

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta será disponibilizado somente a partir de 26/02/2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUANA LIBERATO MENDES

Estabilidade e formação de planetas terrestres em regiões coorbitais

Guaratinguetá

2019

Luana Liberato Mendes

Estabilidade e formação de planetas terrestres em regiões coorbitais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Conselho de Pós Graduação em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Física .

Orientador: Prof^o Dr. Othon Cabo Winter

Guaratinguetá

2019

Mendes, Luana Liberato
M538e Estabilidade e formação de planetas terrestres em regiões coorbitais. /
Luana Liberato Mendes – Guaratinguetá, 2019.
76 f : il.
Bibliografia: f. 68-70

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter

1. Planetas – Órbitas 2. Exoplanetas 3. Astronomia I. Título.

CDU 523.4(043)

Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Bibliotecária CRB-8/7094

LUANA LIBERATO MENDES

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

PROGRAMA: FÍSICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. OTHON CABO WINTER
Orientador/UNESP/FEG



Prof.ª. Dr.ª. DANIELA CARDOZO MOURÃO
UNESP/FEG

Prof.ª. Dr.ª. MARIA HELENA MOREIRA MORAIS
UNESP/IGCE-RIO CLARO



DADOS CURRICULARES

LUANA LIBERATO MENDES

NASCIMENTO 08/11/1994 - Guaratinguetá-SP

FILIAÇÃO Gilberto Liberato Mendes Junior
Ruth Nascimento Santos Mendes

2012 - 2017 Bacharelado em Física
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

2017 - 2019 Mestrado Acadêmico em Física
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Em memória de meus amados avós Maria e José Ventura.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por tudo que Ele me concedeu ao longo de todo meu caminho na área acadêmica.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Othon Cabo Winter, por toda a paciência, dedicação, incentivo, e por tudo que me ensinou ao longo desta jornada.

A Prof^a Dra. Daniela Mourão pelas explicações e por toda a ajuda no desenvolvimento das ferramentas que foram essenciais para este trabalho.

Aos membros da banca por aceitarem o convite, por dedicarem um tempo ao meu trabalho e pelas valiosas sugestões que serão dadas.

A minha família, meus pais Ruth e Gilberto, minha irmã Kátia e meu cunhado Marcos por me incentivarem a ir adiante, por sempre acreditarem em meu sucesso e por serem meu porto seguro.

Ao meu marido, Lucas, por ser o melhor companheiro de todos. Obrigada por sempre me ajudar a continuar na luta, por sempre acreditar em mim e por sempre me apoiar. Esta conquista é sua também pois sem todo seu suporte eu não teria conseguido.

Aos meus amigos Gustavo, Victor e Tiago que me acompanham desde a graduação. Obrigada por sempre me ajudarem e por fazerem meus dias mais alegres e mais leves.

Aos meus bebês, Thor e Doguinho, por me acompanharem nas longas noites de escrita e análise de dados, por sempre me tranquilizarem e por serem fonte inesgotável de amor e carinho.

Agradeço a todos os colegas e professores que de alguma forma contribuíram com meu trabalho e me transmitiram um pouco de seu conhecimento.

Este trabalho contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

CAPES - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

E do projeto CEPID-CeMEAI através da utilização do Cluster Euler.

La matematica è l'alfabeto col quale Dio ha scritto l'universo.
(Galileo Galilei)

RESUMO

Encontrar um planeta como a Terra fora do Sistema Solar parece ser difícil. Quando olhamos para os dados dos quase 4000 exoplanetas descobertos até o momento vemos que nenhum deles é similar à Terra. Uma alternativa para encontrar um outro planeta como a Terra seria olhar para as regiões coorbitais dos exoplanetas gigantes, sendo que sistemas coorbitais podem ser descritos como os sistemas onde dois ou mais corpos compartilham uma mesma órbita média.

Nosso objetivo neste trabalho é formar um planeta com a massa da Terra que seja coorbital a um corpo bastante massivo, como um planeta gigante ou uma anã marrom. Para isso nós fizemos várias simulações utilizando o pacote Mercury de integração numérica para o problema de N-corpos. Com os resultados analisamos como a razão de massa do sistema e a separação entre os corpos afetam a região de estabilidade coorbital, e então determinamos seus limites radial e angular.

