbitas. 2. Sistema solar. 3. Planetas - Órbitas. I. Título. CDU 523.44(043)
-------	--

LUIZ CLAUDIO GOMES

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

**PROGRAMA: FÍSICA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. RAFAEL SFAIR DE OLIVEIRA
Orientador - UNESP



Profa. Dra. ROSANA APARECIDA NOGUEIRA DE ARAUJO
UNESP



Prof. Dr. JÚLIO IGNÁCIO BUENO DE CAMARGO
ON

Dados Curriculares

LUIZ GOMES

NASCIMENTO 20.08.1998 - BOTUCATU / SP

FILIAÇÃO Reinaldo Gomes
Meire Rute Marques Dos Anjos

FORMAÇÃO

2017 - 2020 Bacharelado em Física
Departamento de Física e Química
FEG/UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá

2021 - 2023 Mestrado em Física
Departamento de Física e Química
FEG/UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá

Agradecimentos

Agradeço o Dr. Rafael Sfair por me orientar nesse trabalho e em todos esses anos de pesquisa, conselhos e amizade. Aos integrantes da banca, Dra. Rosana Araujo e o Dr. Julio Camargo, por todos os comentários e sugestões para aperfeiçoar a dissertação. E a minha família por todo apoio e suporte.

Este trabalho contou com o apoio financeiro de:
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Proc: 2016/24561-0
DFG German Research Foundation Project 446102036
Zentrum für Datenverarbeitung of the University of Tübingen

RESUMO

Os centauros e os transnetunianos (TNO's) são corpos pequenos que orbitam o Sol em regiões diferentes. Os transnetunianos são objetos pequenos com órbitas além de Netuno com semieixo maior de 30 unidades astronômicas (ua) e os centauros são objetos transientes na região dos planetas gigantes, com semieixo maior entre 5 ua e 30 ua.

Até o momento, o maior centauro conhecido na literatura é Chariklo com 250 quilômetros de diâmetro e semieixo maior de 15,84 ua. Por outro lado, existem inúmeros transnetunianos com diâmetros maiores que 300 km. Com órbitas bem variadas, alguns TNO's passam próximos de Netuno e são perturbados sendo lançados na região dos centauros ou espalhados em direção oposta ao Sol. Seguindo o raciocínio deveríamos ter centauros com mais de 300 km de diâmetro ou a região entre os planetas gigantes é extremamente instável a ponto de não sobreviver nenhum objeto maior que os conhecidos atualmente.

Com o *Dark Energy Survey* (DES), um telescópio com câmera acoplada, foram identificados mais de 100 TNO's em apenas alguns anos de funcionamento. A fim de explorar a órbita de objetos transnetunianos com diâmetros superiores a 300 km, desenvolvemos uma ferramenta completa utilizando o software REBOUND para investigar a dinâmica desses objetos por 500 milhões de anos.

Integramos os setenta e sete maiores TNO's classificados como *Outros TNO's*, que são objetos não ressonantes e além da categoria de *clássicos*. A grande maioria dos clones simulados permanecem com baixas variações nos elementos orbitais, continuando na região transnetuniana. Uma fração dos clones desses objetos entram na região dos centauros e acabam sofrendo múltiplos encontros próximos com os planetas gigantes. Analisamos os últimos encontros próximos antes da ejeção do sistema entre os planetas e clones, e mapeamos a influência dos gigantes sobre alguns objetos.

Palavras-chave: transnetunianos. Centauros. Rebound. Simulação numérica.

ABSTRACT

The centaurs and trans-Neptunians (TNOs) are small objects that orbit the Sun in different regions. The trans-Neptunians are small bodies with an orbit beyond Neptune with a semimajor axis of 30 astronomical units (au) while centaurs are transient objects in the region of the giant planets, with a semimajor axis between 5 au and 30 au.

The largest centaur known in literature is Chariklo, which is 250 kilometers in diameter and has a semimajor axis of 15,84 au. On the other hand, there are numerous trans-Neptunians with diameters greater than 300 km. With diverse orbits, some TNOs experience close encounters with Neptune and are disturbed by being thrown into the centaur region or scattered away from the Sun. Thus, one could expect objects larger than 300 km in diameter in the region between the giant planets can survive.

To explore the orbit of trans-Neptunian objects with diameters greater than 300 km, we developed a complete tool using the REBOUND package to investigate the dynamics of these objects for 500 million years.

We integrate the seventy-seven largest TNOs classified as *Other TNOs*, which are non-resonant objects and beyond the category of *classics*. Most simulated clones remain with low variations in orbital elements, continuing in the trans-Neptunian region. However, a fraction of clones of these objects enter the centaur region and experience multiple close encounters with the giant planets. We analyze the last close encounters before the ejection of the system between the planets and clones, and we mapped the influence of giants on some objects.

Keywords: Trans-Neptunians. Centaurs. Rebound. Numerical simulation.

Lista de Figuras

1.1	Distribuição dos centauros e dos objetos transnetunianos	16
1.2	Número acumulativo de objetos do disco disperso (SDO) e centauros	17
3.1	Evolução orbital dos clones do TNO 2010 OO127	23
3.2	Evolução orbital dos clones do TNO 2014 XY40	24
3.3	Gráfico de dispersão dos objetos simulados relacionado aos número de encontros totais	25
3.4	Gráfico de dispersão dos objetos simulados relacionado aos encontros próximos I	26
3.5	Gráfico de dispersão dos objetos simulados relacionado aos encontros próximos II	27
3.6	Gráfico de dispersão dos objetos simulados relacionado ao número de ejeções	28
3.7	Evolução orbital dos clones do TNO 2002 MS4	31
3.8	Evolução orbital dos clones do TNO 2015 AH281	32
3.9	Evolução orbital dos clones do TNO 1998 SN165	33
3.10	Evolução orbital dos clones do TNO 2013 XC26	34
3.11	Evolução orbital dos clones do TNO 2002 LM60	36

Lista de Tabelas

2.1	Lista dos dez primeiros objetos transnetunianos	20
3.1	Total de encontros de todos os 694 clones com os planetas	25
3.2	Objetos transnetunianos que entram na região dos centauros	29
A.1	Lista de objetos transnetunianos (parte 1)	45
A.2	Lista de objetos transnetunianos (parte 2)	46

Sumário

AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODOS	19
3 RESULTADOS	22
3.1 ANÁLISE DA POPULAÇÃO	24
3.2 ANÁLISES INDIVIDUAIS	30
2002 MS4	30
2015 AH281	32
1998 SN165	33
2013 XC26	34
2002 LM60	36
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E ESTUDOS FUTUROS	37
APÊNDICES	43
A ELEMENTOS ORBITAIS DOS OBJETOS SIMULADOS	44

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nosso sistema solar se formou há cerca de 4,6 bilhões de anos a partir de uma nuvem molecular densa de gás e poeira. Essa nuvem era basicamente constituída por átomos de hidrogênio, hélio, oxigênio e nitrogênio, moléculas de hidrogênio e cátions de carbono, enxofre e silício (Willacy et al., 2022). O aglomerado de gás entrou em colapso, possivelmente devido à onda de choque de uma estrela explodindo próximo, ou por flutuações aleatórias de densidade dentro do próprio conjunto de partículas. Conforme a nuvem entra em colapso, ela começa a girar e, para conservar o momento angular, sua velocidade de rotação aumenta à medida que continua a se contrair. Com a contração contínua, a nuvem fica achatada, ganhando um plano preferencial para as partículas, perpendicular ao eixo de rotação (Willacy et al., 2022).

No centro, a gravidade atrai mais e mais material para dentro, convertendo energia potencial em energia cinética e aumentando a temperatura do meio. A protoestrela acumula matéria rapidamente, e com pressão e temperatura grandes o suficiente, as reações nucleares começam, e os átomos de hidrogênio se combinam para formar o hélio, dando origem ao Sol. Nossa estrela está aproximadamente na metade da sequência principal, transformando matéria em energia, produzindo neutrinos e radiação solar. O Sol ficará na sequência principal por cerca de 10 bilhões de anos (Goldsmith & Owen, 2001).

Enquanto o Sol era apenas uma proto-estrela, o material do disco colidia, se aglutinava e gradualmente formou objetos cada vez maiores, chamados de planetesimais (Willacy et al., 2022). Como a maioria dos grãos de poeira tem órbitas quase idênticas, as colisões entre eles são relativamente lentas, o que permite que as partículas se colemb e permaneçam juntas. Nesse estágio, os objetos de acreção individuais no disco mostram diferenças em seu crescimento e composição, que dependem de suas distâncias da massa central (J.J. Lissauer, 2013).

Perto do Sol, apenas o material rochoso poderia suportar o calor quando o sistema solar era jovem, por isso a disposição dos planetas e outros corpos em nosso sistema solar se devem à forma como o sistema se formou. À medida que o gás nebular esfriava, os primeiros

materiais sólidos a condensar a partir de uma fase gasosa eram grãos de silicatos e rochas (J.J. Lissauer, 2013). Por esta razão, os quatro planetas internos, Mercúrio, Vênus, Terra e Marte, são planetas terrestres.

Os materiais no estado líquido, gasoso ou o gelo de compostos, se estabeleceram nas regiões externas (Willacy et al., 2022). O acréscimo de planetesimais gelados produziu objetos com massa suficiente para causar o colapso gravitacional do gás circundante e da poeira na nebulosa solar. Cada um dos quatro planetas gigantes formou sua própria nébula, formando pequenos novos discos em torno da condensação central.

Os planetas são geralmente divididos em dois grupos, os telúricos e os jovianos (J.J. Lissauer, 2013). Os telúricos, também chamados de planetas terrestres ou internos, não possuem sistemas de anéis e tem poucos ou nenhum satélite natural, devido ao fato da sua proximidade com o Sol. Mercúrio, Vênus, Terra e Marte, são menores e mais densos que os jovianos, formados basicamente por rochas e metais, possuindo superfícies sólidas.

Já os jovianos, ou exteriores, são planetas gigantes, possuem anéis, são formados por gases (como o hidrogênio, o hélio e o metano) e devido a isso, possuem baixa densidade. Localizam-se mais afastados do Sol na seguinte ordem: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, e possuem campo magnético e muitos satélites conhecidos. Os planetas gigantes têm atmosferas primárias capturadas diretamente da nebulosa solar. Isso contrasta com os planetas terrestres, cujas atmosferas são secundárias, geradas por gases vulcânicos ou por detritos de impactos de cometas (Schombert, 2009).

Depois que a maior parte da poeira da nebulosa formou objetos discretos, um aumento na intensidade do vento solar removeu o gás e a poeira restante no sistema. Alguns dos fragmentos maiores da nebulosa que não contribuíram para a formação dos planetas e satélites continuam no Sistema Solar, os chamados corpos menores. Qualquer objeto natural do sistema solar que não seja o Sol, um planeta, um planeta anão ou um satélite é chamado de corpo menor, categoria que inclui asteroides, meteoroides e cometas (National aeronautics and space administration (NASA), 2020)

No sistema solar há cinco planetas anões conhecidos (National aeronautics and space administration (NASA), 2020), Ceres, Plutão, Haumea, Makemake e Éris. Essa categoria foi criada pela União Astronômica Internacional em 2006, a partir do descobrimento de novos objetos semelhantes à Plutão e não semelhantes aos outros planetas. Enquanto Ceres está localizado entre as órbitas de Marte e Júpiter, os demais planetas anões estão além de Netuno. Em geral, esses corpos têm massas muito pequenas, de forma que não são os astros dominantes em suas órbitas e alguns possuem satélites que têm tamanhos muito parecidos com o do próprio planeta anão que orbitam.

A maioria dos asteroides se encontra entre Marte e Júpiter em um anel quase plano

chamado Cinturão de Asteroides. A inclinação média das órbitas desses objetos com o plano da eclíptica é 15° (J.J. Lissauer, 2013). Comumente com períodos orbitais de 3,5 até seis anos, esses corpos orbitam o Sol no mesmo sentido que os planetas. Esses objetos possuem excentricidade média de 0,15, embora alguns como o 944 Hidalgo e 1862 Apolo possuam excentricidades elevadas em torno de 0,6 (Vicent J.Martínez & Galadí-Enríquez, 2005). Os inúmeros fragmentos de asteroides e outros pedaços pequenos de matéria sólida (diâmetros menores que algumas dezenas de metros) que povoam o espaço interplanetário são frequentemente denominados meteoroides.

Outro grupo de objetos menores são os centauros, objetos transientes que possuem diâmetros de até 300 quilômetros, orbitam o Sol entre Júpiter (5,2 Unidades Astronômicas) e Netuno (30,0 Unidades Astronômicas), e provavelmente chegaram a essa região devido a uma perturbação gravitacional no cinturão de Kuiper, uma zona espessa em forma de disco cuja concentração principal se estende de 35 a 50 Unidades Astronômicas (ua) do Sol, além da órbita de Netuno, mas incluindo uma porção da órbita de Plutão (J.J. Lissauer, 2013). Sendo constantemente perturbado pelos planetas gigantes, os centauros são dinamicamente instáveis com tempo de vida aproximado de milhões de anos antes da ejeção da região planetária ou colisão com um planeta (Barucci et al., 2002). Chariklo é o maior centauro confirmado, com 250 quilômetros de diâmetro é tão grande quanto um asteroide de tamanho médio do cinturão principal e é conhecido por ter um sistema de anéis (Braga-Ribas et al., 2014) (Morgado et al., 2021).

