

ANÁLISE DA DINÂMICA PLANETÁRIA PARA UM CONJUNTO DE SISTEMAS DE EXOPLANETAS KEPLER

Douglas Rodrigues Alves



OBSERVATÓRIO DO VALONGO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Rio de Janeiro, 2017

Douglas Rodrigues Alves

ANÁLISE DA DINÂMICA PLANETÁRIA PARA
UM CONJUNTO DE SISTEMAS DE
EXOPLANETAS KEPLER

Monografia apresentada ao curso de Astronomia da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção
do grau de Bacharel em Astronomia

Orientador: Adrián Rodríguez Colucci

Março de 2017



OBSERVATÓRIO DO VALONGO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso de Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro intitulado ***ANÁLISE DA DINÂMICA PLANETÁRIA PARA UM CONJUNTO DE SISTEMAS DE EXOPLANETAS KEPLER*** de autoria de Douglas Rodrigues Alves, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Adrián Rodríguez Colucci
UFRJ/Observatório do Valongo

Prof. Dr. Fernando Virgílio Roig
MCT/Observatório Nacional

Prof. Dr. Marcelo Assafin
UFRJ/Observatório do Valongo

Coordenador(a) do Departamento de Astronomia
Gustavo F. Porto de Mello
OV/UFRJ

Rio de Janeiro, 10 de Março de 2017

RESUMO

A missão Kepler foi responsável pela descoberta de grande parte dos sistemas extrassolares até o momento. Neste trabalho estudamos a dinâmica orbital de um conjunto de sistemas de exoplanetas detectados por esta missão espacial. É comum não se ter informação sobre a estabilidade dinâmica de muitos sistemas exoplanetários, uma vez que os dados da missão Kepler apenas fornecem alguns parâmetros tal como o semi-eixo maior, período orbital e algumas vezes a massa dos planetas, nos casos em que há a utilização de mais de um método de detecção. O objetivo principal deste estudo visa um melhor entendimento da dinâmica orbital para estes sistemas exoplanetários. Baseados nos dados da missão espacial Kepler, utilizamos o *software* MERCURY, cuja finalidade principal é resolver as equações do movimento do problema dos N corpos. Estudamos sete sistemas extrassolares multiplanetários em que se destaca a diversidade de configurações orbitais e parâmetros físicos. Executamos simulações de 1 milhão de anos e para alguns casos, quando necessário, rodamos até 10 milhões de anos. Nos casos onde o sistema planetário apresenta um movimento estável, introduzimos um planeta hipotético do tipo Terra na zona habitável do sistema com motivo de estudar a sua dinâmica orbital. Concluímos que, para diversos sistemas extrassolares, um planeta do tipo Terra orbitando na zona habitável poderia coexistir junto com o resto dos planetas do sistema. No entanto, em alguns casos, identificamos regiões da zona habitável onde a Terra hipotética não poderia permanecer com movimento estável em escalas de tempo de centenas de milhões de anos.

Palavras-chave: <Dinâmica orbital>, <Exoplanetas>, <Terra hipotética>, <Missão Kepler>, <Ressonância>, <Zona habitável>

ABSTRACT

The Kepler mission was responsible for the discovery of almost all extra-solar systems up to date. On this research we study the orbital dynamics of a set of exoplanetary systems detected by this space mission. It is common not to have information about dynamical stability for many exoplanetary systems because the Kepler mission data only provides some parameters such as the semi-major axis, orbital period and sometimes the planet's mass in cases when there is more than one method of detection being used. The main purpose of this study aims at reaching a better understanding of the orbital dynamics for these exoplanetary systems. Based on the Kepler space mission data, we have utilized the software MERCURY, in which the main goal is to solve the planetary motion's equation for N-bodies. We studied seven extra-solar systems, wherein the majority outstands by their diversity in orbital configurations and physical parameters. We have carried out all the simulations to a time of up to 1 million years and for some cases, when necessary, we left it running up to 10 million years. In situations where the planetary system behaves in a stable way, we introduced a hypothetical Earth-like planet within the habitable zone in order to study its orbital dynamics. Our conclusion is that, for many extra-solar planetary systems, an Earth-like planet orbiting within the habitable zone may coexist along with the planetary systems. However, for some cases, we identified regions within the habitable zone in which the hypothetical Earth must not remain stable in timescale of hundreds of millions of years .