Tendo a região de estabilidade coorbital bem definida para cada um dos sistemas estudados, nós fizemos novas simulações numéricas distribuindo dentro da região de estabilidade coorbital 500 planetesimais que cujas massas somadas totalizam 2 ou $3M_{\oplus}$.

Nossos resultados mostraram que é possível formar planetas terrestres com massas iguais ou maiores que a da Terra nas regiões coorbitais. Esta formação é mais provável para os sistemas cujo corpo secundário possui uma órbita com semi-eixo maior menor que $1ua$, sendo que os diferentes valores de razão de massa não afetam o processo de formação planetária nas regiões coorbitais.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas coorbitais. Estabilidade. Formação planetária.

ABSTRACT

Finding an Earth-like planet outside Solar System seems to be a difficult task. When we look at the data from the almost 4000 exoplanets discovered until now we see that none of them is similar to our Earth. An alternative to find other planet like Earth would be to look at the co-orbital regions of the giants exoplanets, being that co-orbital systems can be described as those systems where two or more bodies share the same mean orbit.

Our main goal in this work is to form a planet co-orbiting with another massive body, like a giant planet, with the same mass of the Earth. To do that we have performed a series of numerical simulations with the package of computational integrators for the N-body problem called Mercury. With the results we have analyzed how the stable co-orbital region is affected by the system's mass ratio and by the radial separation between bodies, and then we have determined the radial and angular limits of the stable co-orbital region.

Having this region well determined for each one of the studied systems, we have performed new numerical simulations distributing 500 planetesimals within the stable co-orbital region, in which the sum of the planetesimals's masses are equal to 2 or $3M_{Earth}$.

Our results have shown that it is possible to form terrestrial planets with masses equals or bigger than the Earth's inside the stable co-orbital regions. This formation is more likely to happen for the systems in which the secondary body has an orbit with semi-major axis smaller than $1au$, being that the variety of values of the secondary body's mass ratio does not affect the planetary formation process inside the stable co-orbital regions .

KEYWORDS: Co-orbital systems. Stability. Planetary formation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Gráfico de massa versus período orbital dos exoplanetas descobertos até o momento. Cada ponto preto representa um exoplaneta e o quadrado azul representa a localização da Terra no gráfico.	16
Figura 2	Representação planar da relação entre as coordenadas da partícula no sistema inercial (ξ, η, ζ) e no sistema girante (x, y, z) . O centro de massa se localiza na origem O e os eixos z e ζ coincidem com o eixo de rotação do sistema.	21
Figura 3	Gráficos de x versus y representando curvas de velocidade zero. Cada gráfico mostra a curva associada à constante de Jacobi indicada no canto superior esquerdo. Foram usados os parâmetros $n = 1$, $\mu_1 = 0.9$ e $\mu_2 = 0.1$. O círculo amarelo representa o corpo central M_1 e o círculo marrom representa o corpo M_2 . As cores das linhas são para diferenciar os valores de C_J e as áreas cinzas são as regiões “proibidas” às partículas.	26
Figura 4	Esquema representando a localização dos pontos lagrangianos (pontos pretos). O círculo amarelo representa o corpo central M_1 e o círculo marrom representa o corpo M_2	27
Figura 5	Esquema para ilustrar uma órbita de um objeto do tipo quase-satélite. O ponto e a curva pretos representam o corpo M_2 e sua órbita, o ponto e a curva vermelhos representam o corpo M_3 e sua órbita, e o círculo amarelo representa o corpo central M_1 . Na figura da esquerda vemos a órbita do quase-satélite a partir do referencial inercial, já na figura da direita vemos a órbita a partir do referencial girante. As setas indicam a direção do movimento do corpo na órbita.	29
Figura 6	Esquema para ilustrar o formato de órbitas hipotéticas de partículas coorbitais no sistema girante. A órbita azul é a do tipo ferradura, as órbitas verdes são do tipo girino. O círculo amarelo representa o corpo central M_1 e o círculo marrom representa o corpo M_2 . Os pontos pretos representam as localizações dos pontos de equilíbrio lagrangianos.	30