Além do cinturão de Kuiper, já citado acima, existe a Nuvem de Oort, uma nuvem esférica de planetesimais voláteis que cerca o sistema solar a uma distância de aproximadamente 50.000 ua, sendo esses os reservatórios e fontes distintas de cometas e centauros (J.J. Lissauer, 2013). Assim como os asteroides podem ser vistos como detritos rochosos remanescentes da formação dos planetas internos, os objetos do cinturão de Kuiper podem ser vistos como sobreviventes do processo de formação de Netuno e Urano. Os cometas são formados por materiais altamente voláteis congelados, e quando se aproximam do Sol, essa matéria sublima produzindo um efeito visual de cauda no objeto (J.J. Lissauer, 2013).

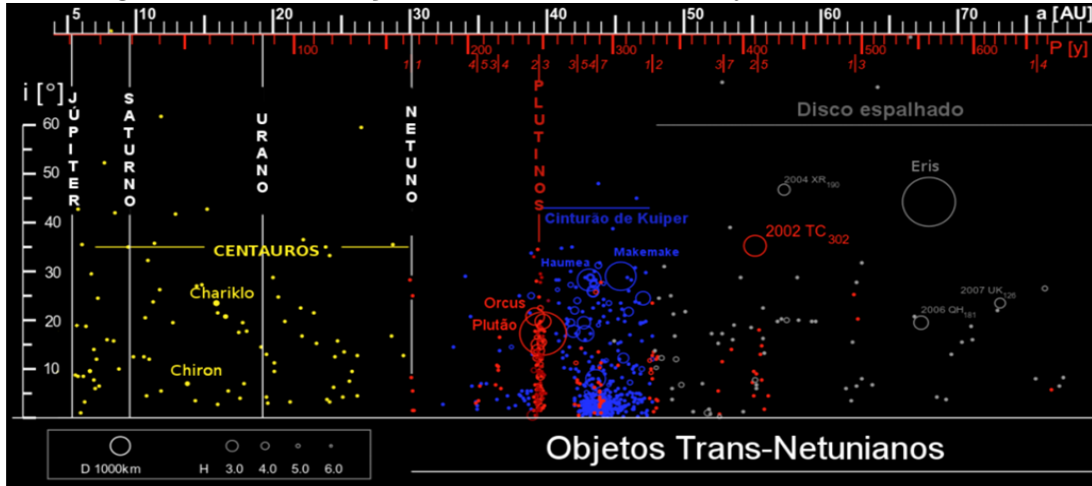
Com uma população distante, o cinturão de Kuiper inspirou e restringiu diversas ideias sobre a evolução inicial do nosso sistema planetário. O grande número de objetos em ressonâncias de movimento médio com Netuno levou à ideia de que o gigante de gelo migrou através do disco de planetesimais, varrendo uma área significativa em órbitas ressonantes estáveis (Malhotra, 1995). A superposição de órbitas dinamicamente quente (alta inclinação e excentricidade) e fria (baixa inclinação e quase circular) sugere que enquanto alguns objetos do Cinturão foram espalhados em suas órbitas atuais pelos planetas externos (Gomes, 2003), outros se formaram e permaneceram imperturbáveis (Batygin et al., 2011).

Qualquer corpo menor orbitando o Sol a uma distância média maior do que Netuno é chamado de objeto transnetuniano, do inglês transneptunian objects (TNO). Os transnetunianos possuem subgrupos (Johnston, 2022): *Plutinos*, objetos próximo da ressonância 2:3 com Netuno; *Objetos de Ressonância*, TNO's em ressonâncias com Netuno (exceto Plutinos e os Troianos de Netuno). Esses locais de ressonância variam de 1,16 a 4,33 vezes o semi-eixo maior da órbita de Netuno, ou de 34,9 a 130,1 ua; *Cubewanos* ou *Clássicos*, objetos com excentricidades abaixo de 0,15 e com semi-eixo maior entre 41,8 e 48,0 ua; *Membros da família Haumea*, um subgrupo de Cubewanos, TNO's que são provavelmente fragmentos do planeta anão Haumea. Estes são identificados com base em semelhanças tanto na órbita quanto na composição aparente; *Objetos de disco disperso (SDOs)*, TNO's com distâncias de afélio perto da órbita de Netuno e semieixos maiores que 50 ua; *Outros TNO's*, aqueles objetos que não se enquadram nos grupos acima.

Os maiores objetos transnetunianos conhecidos são Éris e Plutão, seguido por Makemake e Haumea. Devido a grande distância que se encontram, mais de 30 ua, e seus tamanhos, diâmetros inferiores a 2500 quilômetros, seus estudos através de observações diretas são difíceis (Banda-Huarca et al., 2019). Esses corpos distantes são sobreviventes do processo de formação planetária e devido a grande distância que estão do Sol, recebem pouca radiação solar, mantendo os TNO's fossilizados em temperaturas de 20 a 50 K (Banda-Huarca et al., 2019).

Na Figura 1.1 é apresentado a distribuição de alguns centauros e transnetunianos. Em amarelo estão os centauros, em azul os Cubewanos e clássicos, em vermelho os plutinos e os objetos ressonantes e em cinza os objetos do disco disperso. A escala lateral representa a inclinação dos objetos e a escala superior o semieixo. Entre as órbitas de Saturno e Urano está Chariklo, o maior centauro conhecido e, além de Netuno, está Plutão com outros transnetunianos. Com a escala no canto inferior podemos ter uma ideia da diferença de diâmetro dos objetos nas diferentes populações, onde temos diversos TNO's grandes e nenhum centauro maior que 250 km.

Figura 1.1: Distribuição dos centauros e dos objetos transnetunianos



Fonte: Wikipedia Commons (2021).

Com o *Dark Energy Survey* (DES) foram identificados mais de 150 TNO's nos três anos de funcionamento, um aumento significativo no número de objetos conhecidos (Banda-Huarca et al., 2019). O DES utiliza um telescópio de quatro metros com uma câmera acoplada para a detecção na faixa do infravermelho próximo, projetado para estudar galáxias e supernovas (Becker et al., 2018). Seu alcance de cobertura acabou sendo adequado para encontrar objetos transnetunianos.

Com a melhora na determinação da órbita desses objetos encontrados além de Netuno pelo DES, foram encontrados objetos com alta inclinação em relação aos planetas, algo curioso, já que são fósseis dos primórdios do Sistema Solar e remanescentes da formação planetária, esses corpos deveriam estar todos no mesmo plano, ou próximo ao plano preferencial dos planetas.

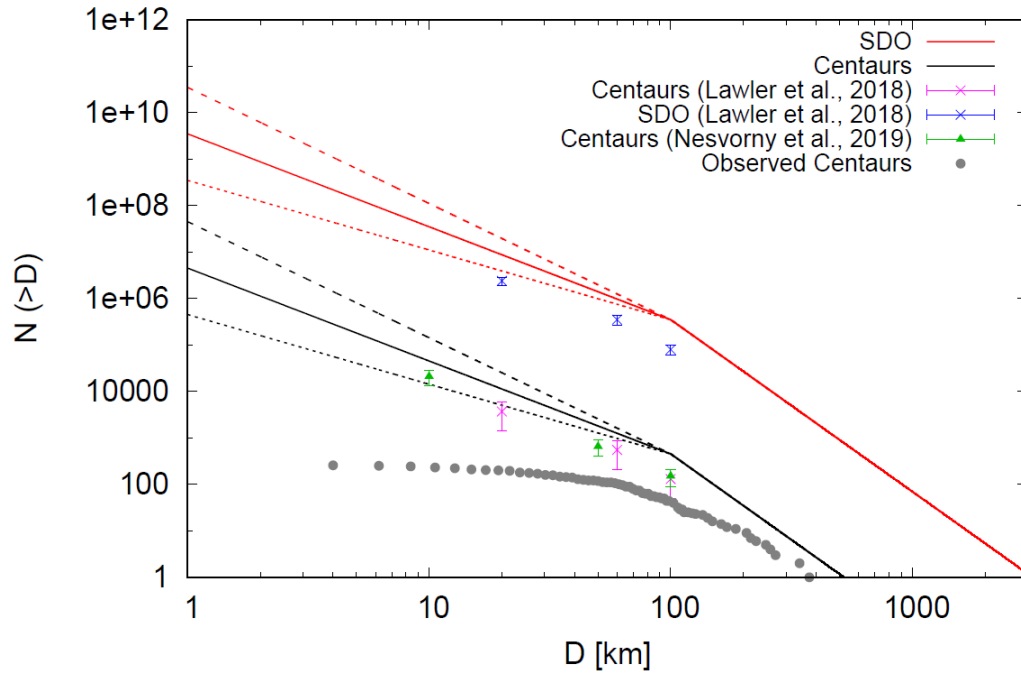
Um estudo feito por Saillenfest (2020) indicou possíveis origens para esses TNO's de alta inclinação: espalhamento planetário, dinâmica secular e ressonante causada pelos planetas gigantes, perturbações de marés galácticas, estrelas passando próximo e ainda investigou a dinâmica dominada por planetas e por galáxias próximas, dando indícios sobre a estrutura do Cinturão de Kuiper e a Nuvem de Oort.

Com o crescente número de TNO's e centauros sendo descobertos e catalogados, pode se notar uma diferença expressiva entre o tamanho dos objetos na região transnetuniana e na região dos centauros. A órbita atual de qualquer centauro em particular é um guia fraco para seu passado dinâmico por conta da dispersão dos planetas gigantes gasosos. Como dito anteriormente, o maior centauro conhecido é Chariklo com 250 quilômetros de diâmetro, enquanto que na região transnetuniana, há diversos objetos com diâmetros superiores ao de Chariklo. Considerando que os objetos transnetunianos são uma das fontes dos centauros

(J.J. Lissauer, 2013), seria razoável encontrar centauros com diâmetros maiores que 250 quilômetros.

No trabalho realizado por Sisto & Rossignoli (2020) é obtido uma distribuição de número e tamanho de objetos do disco disperso e centauros a partir de simulações numéricas. A Figura 1.2 apresenta os resultados obtidos e compara com trabalhos/estimativas anteriores. Podemos verificar a estimativa de mais de dez centauros e mais de dez mil TNO's com diâmetro superior a 300 km. O gráfico também apresenta os centauros conhecidos na literatura, onde a estimativa feita por Sisto & Rossignoli (2020) é relativamente próxima para os maiores objetos. Há uma grande diferença nos objetos menores devido a dificuldade observacional.

Figura 1.2: Número acumulativo de objetos do disco disperso (SDO) e centauros



Fonte: Extraído de (Sisto & Rossignoli, 2020).

Sabendo que a evolução dinâmica destes corpos envolve encontros próximos com os planetas gigantes, desenvolvemos uma ferramenta completa utilizando o software `REBOUND` com o integrador `IAS15`, para investigar a dinâmica orbital de TNO's classificados como *Outros TNOs* com diâmetros superiores a 300 quilômetros.

O código pode verificar de forma otimizada se esses transnetunianos são barrados por Netuno de atravessar para a zona dos centauros ou se esses corpos não sobrevivem muito tempo na região, devido à instabilidade gerada pelos gigantes gasosos espalhando os objetos e até mesmo com colisões.

Os seguintes capítulos contam com nosso Método (Capítulo 2), onde abordamos detalhes

sobre o código implementado no REBOUND. Resultados preliminares (Capítulo 3), com o objetivo de expor os resultados das simulações e casos interessantes junto com discussões relacionadas. E por fim, as Considerações finais (Capítulo 4), retomando pontos importantes dos resultados obtidos e os estudos futuros.

Capítulo 2

MÉTODOS

Para analisar a evolução orbital dos objetos faremos uso de um integrador numérico que resolve o problema gravitacional de n-corpos. Utilizando métodos numéricos especializados na dinâmica gravitacional para integrar o movimento de objetos sob a influência gravitacional, podemos configurar essas partículas como estrelas, planetas, satélites, corpos menores e até mesmo partículas de poeira. As simulações foram realizadas a partir das órbitas atuais considerando as perturbações dos planetas.

Optamos pelo software REBOUND (Rein & Liu, 2012) para realizar as integrações numéricas juntamente com o integrador IAS15 de 15^a ordem, que possui um controle de passo adaptativo baseado em uma quadratura de Gauss-Radau (Rein & Spiegel, 2014). O código foi escrito em linguagem C de forma modular para facilitar adaptações e alteração das condições iniciais.

Cada sistema integrado consiste do Sol, dos quatro planetas gigantes e de 100 clones de cada objeto das tabelas A.1 e A.2 por 500 milhões de anos. A tabela 2.1 possui os dez primeiros objetos em ordem crescente no diâmetro que foram simulados para exemplificar. Todos os objetos transnetunianos com seus respectivos elementos orbitais e as incertezas se encontram no apêndice. O Sol e os planetas são perturbadores gravitacionais interagindo entre si e com as partículas de teste, essas, por sua vez, não interagem entre si. Os elementos orbitais nominais dos TNO's e dos planetas são correspondentes à época 19/06/2021 e foram obtidos no sistema HORIZONS (National aeronautics and space administration (NASA), 2022), enquanto o erro nas órbitas foram extraídos do *Jet Propulsion Laboratory* (Jet propulsion laboratory (JPL), 2021). Os clones foram gerados utilizando o valor nominal dos elementos orbitais e distribuídos de modo aleatório uniforme dentro do erro de cada elemento proveniente das incertezas observacionais.

Tabela 2.1: Lista dos dez primeiros objetos transnetunianos com diâmetro maior que 300 km classificados como *Outros TNO's*

Nome	Diâmetro (km)	Semieixo maior (ua)	Excentricidade	Inclinação (°)
2015 DZ250	301	42,512306720	0,143401231	21,956163710
2010 VR11	301	41,343019390	0,141357256	30,969177110
2010 WN75	301	40,686703480	0,092337772	28,204940800
2014 WJ509	303	42,711516940	0,138188568	20,964699560
2003 YO179	308	44,388370030	0,132024685	19,404536560
1999 CD158	310	43,432685280	0,146734289	25,550022230
2013 MA12	311	41,816264180	0,064103580	23,327477860
2015 BE519	314	47,473428740	0,064063843	24,815009390
2015 BX518	314	42,602519010	0,173971619	28,218226890
2014 GW53	314	41,274431630	0,085941164	21,919618370

Fonte: (National aeronautics and space administration (NASA), 2022).