Key-words: <Orbital dynamics>, <Exoplanets>, <Hypotetical Earth>, <Kepler mission>, <Resonance>, <Habitable zone>

AGRADECIMENTOS

À pessoa mais especial deste universo, minha mãe. Obrigado por toda paciência e por tudo que tem feito por mim desde sempre; sem você como base eu não iria a lugar algum. Criar três filhos com tanto amor é para poucos e você fez isso muito bem. Dedico este trabalho a você, querida mãe. À minha "irmãzona" e segunda mãe, sempre preocupada comigo em todos os aspectos; desde sempre esteve ao meu lado, minha eterna gratidão. Ao meu irmão que, apesar de sua personalidade, sempre me ajuda quando eu preciso. Obrigado pelo laptop; sem ele, escrever este projeto final seria ainda mais difícil. Ao meu sobrinho e à minha sobrinha que sempre apareciam para alegrar e renovar o ambiente com seus sorrisos e brincadeiras.

Ao meu orientador Adrián Rodriguez Colucci, por todas as vezes que eu aparecia com alguma dúvida. Obrigado pela paciência e pelas dicas de como prosseguir diante dos problemas que eu encontrava ao longo desta pesquisa. À todos os grandes professores do Observatório do Valongo (OV), que com todo o conhecimento, paixão pela astronomia e vontade de lecionar me motivam a continuar nesta longa caminhada rumo à carreira de pesquisador. Agradeço em especial ao prof Hélio Jaques Rocha-Pinto por tudo que fez por mim durante a graduação e também pelos esclarecimentos (via orkut) sobre a carreira de astrônomo antes mesmo de eu ingressar na faculdade. Para um aluno de ensino médio não é fácil convencer os parentes que você será o astrônomo da família. À prof Silvia Lorenz-Martins, minha primeira orientadora. Aprendi muito contigo sobre o mundo da pesquisa acadêmica além de ter compreendido bastante sobre a evolução das estrelas, especialmente as pós-AGBs. Obrigado também pelos conselhos e ajuda com todo o processo que culminou no meu período de estudo/pesquisa no Canadá pelo Ciência sem Fronteira. Aos membros da secretaria do OV que sempre foram atenciosos e solícitos ao primeiro sinal de dificuldades, muito obrigado.

Ao CNPq pela oportunidade de bolsa pelo Ciência sem Fronteira. Este programa foi bastante enriquecedor tanto na minha vida acadêmica quanto pessoal. À FAPERJ pelo incentivo e amparo à pesquisa que esta instituição ofereceu a mim e a todos os estudantes do Rio de Janeiro.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos da faculdade, vocês foram muito importantes. Todos aqueles momentos de descontração antes das aulas (e às vezes durante as aulas) de cálculo, eletro, quântica, astrofísica, entre outros, me ajudaram a 'levar' o curso adiante; seria difícil chegar ao final do curso sem vocês.

Conteúdo

1	Introdução	18
1.1	Missão Kepler	21
1.2	Sistemas Planetários	24
1.3	Habitabilidade	28
2	O Modelo	31
2.1	As Equações do Movimento	31
3	Metodologia	34
3.1	Seleção de Sistemas Planetários	34
3.2	MERCURY	34
3.3	Planeta Hipotético	34
3.4	Curva de Colisão	35
4	Resultados	36
4.1	Kepler-87	36
4.2	Kepler-62	51
4.3	Kepler-30	63
4.4	Kepler-103	66
4.5	Kepler-289	70
4.6	Kepler-11	74
4.7	K2-19	82
5	Conclusões e Perspectivas	87
5.1	Estudo da dinâmica orbital de exoplanetas	87
5.2	Próximas Missões	88
	REFERÊNCIAS	90