Figura 7	Gráficos de semi-eixo maior versus excentricidade das larguras de libração de algumas ressonâncias internas a um planeta do tipo Júpiter com diferentes valores de massa em cada um dos gráficos, utilizando um modelo analítico baseado no PR3C.	33
Figura 8	Gráficos de massa do corpo secundário versus número de partículas no final da simulação. As cores representam os diferentes valores de semi-eixo maior do corpo secundário.	44
Figura 9	Gráficos de massa do corpo secundário versus número de partículas no final da simulação. A curva vermelha representa a média do número de corpos sobreviventes para cada valor de massa do corpo secundário. A linha preta com triângulos mostra a os valores obtidos para ξ_{ua} ao fazermos simulações para outros valores de massa do corpo secundário.	45
Figura 10	Gráficos de x versus y das posições iniciais das partículas que sobreviveram até o fim da simulação. Cada quadro apresenta os resultados das simulações para diferentes valores de massa do corpo secundário. O círculo amarelo representa o corpo central como uma estrela do tipo Sol com $M_1 = 1M_{\odot}$, o círculo marrom representa o corpo secundário M_2 e os pontos cinzas representam as posições iniciais das partículas que sobreviveram até o fim da simulação.	46
Figura 11	Gráfico de massa do corpo secundário versus distância angular mínima e máxima da região estável. As cores representam os diferentes valores de semi-eixo maior do corpo secundário. A linha reta vermelha localizada em 23.9° indica o ϕ_{min} da separatriz. As linhas pretas e tracejadas indicam as curvas de ajuste cujas equações estão descritas na legenda.	49
Figura 12	Gráfico de semi-eixo maior do corpo secundário em escala logarítmica versus razão entre largura radial da região de estabilidade na vizinhança do L_4 e o semi-eixo maior de M_2 . As cores diferentes nas linhas e pontos representam os diferentes valores de massa do corpo secundário.	50

Figura 13	Gráfico de massa M_2 versus razão entre a largura radial da região de estabilidade na vizinhança do L_3 e do L_4 sobre a_2 . Os pontos representam a média dos resultados para os diferentes valores de semi-eixo maior do corpo secundário. As cores indicam se os valores pertencem à medição nos pontos L_3 ou L_4 . A curva preta indica a equação apresentada na legenda.	53
Figura 14	Gráficos semi-eixo maior versus massa do corpo secundário para cada caso de sistema coorbital simulado. A paleta de cores indica a média do número de corpos formados por simulação que foram considerados planetas. O gráfico superior apresenta os resultados para o caso onde a massa total dos planetesimais é $2M_{\oplus}$, e o gráfico inferior para o caso com $3M_{\oplus}$	57
Figura 15	Gráficos semi-eixo maior versus massa do corpo secundário. A paleta de cores indica a a massa do planeta mais massivo que foi formado em cada um dos caso de sistema coorbital simulado. O gráfico superior apresenta os resultados para o caso onde a massa total dos planetesimais é $2M_{\oplus}$, e o gráfico inferior para o caso com $3M_{\oplus}$	60
Figura 16	Gráficos semi-eixo maior versus massa do maior corpo formado para alguns casos de massa do corpo secundário para o caso com $2M_{\oplus}$ na região coorbital. As curvas pretas indicam os ajustes das equações indicadas na legenda.	61
Figura 17	Gráficos semi-eixo maior versus massa do maior corpo formado para alguns casos de massa do corpo secundário para o caso com $3M_{\oplus}$ na região coorbital. As curvas pretas indicam os ajustes das equações indicadas na legenda.	62
Figura 18	Gráficos semi-eixo maior versus massa do corpo secundário para cada caso simulado. A paleta de cores indica a média do número de corpos formados por simulação que foram considerados planetas. O gráfico superior apresenta a comparação entre os resultados para o caso onde a massa total dos planetesimais é $2M_{\oplus}$ no primeiro método e $4M_{\oplus}$ no segundo método, e o gráfico inferior apresenta a comparação entre os resultados para o caso com $3M_{\oplus}$ no primeiro método e $6M_{\oplus}$ no segundo. . . .	64