Os setenta e sete objetos transnetunianos da tabela A.1 foram selecionados no site¹ (Johnston, 2022) para um estudo exploratório de suas evoluções orbitais. Buscando por objetos classificados como *Outros TNO's*, para excluir os objetos ressonantes ou próximos de ressonâncias, escolhemos todos os objetos com diâmetro maior que 300 km para explorar a dinâmica orbital e analisar se esses objetos entram na região dos centauros.

Definimos como ejeção do sistema objetos que ultrapassaram a distância de 200 ua do Sol, devido à baixa probabilidade de sobrevivência ou entrada na região dos centauros. Utilizamos como critério de encontro entre clones e os planetas 1 Raio de Hill, que é usado para limitar a Esfera de Hill, que se aproxima da esfera gravitacional de influência de um corpo menor (corpo secundário) em face de perturbações de um corpo mais massivo (corpo principal).

Os encontros próximos foram armazenados para identificarmos a influência dos planetas sobre os objetos simulados. Com os dados dos encontros é possível a verificação da dinâmica dos encontros, se os clones são empurrados para região interior ou exterior do sistema solar a cada encontro. É possível filtrar se houve colisões, apesar de serem pouco prováveis. Como comparação, Araujo et al. (2016) simularam 729 clones do centauro Chariklo e a estatística das colisões é de apenas 0,5% dos clones.

Com todos os objetos simulados analisamos a evolução dos elementos orbitais de todos os clones e também a média móvel para analisar o comportamento geral. A partir dos gráficos conseguimos filtrar os objetos de maior interesse nesse estudo, clones que entravam na região dos centauros e com altas variações nos elementos orbitais. Produzimos algumas estatísticas sobre os objetos sobreviventes dentro de 200 ua e em relação aos encontros próximos dos clones e os planetas.

¹<https://www.johnstonsarchive.net>

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o código e as condições iniciais mencionadas anteriormente. A análise da evolução orbital foi direcionada para os objetos que entram na região dos centauros por algum tempo. Serão apresentadas as estatísticas dos encontros entre clones e os planetas, e os objetos que foram ejetados do sistema.

Capítulo 3

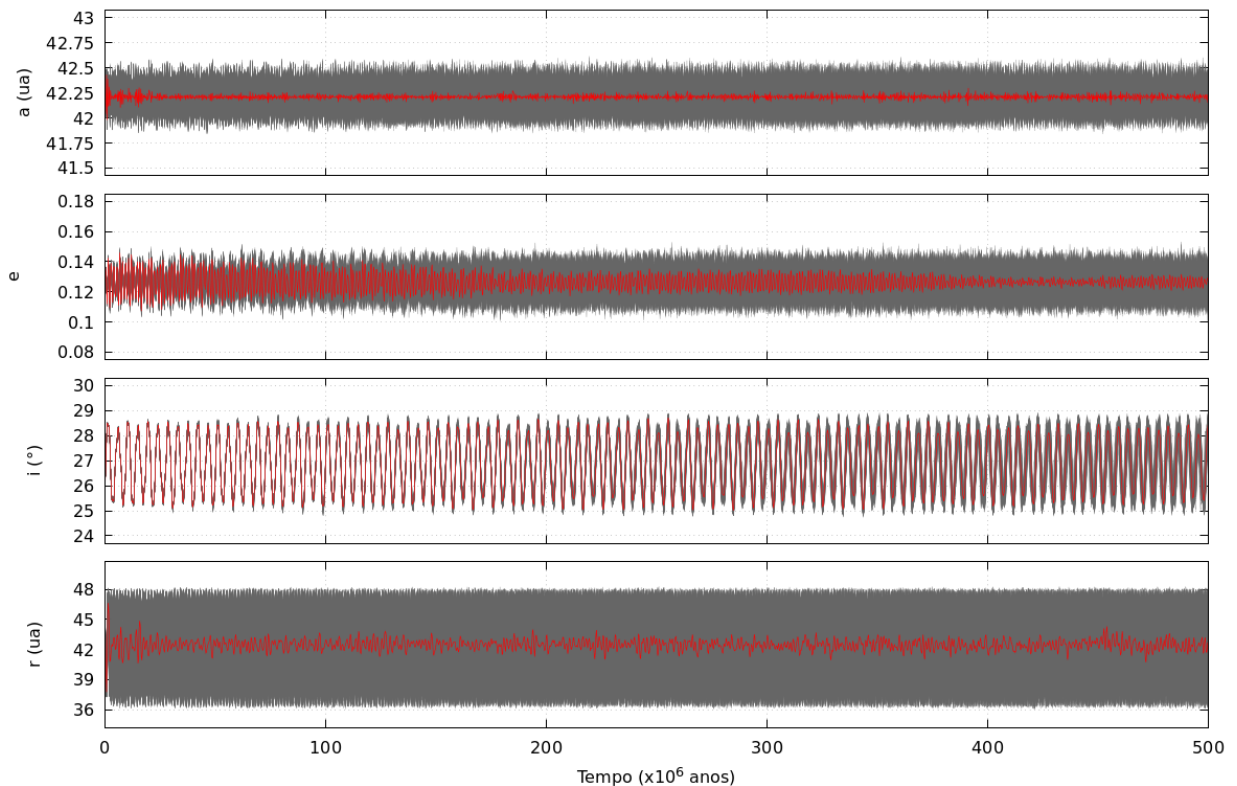
RESULTADOS

Foram simulados setenta e sete objetos transnetunianos diferentes, totalizando 7700 clones. Cada simulação contou com 100 clones com os elementos orbitais variando de acordo com a incerteza nas medidas, o Sol e os quatro gigantes gasosos por 500 milhões de anos. A lista completa com todos os objetos transnetunianos analisados se encontra no apêndice.

De todos os objetos simulados, 57 (74%) são bem comportados, mantendo o semieixo maior, excentricidade, inclinação e distância ao Sol com baixas variações do valor inicial no tempo total de integração. Na Figura 3.1 apresentamos a evolução temporal do semieixo maior, excentricidade, inclinação e distância radial do objeto 2010 OO127, com 471 km de diâmetro, que é um exemplo dos objetos com pouca variação nos elementos orbitais. A inclinação desse objeto varia entre 25 e 29°, mas podemos observar que todos os clones variam na mesma proporção. O semieixo maior fica praticamente constante comparado com outros objetos simulados, variando apenas em uma faixa de 0,50 ua. Para o semieixo maior, excentricidade e distância ao Sol, podemos verificar que a média móvel sofre uma variação maior nos primeiros 50 milhões de anos.

A média móvel é determinada com o cálculo da média simples do elemento orbital dos objetos sobreviventes em dado instante, e varia no tempo de acordo com a variação dos elementos orbitais osciladores e o número de objetos sobreviventes na simulação. Médias móveis são normalmente usadas em conjuntos em série de dados ao longo do tempo para suavizar flutuações curtas e destacar tendências de longo prazo.

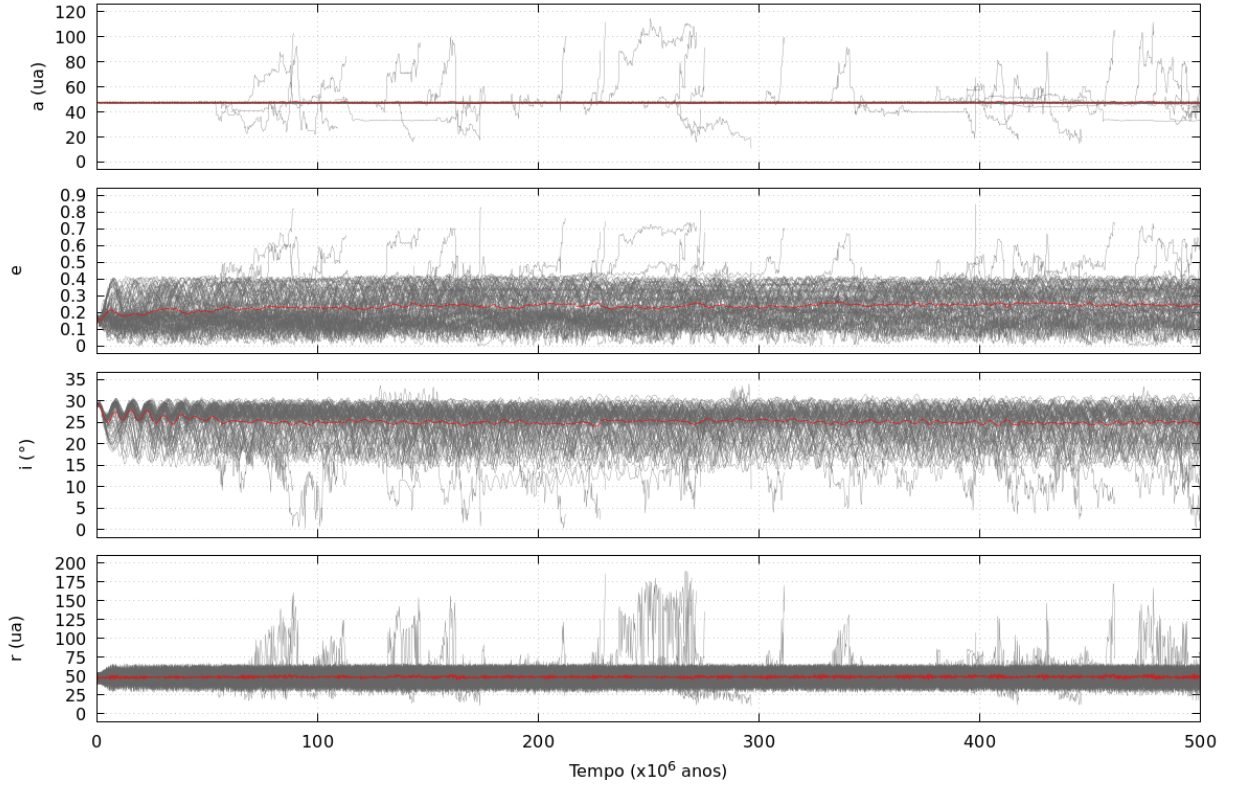
Figura 3.1: Evolução orbital dos clones do 2010 OO127 (cinza) e a média móvel (vermelho)



O encontro próximo entre os clones e os planetas foi definido com a distância de 1 Raio de Hill. Os 20 objetos que possuem certa instabilidade na órbita acabam passando próximo de Netuno e são perturbados, consequentemente esses corpos acabam por entrar na região dos Centauros ou são jogados em direção contrária, sentido aos confins do Sistema Solar.

Na Figura 3.2 podemos ver a evolução no tempo do objeto 2014 XY40, com 401 km de diâmetro e o maior semieixo maior dentre os objetos simulados, que é um exemplo dos objetos com certa instabilidade na órbita. A excentricidade da maioria dos clones oscila de 0,0 a 0,4, poucos passam de 0,4 e ultrapassam a 0,8. Devido a alta excentricidade, alguns clones possuem órbitas bem alongadas, chegando a regiões mais internas do Sistema Solar. A média móvel do semieixo maior se mantém em 48 ua, mas alguns clones atingem 100 ua e outros entram na região dos centauros a 20 ua.

Figura 3.2: Evolução orbital dos clones do 2014 XY40 (cinza) e a média móvel (vermelho)



Esse capítulo foi separado em dois, seção 3.1 com amostras e estatísticas gerais da população dos objetos simulados, e a seção 3.2, com análises individuais de objetos de destaque, como o objeto com mais encontro, objeto com maior diâmetro e maior número de ejeções.

3.1 ANÁLISE DA POPULAÇÃO

Considerando todos os 7700 clones, apenas 9% (694) deles encontram os planetas ao longo da simulação. Esses 694 clones de 20 objetos transnetunianos diferentes possuem 214071 encontros próximos com os planetas, sendo 70% deles com Netuno. A tabela 3.1 contém todos os dados de encontros próximos e a porcentagem relativa ao total por planeta. As estatísticas de encontros são coerentes com as posições iniciais dos objetos e a evolução orbital de entrada na região dos Centauros. Esse resultado era esperado, pois os objetos são transnetunianos e somente aqueles espalhados para dentro do sistema solar por Netuno vão ter encontros com os planetas.

No trabalho realizado por Sisto & Rossignoli (2020) foram contabilizados os encontros próximos dentro de 1 raio de Hill com os planetas. Das 5770 partículas iniciais simuladas com

um integrador híbrido, 73,4% se encontram com Netuno, 17,8% em Urano, 3,8% em Saturno e 0,1% em Júpiter. Nosso resultado de porcentagem relativa de encontros é compatível com os encontros com Netuno, Urano e Saturno.