Figura 19 Gráficos semi-eixo maior versus massa do corpo secundário. A paleta de cores indica a a massa do planeta mais massivo que foi formado em cada um dos casos simulados. O gráfico superior apresenta a comparação entre os resultados para o caso onde a massa total dos planetesimais é $2M_{\oplus}$ no primeiro método e $4M_{\oplus}$ no segundo método, e o gráfico inferior apresenta a comparação entre os resultados para o caso com $3M_{\oplus}$ no primeiro método e $6M_{\oplus}$ no segundo. 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Condições iniciais das simulações de estabilidade.	41
Tabela 2	–	Número de partículas restantes ao final das simulações para o caso com semi-eixo maior do corpo secundário igual a $5ua$	45
Tabela 3	–	Valores médios da mínima e máxima separação angular entre a região de estabilidade e o corpo secundário.	48
Tabela 4	–	Valores médios da largura radial da região de estabilidade na vizinhança do ponto L_4 obtidos a partir das simulações	51
Tabela 5	–	Valores médios da largura radial da região de estabilidade na vizinhança dos pontos L_3 e L_4 utilizando os dois métodos de eliminação de partículas.	54
Tabela 6	–	Valores médios da mínima e máxima separação angular entre a região de estabilidade coorbital e o corpo secundário, utilizando os dois métodos de eliminação de partículas.	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	SISTEMAS COORBITAIS	20
2.1	PROBLEMA RESTRITO DE 3-CORPOS	20
2.2	CURVAS DE VELOCIDADE ZERO	25
2.3	PONTOS DE EQUILÍBRIO LAGRANGIANOS	26
2.4	TIPOS DE ÓRBITAS E CAOS	28
2.4.1	Quase-Satélites	28
2.4.2	Órbitas Girino e Ferradura	29
2.4.3	Caos	32
2.5	FORMAÇÃO DE EXOPLANETAS COORBITAIS	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	PACOTE MERCURY	37
3.2	ADAPTAÇÕES NO PACOTE MERCURY	37
3.2.1	Limite Angular	38
3.2.2	Limite Interno Para o Raio Orbital	39
3.3	SISTEMA ESTUDADO E CONDIÇÕES INICIAIS DAS SIMULAÇÕES	40
3.3.1	Simulações de Estabilidade	41
3.3.2	Simulações de Formação Planetária	42
4	RESULTADOS	43
4.1	ESTABILIDADE DA REGIÃO COORBITAL	43
4.1.1	Número de Partículas Sobreviventes	43
4.1.2	Limite entre Regimes de Órbitas	46
4.1.3	Largura Angular	47
4.1.4	Largura Radial em L_4	50
4.1.5	Largura Radial em L_3	52
4.1.6	Simulações Para Estudo da Região de Estabilidade Coorbital Utilizando um Parâmetro Angular Diferente para Eliminação de Partículas	53

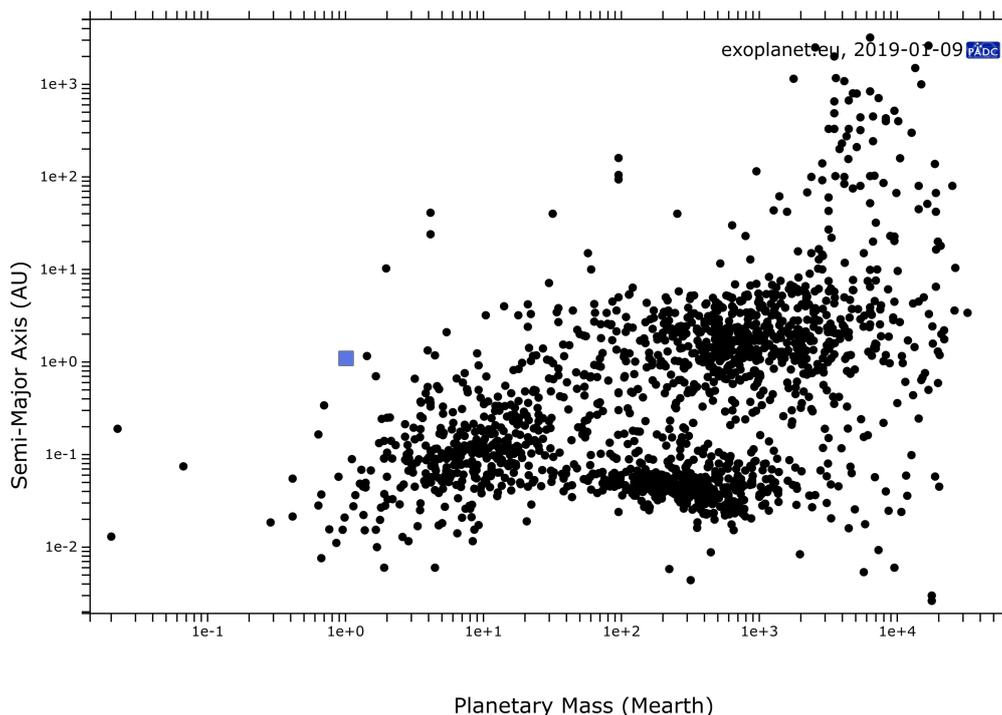
4.2	FORMAÇÃO DE PLANETAS TERRESTRES NA REGIÃO CO- ORBITAL	56
4.2.1	Número de Corpos Formados	56
4.2.2	Massa dos Planetas Formados	58
4.2.3	Simulações Para Estudo Formação de Planetas Terrestres na Região Coorbital Utilizando um Parâmetro Angular Diferente para Eliminação de Partículas	63
5	COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A – ROTINA <i>MXX_EJEC</i> DO PACOTE MER- CURY ADAPTADA	71

1 INTRODUÇÃO

Por centenas de anos os únicos planetas que a humanidade conhecia eram aqueles contidos dentro do Sistema Solar. Sendo assim todo o estudo feito na área de formação planetária era feito de acordo com as características da Terra e dos planetas vizinhos. Porém, com a evolução da tecnologia fomos capazes de olhar mais longe no universo, e com isso encontramos ao redor de outras estrelas milhares de outros planetas.

O primeiro exoplaneta foi descoberto no início dos anos 90 em uma órbita bem próxima a um pulsar (WOLSZCZAN; FRAIL, 1992), então em 1995 foi descoberto o primeiro exoplaneta ao redor de uma estrela da sequência principal (MAYOR; QUELOZ, 1995) e hoje são mais de 3900 exoplanetas descobertos (SCHNEIDER,).

Figura 1 – Gráfico de massa versus período orbital dos exoplanetas descobertos até o momento. Cada ponto preto representa um exoplaneta e o quadrado azul representa a localização da Terra no gráfico.



fonte: exoplanet.eu (2019)

Desde o início da ciência os pesquisadores se perguntam o que levou a vida a se desenvolver na Terra, portanto para os cientistas planetários encontrar vida em outro planeta seria o primeiro passo para entender este problema, além de mostrar que não estamos sozinhos no universo. Para isso é necessário encontrar um planeta análogo à

Terra, porém nenhum dos exoplanetas que conhecemos até a data de hoje (02/2019) se encaixa perfeitamente nos parâmetros adequados.

Na Figura 1 vemos um gráfico de massa planetária em massas da Terra, M_{\oplus} , versus semi-eixo maior em unidades astronômicas, ua , onde cada ponto representa um exoplaneta. Nela temos a Terra representada pelo quadrado azul e bem próximo a ela não existem exoplanetas detectados. Enquanto isso vemos que corpos com massas parecidas são, até o momento, a minoria e foram observados orbitando mais próximos às estrelas. Em contrapartida os planetas gigantes parecem ser a maioria no universo. Estes foram detectados em órbitas parecidas com a da Terra, sendo que muitos deles estão dentro da zona habitável de seu respectivo sistema, que é definida como a região ao redor de uma estrela onde pode existir água no estado líquido na superfície de um planeta, similar à Terra (KASTING; WHITMIRE; REYNOLDS, 1993).

Ainda não sabemos por qual motivo um planeta como a Terra ainda não foi descoberto, mesmo com toda a tecnologia utilizada atualmente. Mas, de qualquer forma, uma possível alternativa seria tentar encontrá-lo coorbital a um planeta gigante, sendo um sistema coorbital composto por objetos que orbitam ao redor dos pontos de equilíbrio lagrangianos de um determinado corpo, chamado de corpo secundário, que está em uma órbita ao redor de um corpo mais massivo chamado de corpo primário.

Sabemos que as estruturas não planetárias como os cometas (KIEFER et al., 2014) e o cinturão de Kuiper (MORO-MARTIN et al., 2008) já foram encontradas em alguns sistemas extrassolares, então apesar de os projetos de busca (Lillo-Box, J. et al., 2018) ainda não terem encontrado estruturas coorbitais sabemos que elas também devem (ou no mínimo podem) existir fora do Sistema Solar.