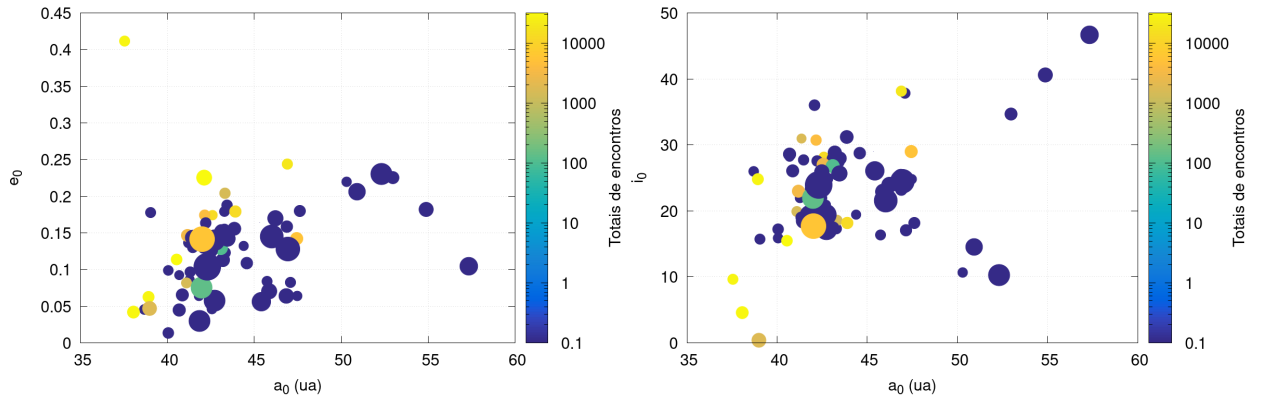
Tabela 3.1: Total de encontros de todos os 694 clones com os planetas

Planetas	n° de encontros	Porcentagem Relativa ao Total
Netuno	151217	70,64%
Urano	41422	19,35%
Saturno	11887	5,55%
Júpiter	9545	4,46%

Na figura 3.3, o gráfico de dispersão dos objetos simulados, temos todos os 77 TNO's simulados onde temos excentricidade inicial em função do semieixo maior inicial no primeiro gráfico, já no segundo temos a inclinação orbital inicial em função do semieixo maior inicial. O tamanho do ponto leva em consideração o diâmetro de cada objeto e as cores dos pontos representam a quantidade de encontros próximos de acordo com a escala de cores lateral.

Podemos visualizar que objetos simulados com semieixo maior superior a 50 ua não obtiveram encontros próximos com os planetas. A excentricidade e a inclinação não possui distinção, em toda região simulada há encontros, assim como em relação ao diâmetro dos objetos. O objeto com excentricidade de 0,41, inclinação de 9,60° e semieixo maior de 37,56 ua é o 2015 AH281, um dos objetos com mais encontros próximos e o objeto com mais clones ejetados.

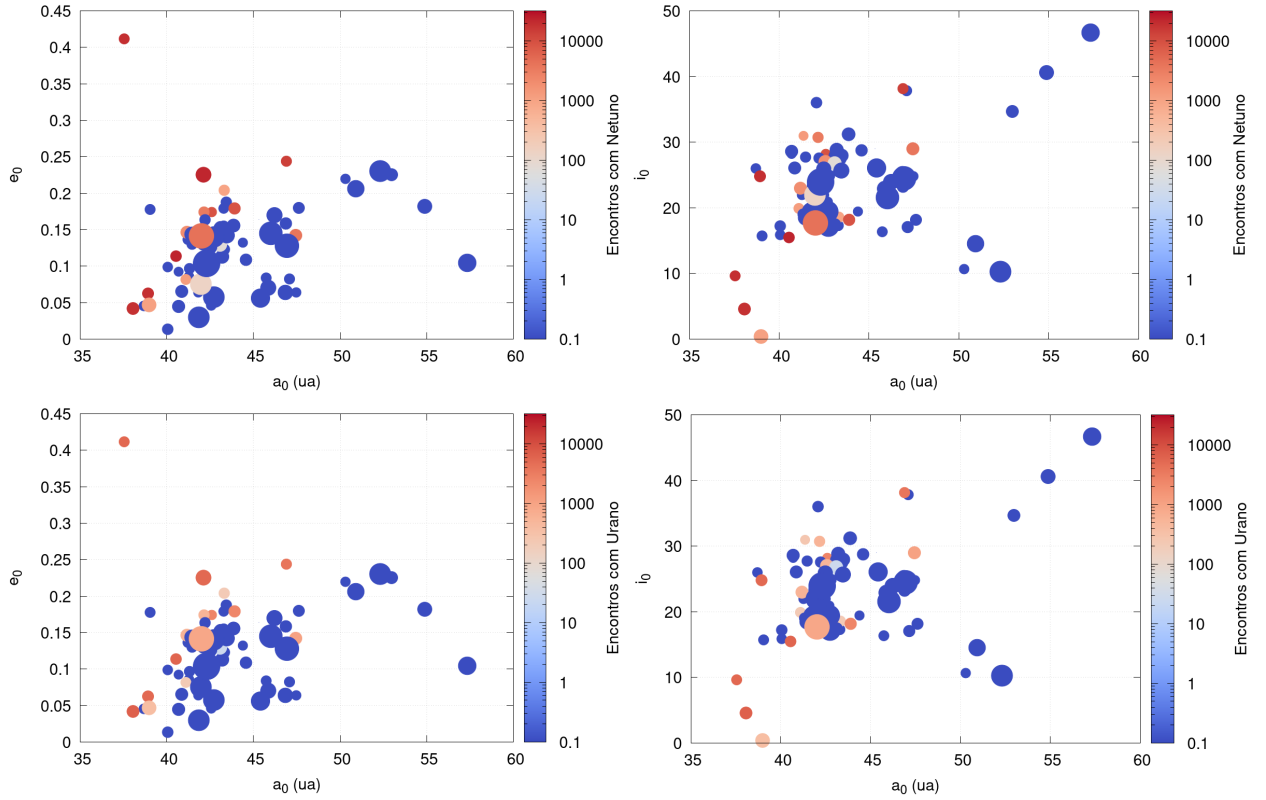
Figura 3.3: Número de encontros totais de cada objeto em função do semieixo maior e excentricidade inicial (esquerda) e semieixo maior e inclinação inicial (direita). O tamanho do ponto é proporcional ao tamanho do objeto e a escala de cores indica o número de encontros



O conjunto de gráficos de dispersão na Figura 3.4 e na Figura 3.5 mostram todos os objetos simulados. O tamanho do ponto está relacionado ao diâmetro do objeto e a escala

de cores a quantidade de encontro próximo dentro de 1 raio de Hill com cada planeta. O lado esquerdo do conjunto da Figura 3.4 relaciona a excentricidade inicial e o semieixo maior inicial dos objetos, o lado direito relaciona a inclinação inicial e o semieixo maior inicial. Os dois gráficos acima na Figura 3.4 se referem aos encontros com Netuno e os dois gráficos abaixo se referem aos encontros com Urano. Objetos com semieixo maior superior a 50 ua, indiferente o valor da excentricidade ou inclinação, não sofrem encontros próximos.

Figura 3.4: Número de encontros de cada objeto por planeta em função do semieixo maior e excentricidade inicial (esquerda) e semieixo maior e inclinação inicial (direita). O tamanho do ponto é proporcional ao tamanho do objeto e a escala de cores indica o número de encontros por planeta - I

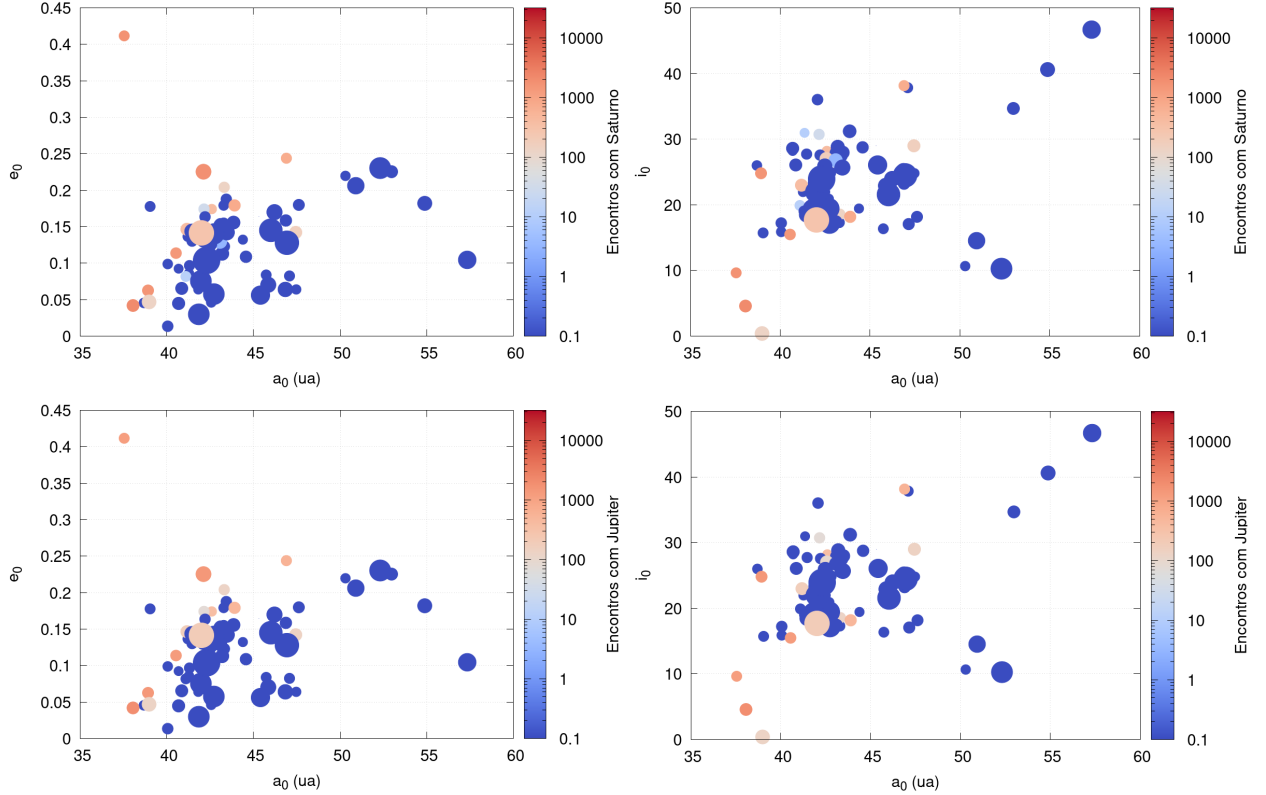


O lado esquerdo do conjunto da Figura 3.5 relaciona a excentricidade inicial e o semieixo maior inicial dos objetos, o lado direito relaciona a inclinação inicial e o semieixo maior inicial. Os dois gráficos acima na Figura 3.5 se referem aos encontros com Saturno e os dois gráficos abaixo se referem aos encontros com Júpiter. O semieixo maior superior a 50 ua continua sendo um local seguro para as partículas independente da inclinação orbital.

As três partículas com inclinação inferior a 10° (1998 SN165, 2002 KX14 e 2015 AH281) possuem diversos encontros próximos com os quatro planetas, devido a proximidade ao plano orbital dos gigantes. Em ambos os gráficos de dispersão que relacionam os encontros próximos

com os planetas e os elementos orbitais iniciais podemos verificar que número de encontros individuais dos objetos é maior com Netuno, o que é coerente devido a localização inicial das partículas. Podemos verificar que mesmo objetos com excentricidade altas, estão seguros com o semieixo maior superior a 50 ua. Geralmente os corpos que possuem mais encontros próximos com cada planeta são os mesmos.

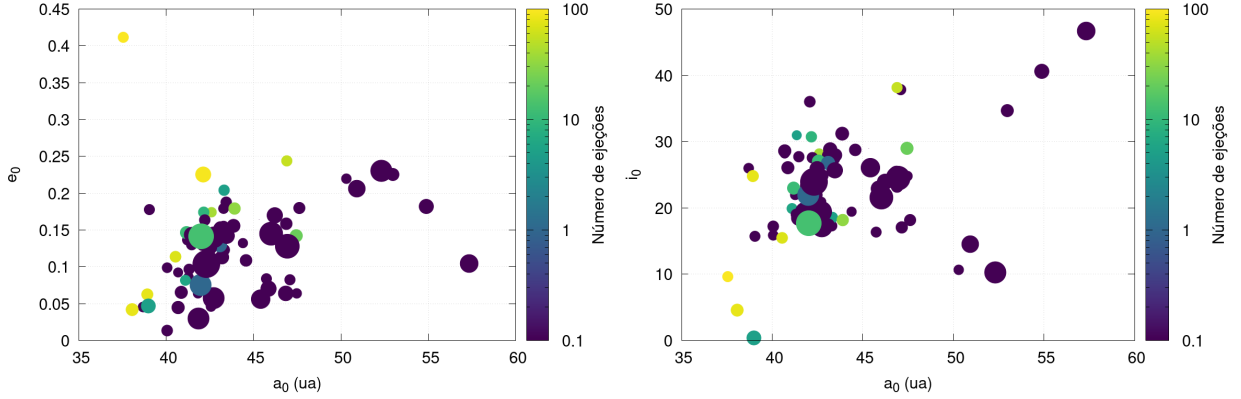
Figura 3.5: Número de encontros de cada objeto por planeta em função do semieixo maior e excentricidade inicial (esquerda) e semieixo maior e inclinação inicial (direita). O tamanho do ponto é proporcional ao tamanho do objeto e a escala de cores indica o número de encontros por planeta - II



Os objetos que são espalhados por Netuno e jogados em direção aos confins do Sistema Solar totalizam em 20 TNO's entre os setenta e sete analisados. Consideramos como critério de ejeção a distância de 200 ua do Sol, uma vez que atingindo essa distância as possibilidades de sobrevivência e de retorno a região transnetuniana são baixas. Nosso estudo exploratório está interessado nos objetos que entram na região dos centauros. Mais da metade dos objetos transnetunianos simulados não entram em regiões internas do Sistema Solar, por outro lado, dos 20 objetos que adentram, 16 deles chegam até Júpiter.

Ao total foram 632 clones (8,2%) considerados como ejetados do sistema. Não houve um momento específico da integração com preferência, as ejeções ocorrem ao longo de todo tempo simulado. O objeto 2015 AH281 foi o mais ejetado, de 100 clones 96 deles ultrapassaram a distância de 200 ua do Sol, seguido por 2013 XC26 com 92 ejeções.