Após a descoberta do primeiro asteroide coorbital do Sistema Solar feita por Max Wolf em 1906, o 588 Achilles que compartilha a órbita com Júpiter, mais de 6500 outros corpos coorbitais a Júpiter foram descobertos e são chamados de Troianos. Também foram encontrados corpos coorbitais à Terra (WIEGERT; INNANEN; MIKKOLA, 1997), à Venus (NAMOUNI; CHRISTOU; MURRAY, 1999), e em Saturno vários sistemas de satélites coorbitais como Janus-Epimeteu, Telesto-Calipso-Tétis e Polydeuces-Helena-Dione. Devido a essas descobertas foram feitos inúmeros trabalhos sobre corpos coorbitais e anéis estreitos, porém já há algum tempo que os pesquisadores têm estudado sobre exoplanetas coorbitais.

Alguns trabalhos trataram sobre a estabilidade de planetas hipotéticos coorbitais a um gigante gasoso (SCHWARZ et al., 2007; CRESSWELL; NELSON, 2009; FUNK et al., 2012) e em todos os casos concluíram que os planetas troianos fictícios teriam

órbitas estáveis, com isso surgiram alguns possíveis cenários para explicar a formação destes planetas.

São sugeridos os cenários de captura de objetos para os pontos L_4/L_5 (pontos de equilíbrio linearmente estáveis sobre a órbita de um corpo, serão melhor explicados no capítulo seguinte) por varios mecanismos diferentes e de formação in-situ a um companheiro coorbital, possivelmente devido a uma densidade elevada de material sólido na vizinhança dos pontos lagrangianos L_4 e L_5 de um planeta muito massivo. Esse cenário de formação in-situ (LAUGHLIN; CHAMBERS, 2002) é o conceito base para nosso estudo. Ele foi posteriormente estudado por outros autores que, sob certas condições, provaram ser plausível a formação de corpos nas regiões coorbitais, como por exemplo planetas troianos para o sistema Sol-Júpiter (BEAUGÉ et al., 2007), ou satélites troianos para um sistema Saturno-*proto satélite* (IZIDORO; WINTER; TSUCHIDA, 2010).

De acordo com as teorias mais aceitas de formação planetária até o momento, no início do processo de formação dos planetas existe uma nuvem de gás e poeira que se assenta em um disco ao redor da estrela e, com o passar do tempo e devido a vários fatores, o gás se dissipa. Nos primeiros estágios da formação as partículas de poeira têm desde tamanhos sub-micrométricos até a ordem de centímetros. Gradualmente o gás e a poeira geram corpos maiores através de colisões levando a aglomeração. Encontros entre os aglomerados resultam em uma grande quantidade de estruturas da ordem de metros. A colisão entre estas estruturas geram os planetesimais da ordem de quilômetros. Como esta etapa é difícil de funcionar, as propostas mais recentes envolvem o acúmulo de “pebbles”, que são corpos da ordem de dezenas de centímetros que se agrupam para gerar os corpos bem maiores da ordem de quilômetros (WEIDENSCHILLING, 1977). Os encontros entre planetesimais levam à formação de planetas primordiais com tamanhos da ordem da Terra ou até 10 vezes mais (ARMITAGE, 2007).

Similar ao estudo feito por Beaugé et. al. (2007), nosso objetivo neste trabalho é analisar quais são os parâmetros necessários em um sistema planetário para formar um planeta do tipo Terra coorbital a um corpo muito massivo. Então, primeiramente identificamos a estabilidade da região coorbital e determinamos os seus limites radial e angular. Consideramos um amplo intervalo de valores para a massa do corpo secundário, bem como da distância entre ele e o corpo central. Tendo a região de estabilidade coorbital bem determinada, nós então distribuimos planetesimais dentro dela e consideramos um sistema nos últimos estágios de formação planetária. Nosso

modelo consiste de um corpo central do tipo Sol, um corpo secundário muito massivo completamente formado e uma nuvem de planetesimais em órbitas do tipo girino ao redor do ponto de equilíbrio lagrangiano L_4 , tendo o gás já sido dissipado do sistema. As colisões são consideradas inelásticas e é através deste processo de acreção que os planetas devem se formar na região coorbital.