Figura 3.6: Número de ejeções de cada objeto em função do semieixo maior e excentricidade inicial (esquerda) e semieixo maior e inclinação inicial (direita). O tamanho do ponto é proporcional ao tamanho do objeto e a escala de cores indica o número de ejeções



A Figura 3.6 mostra dois gráficos de dispersão, relacionando o semieixo maior com excentricidade e inclinação orbital. O tamanho dos pontos leva em conta o diâmetro dos objetos e a escala de cores lateral representa o número de objetos ejetados. Independente da inclinação ou da excentricidade, os objetos com semieixo maior superior a 50 ua não possui clones ejetados do sistema. Os objetos mais ejetados estão ligados diretamente aos objetos que possuem mais encontros próximos. Existe uma certa tendência no tamanho, onde os objetos com diâmetros menores sofrem mais ejeções e encontros próximo do que os objetos maiores.

Os clones dos 20 objetos transnetunianos que são perturbados por Netuno tomam rotas diferentes, uma parte dos clones são ejetados e outros entram na região dos centauros. A tabela 3.2 contém os objetos que possuem encontros próximos com os planetas junto com os seus diâmetros. Assim como no caso anterior, não há um momento preferencial na simulação onde esses clones entram nas proximidades dos gigantes gasosos. O clone do TNO 2014 XY40 sobrevive por aproximadamente 80 milhões de anos na região dos centauros antes de voltar para região transnetuniana e depois ser ejetado.

Tabela 3.2: Objetos transnetunianos que entram na região dos centauros por algum momento

Nome	diâmetro (km)	Semieixo maior (ua)	Excentricidade	Inclinação (°)
2010 VR11	301	41,34	0,14	30,96
2015 BX518	314	42,60	0,17	28,21
2010 RN64	331	41,09	0,08	19,87
2015 AH281	334	37,56	0,41	09,60
2004 XA192	339	46,90	0,24	38,18
2010 MQ116	345	42,14	0,17	30,73
2014 FY71	346	43,30	0,20	18,54
2010 JK124	354	40,53	0,11	15,47
2004 TY364	365	38,91	0,06	24,83
2014 WH509	376	43,90	0,17	18,17
2015 AN281	380	41,73	0,14	17,47
1998 SN165	393	38,05	0,04	04,59
2011 OA60	399	41,17	0,14	23,00
2014 XY40	401	47,44	0,14	29,01
2014 BZ57	418	42,55	0,13	27,04
2015 AJ281	436	43,07	0,12	26,81
2002 KX14	455	38,98	0,04	00,39
2013 XC26	489	42,10	0,22	18,64
2004 GV9	680	41,97	0,07	21,96
2002 MS4	800	42,01	0,14	17,69

Mapeando os encontros próximos, verificamos que 30,15% dos objetos são ejetados com menos de 500 anos após o último encontro. Para ejeções rápidas após o encontro, em menos de 500 anos, o encontro precisa ser bastante intenso. Do total de 632 clones ejetados, 55,87% dos objetos tem o seu último encontro próximo com Netuno e 19,20% dos objetos tem o seu último encontro com Saturno. O planeta responsável pelas ejeções mais rápidas após o encontro próximo é Júpiter.

3.2 ANÁLISES INDIVIDUAIS

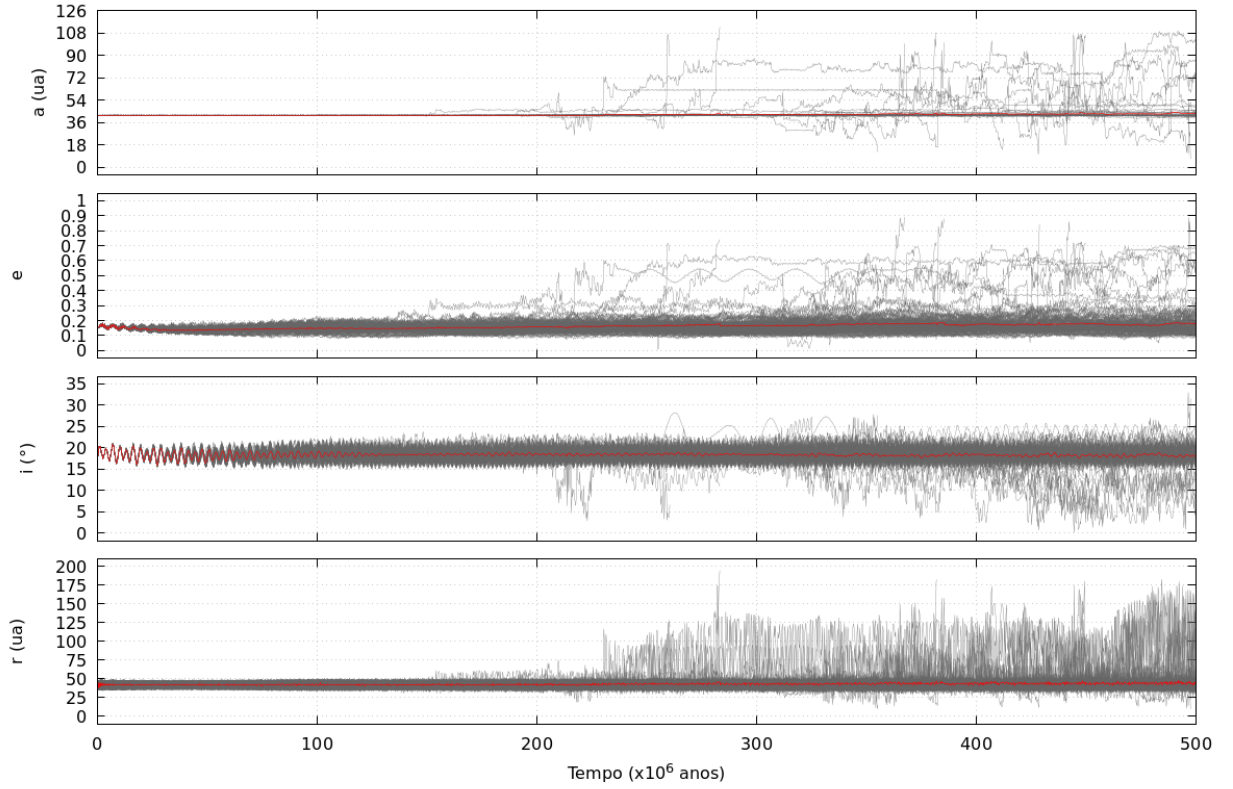
Separamos dentre os 20 objetos que tiveram encontros próximos com os planetas e ejeções alguns casos interessantes para analisar e detalhar a evolução orbital. Optamos pelo maior objeto (2002 MS4), o que tem a maior excentricidade e possui o maior número de ejeções (2015 AH281), o que possui mais encontros com os planetas (1998 SN165), o que mais se aproxima do Sol (2013 XC26) e o que recentemente foi descoberto possuir um anel (2002 LM60).

2002 MS4

O maior objeto transnetuniano que possui encontros próximos com os planetas e tem clones ejetados do sistema é o 2002 MS4 com 800 km de diâmetro. Dos 100 clones iniciais da simulação, 13 ultrapassam a distância de 200 ua do Sol. Com semieixo maior inicial de 42,01 ua e inclinação inicial de 17,69, conseguimos observar a evolução orbital dos clones na Figura 3.7. A média móvel possui baixa variação no tempo, mas há clones que entram na região dos centauros e clones que sobrevivem com semieixo superior ao inicial por um intervalo de tempo.

A inclinação orbital dos clones do TNO 2002 MS4 se mantém entre 15° e 25° por 200 milhões de anos. O semieixo maior acompanha a média móvel nos primeiros 150 milhões de anos e a excentricidade vai aumentando a amplitude e se espalhando aos poucos. Observando o gráfico há possibilidades de alguns clones estarem capturados em ressonâncias devido ao comportamento do semieixo maior. Uma breve pesquisa sobre, já que não é o assunto principal desse trabalho, mostrou que existe uma ressonância 1:3 com Netuno próxima de 62,5 ua com período de 495 anos.

Figura 3.7: Evolução orbital dos clones do 2002 MS4 (cinza) e a média móvel (vermelho)

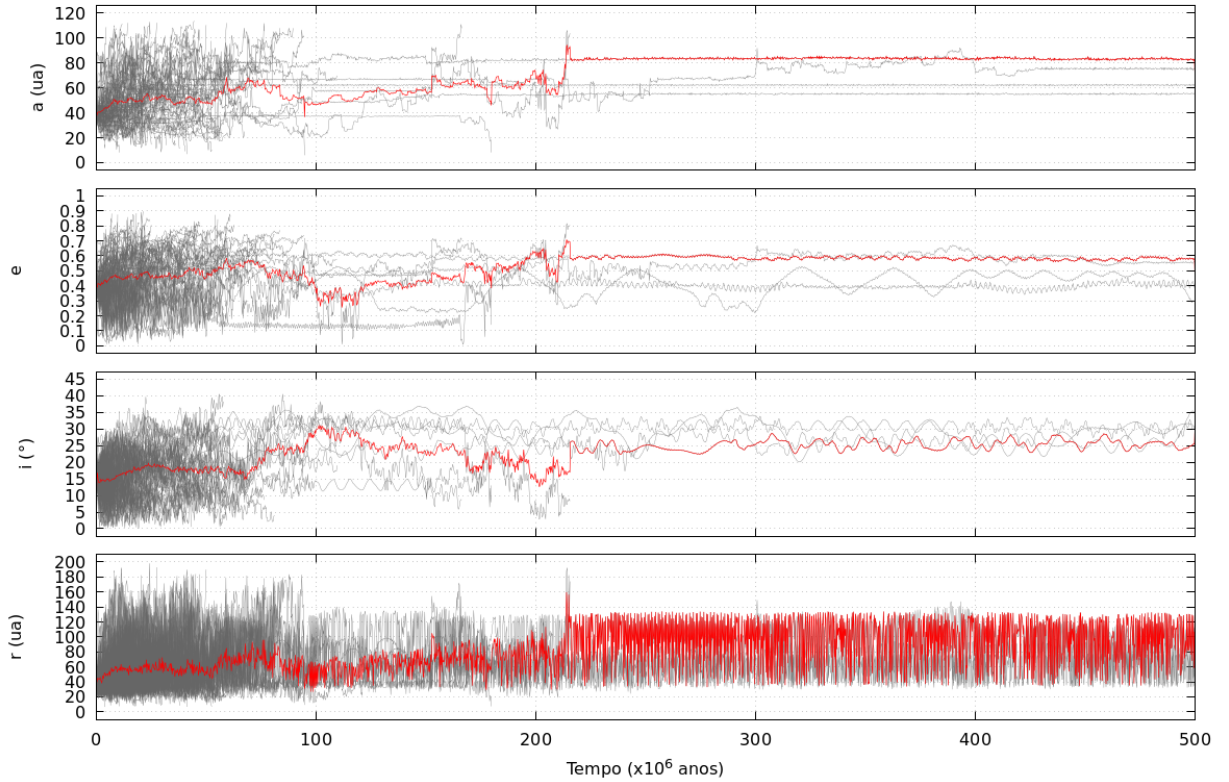


2015 AH281

A maior taxa de ejeções dos clones foi de 96 ejeções e foram dos clones do objeto 2015 AH281. Grande parte das ejeções ocorrem no início da simulação, antes dos 100 milhões de anos. O semieixo maior do 2015 AH281 é de 37,56 ua, 9,6° de inclinação orbital e possui 0,41 de excentricidade, sendo maior valor entre os objetos que detêm encontros e ejeções. A Figura 3.8 mostra a evolução orbital dos clones do 2015 AH281, onde verificamos que diversos clones entram na região dos centauros.

Devido a alta excentricidade inicial, os objetos já atingem grandes valores de distância ao Sol logo no início da simulação. Os poucos objetos que sobrevivem do 2015 AH281, analisando o semieixo maior, provavelmente estão confinados em ressonâncias. Com 27358 encontros próximos com os planetas gigantes, alguns clones ultrapassam 0,8 de excentricidade e 35° de inclinação orbital. A média móvel na Figura 3.8, devido a poucos clones sobreviventes, não traz informações interessantes após 200 milhões de anos de simulação.

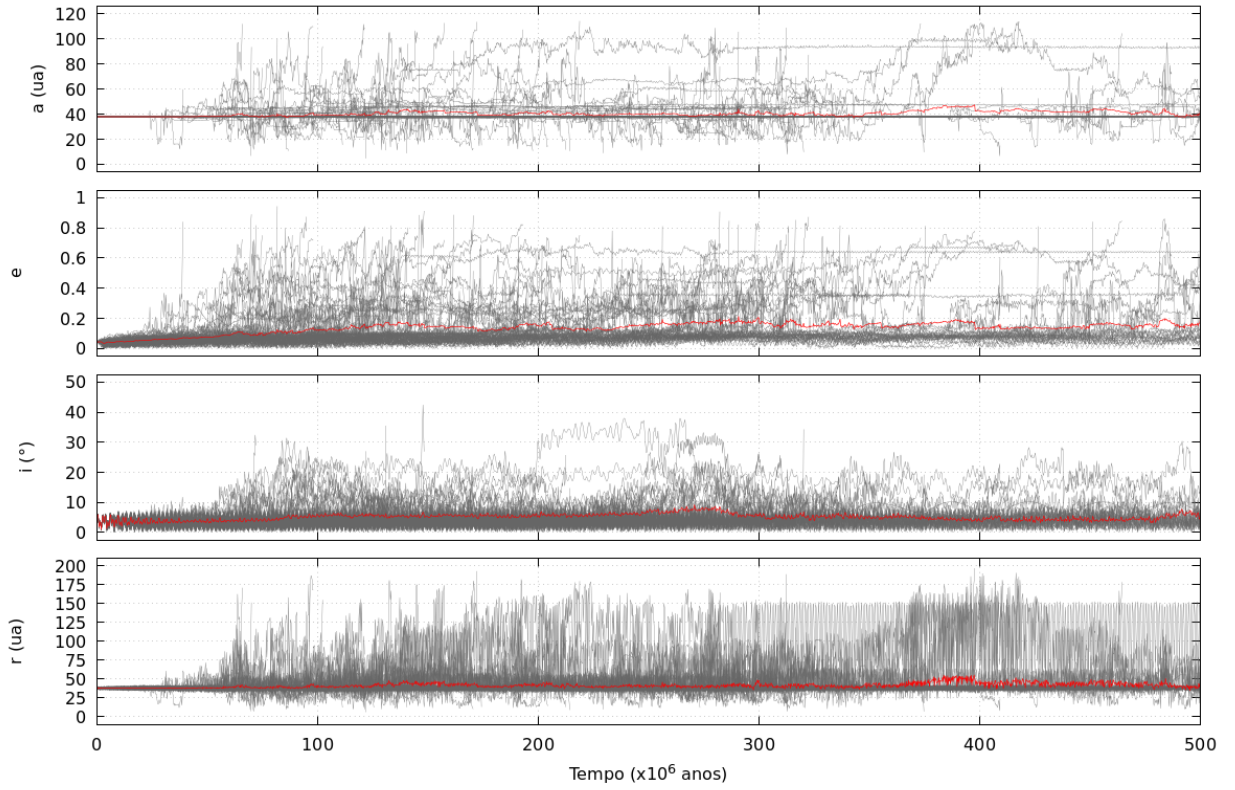
Figura 3.8: Evolução orbital dos clones do 2015 AH281 (cinza) e a média móvel (vermelho)



1998 SN165

A evolução orbital dos clones do objeto 1998 SN165 e a média móvel são apresentadas na Figura 3.9. Podemos verificar que um dos clones fica estável com o semieixo maior em 90 ua e excentricidade igual a 0,6 por aproximadamente 200 milhões de anos. Há clones que quase chegam a 40° de inclinação e a 1,0 de excentricidade, mas a média móvel por todo o tempo de simulação é relativamente comportada. Dos 100 clones simulados do objeto 1998 SN165, 79 foram ejetados em 500 milhões de anos.

Figura 3.9: Evolução orbital dos clones do 1998 SN165 (cinza) e a média móvel (vermelho)



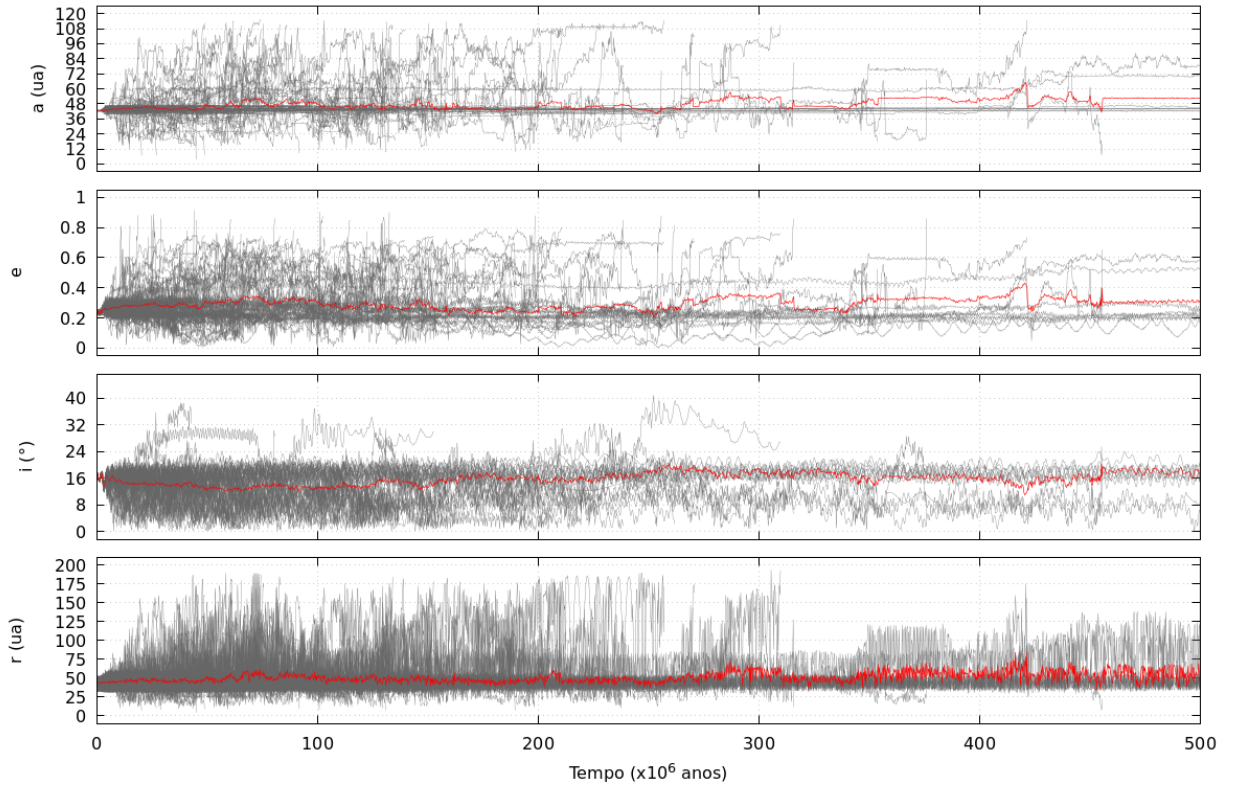
Os clones que mais possuem encontros próximos com Urano, Saturno e Júpiter são do 1998 SN165. Foram 6633 encontros com Urano, 2120 encontros com Saturno e 1901 encontros com Júpiter. Mesmo com grande número de encontros individuais com esses planetas, não é o objeto com mais encontros totais na simulação. O objeto com mais encontros próximos com Netuno e encontro totais é o 2010 JK124 com 354 km de diâmetro, são 31111 encontros totais e 22848 encontros com Netuno. Todos esses encontros dos clones do 2010 JK124 resultam em 69 ejeções do sistema.

2013 XC26

Na Figura 3.10 temos a evolução orbital do objeto 2013 XC26 e a média móvel. Dos 100 clones simulados do objeto 2013 XC26, 92 foram ejetados em 500 milhões de anos. A grande maioria dos clones mantém a inclinação entre 0 e 22 graus, poucos atingem 30 graus. O primeiro clone passa por Netuno após 10 milhões de anos após o início da simulação, e chega até a 20 ua antes de começar a se afastar do Sol.

Dois clones, um do objeto 2013XC26 e outro do 2014WH509, são ejetados do sistema sem nenhum encontro próximo dentro de 1 Raio de Hill. O clone do 2014WH509 sobrevive por 458 milhões de anos antes de atingir 200 ua e o clone do 2013XC26 sobrevive por 75 milhões de anos. Ambos objetos não entram na região dos centauros. Provavelmente encontram Netuno com a distância superior a de 1 raio de Hill, mas próxima o suficiente para perturbar a órbita levando a ejeção do sistema.

Figura 3.10: Evolução orbital dos clones do 2013 XC26 (cinza) e a média móvel (vermelho)



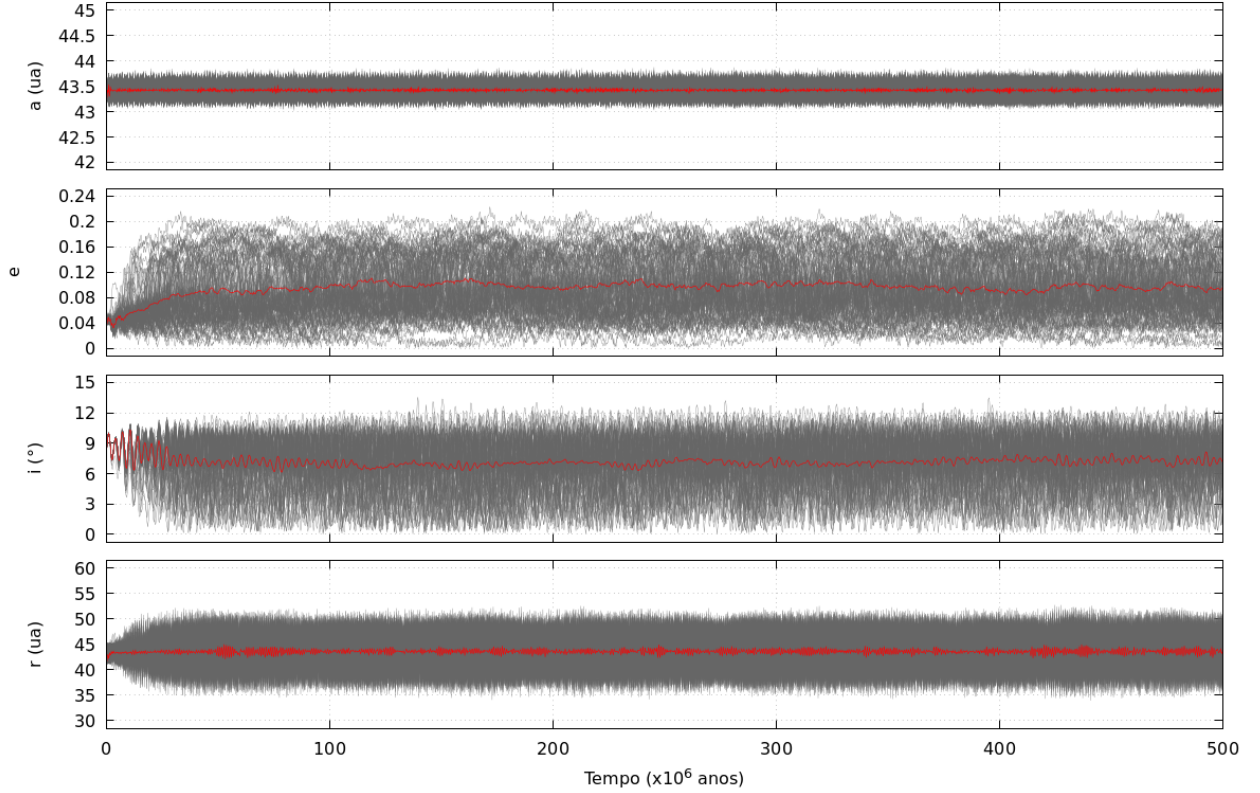
Um clone do objeto 2013 XC26 chega a aproximadamente 4 ua do Sol, sendo o que mais se aproxima dos planetas internos. O ponto de menor distância ao Sol acontece em 45 milhões de anos. Logo no início da simulação, 11 milhões de anos, já se detectam múltiplos encontros

com Netuno. Após 44 milhões de anos o clone se encontra alguns vezes com Urano e Saturno até chegar em Júpiter. Ao final, esse clone apresenta 233 encontros totais com os planetas, sendo 61 (26,18%) com Netuno, 13 (5,58%) com Urano, 38 (16,30%) com Saturno e 121 (51,93%) encontros com Júpiter. As estatísticas de encontro próximo desse clone diferem das estatísticas globais dos clones, onde há mais encontros com Netuno, depois Urano, Saturno e por fim, Júpiter com menos encontros.

2002 LM60

Além dos 77 TNO's classificados como *Outros TNO's*, simulados o objeto 2002 LM60 conhecido como Quaoar, catalogado como *Cubewano* ou *Clássico*. Recentemente foi descoberto um anel denso ao redor do Quaoar fora do limite de Roche (Morgado et al., 2023), algo peculiar e não esperado pelas teorias aceitas atualmente. A Figura 3.11 mostra a evolução orbital do 2002 LM60 por 500 milhões de anos.

Figura 3.11: Evolução orbital dos clones do 2002 LM60 (cinza) e a média móvel (vermelho)



Analisando o gráfico dos elementos orbitais, podemos verificar que é um objeto estável na região transnetuniana. A excentricidade varia entre 0 e 0,2, com a média móvel próximo de 0,1, enquanto a inclinação orbital inicia próximo de 9° e começa a variar entre 0 e 12° . Nos 500 milhões de anos simulados, nenhum dos 100 clones é ejetado do sistema ou possui encontros próximos com os planetas. Um encontro próximo com algum planeta poderia ser prejudicial para a sobrevivência do anel desestabilizando as partículas.

Capítulo 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS E ESTUDOS FUTUROS

Levando em consideração que os objetos transnetunianos são muito importantes para o estudo da formação do Sistema Solar, devido a grande distância ao Sol mantém as características preservadas, e que o Dark Energy Survey (DES), o telescópio de quatro metros com uma câmera acoplada com 74 CCDs (dispositivos de carga acoplada), está encontrando um grande número desses objetos, é importante uma investigação de suas órbitas.

O maior centauro catalogado atualmente é Chariklo, com diâmetro de 250 km e semieixo maior em 15,84 ua e existem centenas de transnetunianos com diâmetro superior a 300 km. Considerando que os centauros são objetos transientes e que o TNO's podem evoluir para regiões interiores do Sistema Solar, um estudo exploratório das órbitas de objetos transnetunianos se mostra interessante.

Para a exploração dessas órbitas utilizamos um integrador numérico que resolve o problema gravitacional de n-corpos. Recorremos ao software REBOUND para realizar as integrações numéricas do Sol, os planetas gigantes e 100 clones dos setenta e sete maiores TNO's por 500 milhões de anos. Durante as integrações armazenamos os encontros próximos dentro da distância de 1 raio de Hill entre os planetas e os clones, e retiramos da simulação objetos que ultrapassaram a marca de 200 ua do Sol.