Nosso trabalho está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 apresentamos o estudo de trabalhos teóricos sobre sistemas coorbitais que é necessário para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 apresentamos quais os programas e adaptações computacionais foram utilizados durante o trabalho e apresentamos as características do sistema estudado. No capítulo 4 estão apresentados os resultados obtidos com as simulações de estabilidade e de formação planetária nos sistemas estudados e as análises dos mesmos. Por fim, no capítulo 5, apresentamos nossos comentários finais e conclusões.

5 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Ao longo do trabalho encontramos alguns resultados interessantes. O primeiro resultado da parte de análise de estabilidade é o fato de o tamanho da região de estabilidade coorbital oscilar conforme a razão de massa μ_2 aumenta. Este parece ser um fenômeno real pois, além dos resultados apresentados neste trabalho, fizemos estudos anteriores utilizando outros dados e métodos e obtivemos sempre o mesmo comportamento. Nosso próximo passo será encontrar uma explicação para este fenômeno inesperado.

Outro dado importante que obtivemos foi o limite de razão de massa do corpo secundário $\mu_2 \sim 7.87 \times 10^{-4}$ para que possam existir órbitas do tipo ferradura no sistema. Encontramos também duas novas equações empíricas para achar os valores de mínima e máxima separação angular entre a região coorbital e o corpo secundário em função da massa do corpo secundário. Apesar de descrever o mesmo parâmetro que a equação encontrada por Yoder et. al. (1983) esta é bem mais simples de ser resolvida.

Na parte de formação planetária vimos que Beaugé et. al. (2007) tentou formar um planeta do tipo Terra coorbital a um sistema Sol-Júpiter distribuindo entre 1 e $3M_{\oplus}$ na região coorbital e os corpos formados por ele tinham de 0.3 a $0.6M_{\oplus}$. Mesmo utilizando condições iniciais e integradores diferentes dos dele, os nossos resultados condizem com os obtidos pelos autores, sendo nosso trabalho muito mais abrangente.

Vimos que a massa do corpo secundário desempenha um papel importante na determinação dos limites angulares da região de estabilidade coorbital, porém não afeta a formação de planetas na mesma. Significa que a razão de massa do sistema não influencia fortemente o processo de acreção.

Já o semi-eixo maior do corpo secundário juntamente com a quantidade de massa disponível na região coorbital são os parâmetros chave do problema. É a combinação deles que determina se será possível ou não formar um planeta na região coorbital e qual será a massa deste planeta. Para isso encontramos uma simples equação que dá a média da massa do planeta formado em função apenas do semi-eixo maior do corpo secundário e da massa inicial na região coorbital.

Quanto menor o semi-eixo maior do corpo secundário, maior é a probabilidade de formar um planeta como a Terra, e isso se deve provavelmente devido ao fato de que uma região de estabilidade coorbital pequena favorece a colisão e a acreção entre os

planetesimais.

Após todos os estudos feitos podemos concluir que, ao contrário do que dizem os outros trabalhos, é possível sim formar um planeta com massa igual ou maior que a da Terra coorbital a um corpo muito massivo, como por exemplo um planeta gigante ou uma anã marrom.

Nossos estudos apresentam resultados muito mais gerais do que os existente atualmente, podendo ser usados para estudo de formação de corpos em regiões coorbitais a planetas, estrelas satélites, e quaisquer outros corpos cujas razões de massa respeitem o limite de Gascheau.

Nossos resultados poderão também ajudar nas futuras missões de busca por exoplanetas coorbitais. Sabemos que grande parte dos exoplanetas encontrados são do tipo Hot Jupiters (planetas do tipo Júpiter que orbitam muito próximos à estrela) e esta é exatamente a configuração que nós descobrimos ser a mais provável para a formação de um exoplaneta terrestre coorbital. Então agora sabemos que há a possibilidade de existir um planeta similar à Terra coorbital a um Hot Jupiter possivelmente localizado dentro da zona habitável de seu sistema.