Dos setenta e sete objetos transnetunianos simulados 20 deles são espalhados por Netuno, onde alguns clones entram para a região dos centauros e outros são jogados em direção aos confins do Sistema Solar. Ocorreram mais de 200000 encontros próximos entre todos os clones com os planetas, sendo 70% deles apenas com Netuno. Diversos clones são jogados entre os planetas e um deles consegue chegar a 4 ua do Sol, na região interna do Sistema Solar.

Dos 632 clones que ultrapassam as 200 ua do Sol, 30.15% são ejetados com menos de 500 anos após o último encontro. Júpiter é o planeta responsável pelas ejeções mais rápidas após

o encontro próximo. O planeta responsável por ejetar mais clones na simulação, onde 55.87% dos objetos tem o seu último encontro próximo, é Netuno, seguido por Saturno com 19.20% dos últimos encontros.

Dos 20 TNO's que encontram os planetas gigantes dentro de 1 raio de Hill e alcançam 200 ua do Sol, alguns dos clones que chegam ao final da simulação, provavelmente sobrevivem capturados em alguma ressonância com os planetas. Esses possíveis objetos são 2002 MS4, 2013 XC26, 2002 KX14, 2014 XY40, 1998 SN165, 2004 TY364, 2010 JK124, 2010 MQ116, 2004 XA192, 2015 AH281 e o 2010 RN64. Uma investigação mais completa junto com cálculos mais refinados é necessário para concluir se realmente são capturados.

Com os resultados obtidos não há um bloqueio ou intervenção de Netuno na entrada de objetos transnetunianos classificados como *Outros TNO's* com diâmetro superior a 300km na região dos centauros. Um estudo em relação a ressonância secular e a outras classificações dos TNO's são importante para uma explicação mais detalhada sobre a evolução desses objetos e sobre a permanência entre os planetas gigantes.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, R. A. N., SFAIR, R., & WINTER, O. C. **The rings of Chariklo under close encounters with the giant planets.** *The Astrophysical Journal*, 824(2):80, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/824/2/80>. Acesso em: 08 ago. 2020.
- BANDA-HUARCA, M. V., CAMARGO, J. I. B., DESMARS, J., OGAND O, R. L. C., VIEIRA-MARTINS, R., ASSAFIN, M., DA COSTA, L. N., BERNSTEIN, G. M., CARRASCO KIND, M., DRLICA-WAGNER, A., GOMES, R., GYSI, M. M., BRAGA-RIBAS, F., MAIA, M. A. G., GERDES, D. W., HAMILTON, S., WESTER, W., ABBOTT, T. M. C., ABDALLA, F. B., ALLAM, S., AVILA, S., BERTIN, E., BROOKS, D., BUCKLEY-GEER, E., BURKE, D. L., CARNERO ROSELL, A., CARRETERO, J., CUNHA, C. E., DAVIS, C., DE VICENTE, J., DIEHL, H. T., DOEL, P., FOSALBA, P., FRIEMAN, J., GARCÍA-BELLIDO, J., GAZTANAGA, E., GRUEN, D., GRUENDL, R. A., GSCHWEND, J., GUTIERREZ, G., HARTLEY, W. G., HOLLOWOOD, D. L., HONSCHEID, K., JAMES, D. J., KUEHN, K., KUROPATKIN, N., MENANTEAU, F., MILLER, C. J., MIQUEL, R., PLAZAS, A. A., ROMER, A. K., SANCHEZ, E., SCARPINE, V., SCHUBNELL, M., SERRANO, S., SEVILLA-NOARBE, I., SMITH, M., SOARES-SANTOS, M., SOBREIRA, F., SUCHYTA, E., SWANSON, M. E. C., TARLE, G., & DES COLLABORATION. **Astrometry and occultation predictions to trans-neptunian and centaur objects observed within the Dark Energy Survey.** *The Astronomical Journal*, 157(3):120, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aafb37>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- BARUCCI, M. A., CRUIKSHANK, D. P., MOTTOLA, S., & LAZZARIN, M. ***Physical properties of trojan and centaur asteroids.*** University of Arizona Press, Tucson, 2002.
- BATYGIN, K., BROWN, M. E., & FRASER, W. C. **Retention of a primordial cold classical kuiper belt in an instability-driven model of solar system formation.** *The Astrophysical Journal*, 738(1):13, 2011.

- BECKER, J. C., KHAIN, T., HAMILTON, S. J., ADAMS, F. C., GERDES, D. W., ZULLO, L., FRANSON, K., MILLHOLLAND, S., BERNSTEIN, G. M., SAKO, M., BERNARDINELLI, P., NAPIER, K., MARKWARDT, L., LIN, H. W., WESTER, W., ABDALLA, F. B., ALLAM, S., ANNIS, J., AVILA, S., BERTIN, E., BROOKS, D., CARNERO ROSELL, A., CARRASCO KIND, M., CARRETERO, J., CUNHA, C. E., D'ANDREA, C. B., DA COSTA, L. N., DAVIS, C., DE VICENTE, J., DIEHL, H. T., DOEL, P., EIFLER, T. F., FLAUGHER, B., FOSALBA, P., FRIEMAN, J., GARCÍA-BELLIDO, J., GAZTANAGA, E., GRUEN, D., GRUENDL, R. A., GSCHWEND, J., GUTIERREZ, G., HARTLEY, W. G., HOLLOWOOD, D. L., HONSCHIED, K., JAMES, D. J., KUEHN, K., KUROPATKIN, N., MAIA, M. A. G., MARCH, M., MARSHALL, J. L., MENANTEAU, F., MIQUEL, R., OGANDO, R. L. C., PLAZAS, A. A., SANCHEZ, E., SCARPINE, V., SCHINDLER, R., SEVILLA-NOARBE, I., SMITH, M., SMITH, R. C., SOARES-SANTOS, M., SOBREIRA, F., SUCHYTA, E., SWANSON, M. E. C., WALKER, A. R., & DES COLLABORATION. **Discovery and dynamical analysis of an extreme trans-neptunian object with a high orbital inclination.** *The Astronomical Journal*, 156(2):81, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aad042>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., SNODGRASS, C., ROQUES, F., VIEIRA-MARTINS, R., CAMARGO, J. I. B., ASSAFIN, M., DUFFARD, R., JEHIN, E., POLLOCK, J., LEIVA, R., EMILIO, M., MACHADO, D. I., COLAZO, C., LELLOUCH, E., SKOTT-FELT, J., GILLON, M., LIGIER, N., MAQUET, L., BENEDETTI-ROSSI, G., GOMES, A. R., KERVELLA, P., MONTEIRO, H., SFAIR, R., MOUTAMID, M. E., TANCREDI, G., SPAGNOTTO, J., MAURY, A., MORALES, N., GIL-HUTTON, R., ROLAND, S., CERRETTA, A., H. GU, S., B. WANG, X., HARPSØE, K., RABUS, M., MANFROID, J., OPITOM, C., VANZI, L., MEHRET, L., LORENZINI, L., SCHNEITER, E. M., MELIA, R., LECACHEUX, J., COLAS, F., VACHIER, F., WIDEMANN, T., ALMENARES, L., SANDNESS, R. G., CHAR, F., PEREZ, V., LEMOS, P., MARTINEZ, N., JØRGENSEN, U. G., DOMINIK, M., ROIG, F., REICHART, D. E., LACLUYZE, A. P., HAISLIP, J. B., IVARSEN, K. M., MOORE, J. P., FRANK, N. R., & LAMBAS, D. G. **A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo.** *Nature*, 508(7494):72–75, 2014.
- GOLDSMITH, D. & OWEN, T. *The search for life in the universe*. University Science Books, 2001.
- GOMES, R. S. **The origin of the Kuiper Belt high-inclination population.** *Icarus*, 161(2):404–418, 2003.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). **Small-body database browser**. 2021. Disponível em: <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>. Acesso em: 01 fev. 2021.

J.J. LISSAUER, I. P. ***Fundamental planetary science***. Cambridge University Press, Inglaterra, 2013.

JOHNSTON, W. R. **Johnston's archive**. 2022. Disponível em: <https://www.johnstonsarchive.net>. Acesso: 07 de Jul de 2022.

MALHOTRA, R. **The origin of Pluto's orbit: implications for the solar system beyond neptune**. AJ, 110:420, 1995.

MORGADO, B. E., SICARDY, B., BRAGA-RIBAS, F., DESMARS, J., GOMES-JÚNIOR, A. R., BÉRARD, D., LEIVA, R., ORTIZ, J. L., VIEIRA-MARTINS, R., BENEDETTI-ROSSI, G., SANTOS-SANZ, P., CAMARGO, J. I. B., DUFFARD, R., ROMMEL, F. L., ASSAFIN, M., BOUFLEUR, R. C., COLAS, F., KRETLOW, M., BEISKER, W., SFAIR, R., SNODGRASS, C., MORALES, N., FERNÁNDEZ-VALENZUELA, E., AMARAL, L. S., AMARANTE, A., ARTOLA, R. A., BACKES, M., BATH, K.-L., BOULEY, S., BUIE, M. W., CACELLA, P., COLAZO, C. A., COLQUE, J. P., DAUVERGNE, J.-L., DOMINIK, M., EMILIO, M., ERICKSON, C., EVANS, R., FABREGA-POLLERI, J., GARCIA-LAMBAS, D., GIACCHINI, B. L., HANNA, W., HERALD, D., HESLER, G., HINSE, T. C., JACQUES, C., JEHIN, E., JØRGENSEN, U. G., KERR, S., KOUPRIANOV, V., LEVINE, S. E., LINDER, T., MALEY, P. D., MACHADO, D. I., MAQUET, L., MAURY, A., MELIA, R., MEZA, E., MONDON, B., MOURA, T., NEWMAN, J., PAYET, T., PEREIRA, C. L., POLLOCK, J., POLTRONIERI, R. C., QUISPE-HUAYNASI, F., REICHART, D., DE SANTANA, T., SCHNEITER, E. M., SIEYRA, M. V., SKOTTFELT, J., SOULIER, J. F., STARCK, M., THIERRY, P., TORRES, P. J., TRABUCO, L. L., UNDA-SANZANA, E., YAMASHITA, T. A. R., WINTER, O. C., ZAPATA, A., & ZULUAGA, C. A. **Refined physical parameters for Chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020**. *Astronomy & Astrophysics*, 652:A141, 2021.

MORGADO, B. E., SICARDY, B., BRAGA-RIBAS, F., ORTIZ, J. L., SALO, H., VACHIER, F., DESMARS, J., PEREIRA, C. L., SANTOS-SANZ, P., SFAIR, R., DE SANTANA, T., ASSAFIN, M., VIEIRA-MARTINS, R., GOMES-JÚNIOR, A. R., MARGOTI, G., DHILLON, V. S., FERNÁNDEZ-VALENZUELA, E., BROUGHTON, J., J. BRADSHAW, R. L., BENEDETTI-ROSSI, G., SOUAMI, D., HOLLER, B. J., KRETLOW, M., BOUFLEUR, R. C., CAMARGO, J. I. B., DUFFARD, R., BEISKER, W., MORALES, N., LECACHEUX, J., ROMMEL, F. L., HERALD, D., BENZ, W., JEHIN, E., JANKOWSKY, F., MARSH, T. R., LITTLEFAIR, S. P., BRUNO, G., PAGANO, I., BRANDEKER, A.,

- COLLIER-CAMERON, A., FLORÉN, H. G., HARA, N., OLOFSSON, G., WILSON, T. G., BENKHALDOUN, Z., BUSUTIL, R., BURDANOV, A., FERRAIS, M., GAULT, D., GILLON, M., HANNA, W., KERR, S., KOLB, U., NOSWORTHY, P., SEBASTIAN, D., SNODGRASS, C., TENG, J. P., & DE WIT, J. **A dense ring of the trans-Neptunian object Quaoar outside its Roche limit.** *Nature*, (614):239–243, 2023.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Minor planet center.** 2020. Disponível em: <https://www.minorplanetcenter.net/dwarf-planets>. Acesso em: 28 set. 2020.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Horizons system.** 2022. Disponível em: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html/>. Acesso: 02 de Jul de 2022.
- REIN, H. & LIU, S. F. **Rebound:** an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *Astronomy & Astrophysics*, 537:A128, 2012. Disponível em: <https://rebound.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Acesso em: 18 dez. 2020.
- REIN, H. & SPIEGEL, D. S. **IAS15:** a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(2):1424–1437, 2014.
- SAILLENFEST, M. **Long-term orbital dynamics of trans-neptunian objects.** *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 132(2):12, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10569-020-9954-9>. Acesso em: 18 maio 2020.
- SCHOMBERT, J. *Lecture 14 terrestrial planet atmospheres (primary atmospheres).* **University of Oregon**, 2009. [Http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec14.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec14.html). Acesso em: 27 Maio de 2022.
- SISTO, R. P. D. & ROSSIGNOLI, N. L. **Centaur and giant planet crossing populations:** origin and distribution. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 132(6-7), 2020.
- VICENT J.MARTÍNEZ, E. M., JOAN ANTONI MIRALLES & GALADÍ-ENRÍQUEZ, D. *Astronomía fundamental.* **Universitat de València**, Espanha, 2005.
- WILLACY, K., TURNER, N., BONEV, B., GIBB, E., RUSSO, N. D., DISANTI, M., VERVACK, R. J., & ROTH, N. X. **Comets in context:** comparing comet compositions with protosolar nebula models. 2022.

APÊNDICES

Apêndice A

ELEMENTOS ORBITAIS DOS OBJETOS SIMULADOS

As Tabelas A.1 e A.2 contêm os elementos orbitais na época de 19 de Junho de 2021 (National aeronautics and space administration (NASA), 2022) de todos os TNO's simulados, o diâmetro (Johnston, 2022) e a incerteza em cada elemento orbital (Jet propulsion laboratory (JPL), 2021) utilizado para gerar os clones. Os objetos estão listados em ordem crescente pelo diâmetro.

Tabela A.1: Lista de objetos transnetunianos classificados como *Outros TNOs* (parte 1)

Nome	Diâmetro (km)	Sma (ua)	σ ($\times 10^{-3}$ ua)	Ecc	σ ($\times 10^{-4}$)	Inc (°)	σ ($\times 10^{-4}$)	omega (°)	σ (°)	OMEGA (°)	σ (°)	M (°)	σ (°)
2015 DZ250	301	42,51230672	2,58910	0,143401231	1,444800	21,95616371	1,158900	126,591	0,127	260,131	0,12398	156,617	0,172
2010 VR11	301	41,34301939	1,18720	0,141357256	0,166330	30,96917711	1,088600	34,613	0,007	86,676	0,00007	328,878	0,006
2010 WN75	301	40,68670348	0,87835	0,092337772	0,143850	28,20494080	0,857180	313,026	0,008	161,689	0,00012	337,037	0,007
2014 WJ509	303	42,71151694	1,10200	0,138188568	0,149840	20,96469956	0,654630	96,229	0,008	100,387	0,00008	310,637	0,007
2003 YO179	308	44,38837003	16,74700	0,132024685	1,779000	19,40453656	3,319300	64,961	0,104	66,917	0,00018	329,965	0,089
1999 CD158	310	43,43268528	0,91945	0,146734289	0,113860	25,55002223	0,565610	146,647	0,006	119,084	0,00004	251,702	0,006
2013 MA12	311	41,81626418	1,28180	0,064103580	0,189950	23,32747786	0,651700	311,366	0,021	114,973	0,00006	261,066	0,021
2015 BE519	314	47,47342874	1,10900	0,064063843	0,184690	24,81500939	0,807310	285,606	0,015	153,183	0,00004	84,243	0,015
2015 BX518	314	42,60251901	1,29200	0,173971619	0,362400	28,21822689	0,730930	54,699	0,006	209,990	0,00013	289,664	0,009
2014 GW53	314	41,27443163	0,83972	0,085941164	0,151490	21,91961837	0,562720	240,268	0,009	54,846	0,00005	296,489	0,009
2014 UR224	316	50,29836308	1,64960	0,219670338	0,213620	10,67382182	0,598570	207,531	0,003	244,228	0,00003	348,686	0,002
2014 DF143	322	42,58012014	1,11520	0,046212356	0,122850	23,75128091	0,739680	66,249	0,023	35,590	0,00004	102,166	0,024
2014 WZ509	322	40,04813419	0,95373	0,098886659	0,195160	15,88938715	0,433970	62,368	0,013	251,280	0,00033	194,491	0,016
2014 QX441	322	38,69481553	0,76203	0,045257079	0,138920	25,97262343	0,344580	298,307	0,013	43,924	0,00006	30,126	0,012
2010 RF64	325	43,28511182	1,34280	0,179356406	0,195660	28,66174311	0,253530	210,204	0,003	130,881	0,00009	27,758	0,003
2014 BD70	331	41,21695511	0,99193	0,136633835	0,190820	22,99142591	1,038100	9,625	0,010	276,681	0,00017	217,985	0,013
2010 RN64	331	41,09308996	1,04050	0,081374972	0,161960	19,87941500	0,413520	36,502	0,013	68,491	0,00018	283,633	0,013
2013 FC28	332	45,73436946	1,08940	0,083907639	0,197400	16,33628018	0,815910	101,484	0,012	193,138	0,00010	254,957	0,013
2010 HE79	334	39,03909291	0,55330	0,177777775	0,056351	15,71022658	0,338750	283,065	0,003	238,704	0,00001	68,197	0,003
2015 AH281	334	37,56037599	1,40580	0,411292414	0,187030	9,608671715	1,829400	354,125	0,015	286,103	0,00003	198,899	0,032
2014 QS441	337	47,09273809	1,44840	0,082354228	0,166920	37,81928186	0,522850	265,274	0,013	185,841	0,00005	317,221	0,012
2004 XA192	339	46,90213559	0,76799	0,243896997	0,103420	38,18983151	0,186450	131,953	0,001	328,545	0,00004	2,917	0,001
2014 SH349	340	43,27730334	1,25840	0,154935881	0,180400	17,26164497	0,688800	97,755	0,008	202,534	0,00013	100,462	0,009
2014 EA52	340	41,32411844	0,92355	0,096629559	0,137980	18,99858675	0,229970	91,140	0,007	140,749	0,00013	343,520	0,006
2011 JF31	343	41,47571470	0,75385	0,129804405	0,141800	27,71553496	0,526680	251,980	0,006	236,811	0,00001	95,564	0,007
2010 MQ116	345	42,14891666	1,33730	0,173904484	0,213630	30,73489119	0,869050	165,732	0,008	5,074	0,00007	238,855	0,011
2014 FY71	346	43,30075590	1,12190	0,203643441	0,131290	18,54969858	0,388990	242,252	0,005	241,873	0,00014	54,843	0,005
2014 QA442	349	43,43413166	1,21350	0,187699155	0,173800	27,40379315	0,133630	280,877	0,004	109,274	0,00011	349,705	0,003
2014 XS40	349	42,21104347	0,96000	0,163529916	0,130860	27,59460585	0,282500	260,955	0,004	186,501	0,00009	37,205	0,004
2014 YZ49	353	40,05100574	0,71439	0,013618024	0,132570	17,21293438	0,344300	51,910	0,044	131,101	0,00012	2,734	0,043
2015 FG345	354	42,08581079	0,98167	0,129179914	0,170500	36,04454699	0,532710	225,026	0,007	58,658	0,00006	299,821	0,007
2010 JK124	354	40,53054136	8,92430	0,113760548	3,896600	15,47794872	4,020400	222,940	0,084	277,618	0,00008	102,607	0,108
2014 LO28	359	43,31210473	1,03350	0,122836472	0,121080	25,54439490	0,391070	104,294	0,008	287,096	0,00008	314,786	0,007
2014 WW509	362	42,56884441	1,81670	0,134793328	0,790740	20,44271849	2,261500	173,043	0,055	110,332	0,00044	155,083	0,074
2004 TY364	365	38,91737750	0,53466	0,062657209	0,055088	24,83186605	0,067220	356,723	0,009	140,316	0,00009	276,759	0,009
2013 HV156	367	47,60717122	1,16070	0,179563378	0,227370	18,13782573	0,202660	182,393	0,006	168,806	0,00029	282,444	0,006
2010 RO64	373	47,15208682	1,13650	0,127189084	0,167750	17,049070380	0,368740	311,851	0,004	60,832	0,00012	8,515	0,003
2014 WH509	376	43,90161957	0,96138	0,179200518	0,086190	18,17401715	0,389910	319,993	0,005	76,455	0,00013	72,808	0,005
2012 VB116	380	46,87584959	1,29250	0,158626818	0,403730	23,21968261	0,497780	0,597	0,008	193,421	0,00038	274,590	0,011

Fonte: (National aeronautics and space administration (NASA), 2022).

Tabela A.2: Lista de objetos transnetunianos classificados como *Outros TNOs* (parte 2)

Nome	Diâmetro (km)	Sma (ua)	σ ($\times 10^{-3}$ ua)	Ecc	σ ($\times 10^{-4}$)	Inc (�)	σ ($\times 10^{-4}$ �)	omega (�)	σ (�)	OMEGA (�)	σ (�)	M (�)	σ (�)
2014 XR40	380	42,77545868	1,04570	0,144897872	0,192260	24,90867214	0,778740	282,752	0,007	3,119	0,00003	269,041	0,007
2015 AN281	380	41,73662721	1,18040	0,144281719	0,220700	17,47628478	0,421450	228,841	0,008	53,234	0,00027	266,518	0,009
2014 QW441	381	44,58601244	0,95577	0,108648582	0,150640	28,73685972	0,348910	202,896	0,004	162,658	0,00003	1,950	0,003
1998 SN165	393	38,05416963	0,53047	0,042101940	0,036980	4,598758077	0,324540	257,913	0,013	192,069	0,00006	301,561	0,013
2014 OJ394	397	52,97507903	4,05720	0,225162030	0,857650	34,63660758	2,139300	272,374	0,009	299,284	0,00008	57,876	0,012
2011 OA60	399	41,17769670	0,88506	0,146700538	0,147320	23,00167847	0,383080	143,155	0,003	129,456	0,00002	25,887	0,003
2004 PT107	400	40,87338564	0,73140	0,065060651	0,128730	26,04200411	0,381790	19,037	0,007	320,872	0,00002	1,029	0,006
2014 XY40	401	47,44362613	5,23960	0,142334226	1,453800	29,01396359	2,226100	37,896	0,073	132,582	0,00079	213,471	0,100
2014 VU37	405	40,68278094	1,01510	0,044397506	0,179570	28,62463893	0,659780	342,163	0,022	248,159	0,00001	204,171	0,023
2014 HZ199	407	43,11128070	0,83024	0,152665553	0,085480	27,87451417	0,442390	84,200	0,005	57,085	0,00003	68,742	0,005
2014 FT71	416	43,48877493	1,44460	0,145659763	0,334840	27,99115196	1,289000	351,173	0,012	346,545	0,00017	239,286	0,016
2014 BZ57	418	42,55836745	0,95420	0,135114885	0,137630	27,04286251	0,374930	265,286	0,004	274,541	0,00009	340,517	0,004
2014 UM33	420	43,09088808	0,84140	0,151511895	0,106290	17,37877698	0,472620	267,471	0,006	236,594	0,00006	276,657	0,006
2004 NT33	423	43,85555217	1,77820	0,155915201	0,255840	31,22367545	0,113350	40,358	0,006	240,982	0,00013	43,590	0,007
2010 VK201	436	43,21133329	1,00020	0,112629674	0,195060	28,83526976	0,167600	90,158	0,011	156,251	0,00019	172,112	0,014
2015 AJ281	436	43,07791729	1,38830	0,129348430	0,248070	26,81046806	0,088133	9,414	0,009	256,055	0,00018	284,708	0,010
2002 KX14	455	38,98357536	0,83716	0,046999729	0,101060	0,398346271	0,672930	67,162	0,020	287,123	0,00669	274,086	0,019
2010 DN93	463	54,87342295	2,64720	0,181642077	0,376750	40,59897755	0,131310	30,469	0,011	91,247	0,00021	45,058	0,009
2010 OO127	471	42,48426446	0,91926	0,126156601	0,198400	25,87849069	0,255990	244,248	0,007	219,875	0,00013	247,607	0,008
2010 FX86	478	46,85906096	4,34640	0,063807996	1,488800	15,16638329	0,219650	353,256	0,056	311,141	0,00077	292,248	0,057
2012 VR128	482	41,46703414	0,63165	0,143670480	0,116660	18,49422488	0,323670	276,277	0,007	283,469	0,00024	204,345	0,009
2013 XC26	489	42,10741390	0,60353	0,224973362	0,089185	18,64628918	0,091721	148,204	0,002	43,265	0,00010	315,392	0,002
2007 XV50	496	45,87078905	1,47100	0,070418400	0,526470	22,87183487	1,313900	273,248	0,022	53,572	0,00012	106,631	0,026
2005 UQ513	498	43,46318347	0,55089	0,142291618	0,072954	25,69929459	0,093753	221,517	0,004	307,531	0,00011	230,979	0,005
2014 YA50	500	46,22162229	1,08300	0,169830933	0,103500	23,88899463	0,331160	196,142	0,005	45,344	0,00011	311,968	0,005
2014 WK509	541	50,91791559	1,81830	0,205914340	0,298080	14,48848584	1,174000	134,689	0,008	40,931	0,00018	275,181	0,010
2004 XR190	574	57,32366125	2,90080	0,104176218	0,709070	46,70095476	2,147700	284,686	0,021	252,376	0,00003	279,358	0,026
2010 KZ39	601	45,42057213	7,89660	0,056008236	2,823300	26,08994974	7,619400	313,235	0,258	53,190	0,00058	262,005	0,242
2002 UX25	665	42,71050970	0,59504	0,139771612	0,051486	19,41220358	0,300090	276,478	0,004	204,587	0,00003	302,821	0,004
2000 WR106	678	42,72400075	0,49580	0,057525864	0,032255	17,20963605	0,315690	263,178	0,009	97,351	0,00004	119,346	0,009
2005 RN43	679	41,84318149	0,46304	0,029778083	0,072958	19,23372555	0,262030	166,973	0,010	187,024	0,00004	353,320	0,009
2004 GV9	680	41,97967714	0,66297	0,075092578	0,114510	21,96134819	0,388590	294,280	0,004	250,638	0,00005	41,278	0,004
2014 EZ51	684	52,32366610	1,90420	0,230251466	0,407680	10,28872241	0,661770	330,436	0,008	27,639	0,00023	269,356	0,013
2003 MW12	740	46,02140765	0,94279	0,144623923	0,126080	21,51747073	0,281360	180,807	0,006	184,239	0,00023	275,751	0,007
2002 AW197	768	46,93631502	0,77877	0,128184425	0,070115	24,44545826	0,411770	298,156	0,005	292,596	0,00006	294,894	0,005
2002 MS4	800	42,01122902	3,42940	0,141133189	0,687400	17,69524897	1,279900	212,237	0,005	216,123	0,00062	227,122	0,004
2004 SB60	866	42,29488101	0,77930	0,103887595	0,079975	23,92232944	0,091469	313,173	0,007	279,927	0,00012	123,697	0,008
2005 FY9	1.430	45,32050543	0,18852	0,164195052	0,033108	28,99366489	0,074824	294,967	0,002	79,539	0,00009	166,589	0,003

Fonte: (National aeronautics and space administration (NASA), 2022).