REFERÊNCIAS

- ARMITAGE, P. J. Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems. **arXiv preprint astro-ph/0701485**, 2007.
- BEAUGÉ, C. et al. Co-orbital terrestrial planets in exoplanetary systems: a formation scenario. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 463, n. 1, p. 359–367, 2007.
- BROWN, E. W. Orbits, periodic, on a new family of periodic orbits in the problem of three bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 71, p. 438–454, 1911.
- CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 304, n. 4, p. 793–799, 1999.
- CHANUT, T.; WINTER, O.; TSUCHIDA, M. Nebular gas drag and co-orbital system dynamics. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 481, n. 2, p. 519–527, 2008.
- CHIANG, E.; LITHWICK, Y. Neptune trojans as a test bed for planet formation. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 628, n. 1, p. 520, 2005.
- CRESSWELL, P.; NELSON, R. On the evolution of multiple protoplanets embedded in a protostellar disc. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 450, n. 2, p. 833–853, 2006.
- CRESSWELL, P.; NELSON, R. P. Three-dimensional simulations of multiple protoplanets embedded in a protostellar disc. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 482, n. 2, p. 677–690, 2008.
- CRESSWELL, P.; NELSON, R. P. On the growth and stability of trojan planets. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 493, n. 3, p. 1141–1147, 2009.
- DERMOTT, S. F.; MURRAY, C. D. The dynamics of tadpole and horseshoe orbits: I. theory. **Icarus**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 1–11, 1981.
- FUNK, B. et al. On the stability of possible trojan planets in the habitable zone: an application to the systems hd 147513 and hd 210277. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 423, n. 4, p. 3074–3082, 2012.
- GARFINKEL, B. Theory of the trojan asteroids. i. **The Astronomical Journal**, v. 82, p. 368–379, 1977.

- IZIDORO, A.; WINTER, O.; TSUCHIDA, M. Co-orbital satellites of saturn: congenital formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 405, n. 4, p. 2132–2140, 2010.
- KASTING, J. F.; WHITMIRE, D. P.; REYNOLDS, R. T. Habitable zones around main sequence stars. **Icarus**, Elsevier, v. 101, n. 1, p. 108–128, 1993.
- KIEFER, F. et al. Two families of exocomets in the β pictoris system. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 514, p. 462–464, out. 2014.
- KINOSHITA, H.; NAKAI, H. Quasi-satellites of jupiter. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 98, n. 3, p. 181–189, 2007.
- LAUGHLIN, G.; CHAMBERS, J. E. Extrasolar trojans: the viability and detectability of planets in the 1: 1 resonance. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 124, n. 1, p. 592, 2002.
- Lillo-Box, J. et al. The troy project: Searching for co-orbital bodies to known planets - i. project goals and first results from archival radial velocity. **Astronomy & Astrophysics**, v. 609, p. A96, 2018.
- MAYOR, M.; QUELOZ, D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 378, n. 6555, p. 355, 1995.
- MORBIDELLI, A. et al. Chaotic capture of jupiter's trojan asteroids in the early solar system. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 435, n. 7041, p. 462, 2005.
- MORO-MARTIN, A. et al. Extrasolar kuiper belt dust disks. **The Solar System Beyond Neptune**, University of Arizona Press, p. 465, 2008.
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar system dynamics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999.
- NAMOUNI, F.; CHRISTOU, A.; MURRAY, C. Coorbital dynamics at large eccentricity and inclination. **Physical review letters**, APS, v. 83, n. 13, p. 2506, 1999.
- SCHNEIDER, J. **The Extrasolar Planets Encyclopaedia**. <<http://exoplanet.eu/catalog.php>>.
- SCHWARZ, R. et al. Stability of fictitious trojan planets in extrasolar systems. **Astronomische Nachrichten**, v. 328, n. 8, p. 785–788, 2007.
- THOMMES, E. W. A safety net for fast migrators: Interactions between gap-opening and sub-gap-opening bodies in a protoplanetary disk. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 626, n. 2, p. 1033, 2005.

TREFFENSTÄDT, L. L.; MOURÃO, D. C.; WINTER, O. C. Formation of the janus-epimetheus system through collisions. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 583, p. A80, 2015.

WEIDENSCHILLING, S. Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 180, n. 2, p. 57–70, 1977.

WIEGERT, P. A.; INNANEN, K. A.; MIKKOLA, S. An asteroidal companion to the earth. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 387, n. 6634, p. 685, 1997.

WISDOM, J. The resonance overlap criterion and the onset of stochastic behavior in the restricted three-body problem. **The Astronomical Journal**, v. 85, p. 1122–1133, 1980.

WOLSZCZAN, A.; FRAIL, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar psr1257+ 12. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 355, n. 6356, p. 145, 1992.

YODER, C. et al. Theory of motion of saturn's coorbiting satellites. **Icarus**, Elsevier, v. 53, n. 3, p. 431–443, 1983.