LISTA DE FIGURAS

- 1.1 Número de exoplanetas descobertos até 2016. Cada cor representa um respectivo método de detecção de exoplanetas. O Método que mais se destaca é o método de trânsito que foi por meio do qual a missão kepler se baseou na busca por exoplanetas. *Créditos: NASA/Caltech* 19
- 1.2 Imagem artística do telescópio espacial Kepler e a constelação de Cisne, alvo da missão na busca por exoplanetas. *Créditos: NASA/JPL* 21
- 1.3 Imagem ilustrativa de um planeta atravessando em frente a uma estrela visto por um observador; este evento é chamado de trânsito. O método de trânsito é tal que detecta a diminuição do brilho da estrela ao longo do tempo decorrente do fenômeno do trânsito. Por meio deste método pode-se identificar alguns parâmetros importantes do exoplaneta: semi-eixo maior, período orbital e raio do planeta se conhecido o raio estelar. *Créditos: NASA Ames* 22
- 1.4 Gráfico de raio por período orbital dos planetas (verde) e candidatos a planetas (lilás) descobertos pela missão kepler. *Créditos: NASA/JPL* 22
- 1.5 Sistema Solar fora de escala de distância. *Créditos: NASA/JPL* 24
- 1.6 Sistema planetário Kepler-20. *Créditos: David A. Aguilar, CfA* 25
- 1.7 Comparação entre os tamanhos da Terra, Venus, Kepler-20e e Kepler-20f. *Créditos: NASA/Ames/JPL-Caltech* 25
- 1.8 Imagem ilustrativa do sistema planetário Kepler-11 em comparação com as órbitas dos planetas Mercúrio e Vênus. *Créditos: NASA/Tim Pyle* . . . 26
- 1.9 Imagem ilustrativa do sistema planetário Kepler-62 em comparação com o sistema solar interno. *Créditos: NASA Ames/JPL-Caltech* 27
- 1.10 Comparação dos tamanhos relativos de três planetas descobertos nas zonas habitáveis de suas estrelas. Da esquerda à direita temos Kepler-69c, Kepler-62e, Kepler-62f e a Terra. Note que a face dos planetas é meramente especulativa, exceto pelo planeta Terra. *Créditos: NASA Ames/JPL-Caltech* 27
- 1.11 Ilustração das regiões ao redor de uma estrela em função da temperatura. *Créditos: Erik A. Petigura* 28
- 2.1 Ilustração de um sistema planetário arbitrário constituído de N planetas cuja origem está fixada em O (Adaptado de Solar System Dynamics - Murray e Dermoff, 1999). 31

4.1	Ilustração do sistema kepler-87 visto de cima com sua zona habitável conservadora em verde claro e a ZH otimista contendo todos os tons de verde.	37
4.2	Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário kepler-87 . . .	37
4.3	Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 . . .	38
4.4	Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário Kepler-87 com a Terra hipotética	38
4.5	Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com a Terra hipotética	39
4.6	À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo para cinco simulações com a Terrahip dentro da zona habitável de Kepler-87a. Restringimos a janela para um tempo de integração de 1 milhão de anos para melhor visualização (exceto pela simulação 2 que tem uma janela de 5 milhões de anos).	40
4.7	Continuação	41
4.8	Variação temporal da excentricidade para algumas das 51 simulações . . .	43
4.9	Variação temporal do semi-eixo maior para algumas das 51 simulações . . .	44
4.10	Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior para o sistema planetário Kepler-87 com dois planetas	44
4.11	Variação temporal do semi-eixo maior do sistema Kepler-87 com os planetas b, c e os candidatos Kepler-87d e Kepler-87e	45
4.12	Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c e os candidatos a planetas Kepler-87d e Kepler-87e.	46
4.13	Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c, os candidatos Kepler-87d, Kepler-87e e a Terra hipotética	46
4.14	Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c, os candidatos Kepler-87d, Kepler-87e e a Terra hipotética	47
4.15	Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-87 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central em cinco diferentes regiões da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo para as cinco simulações.	48
4.16	Continuação	49

4.17	Variação temporal da excentricidade para algumas das 51 simulações do sistema planetário Kepler-87	50
4.18	Variação temporal do semi-eixo maior para algumas das 51 simulações . . .	51
4.19	Ilustração do sistema Kepler-62 visto de cima com sua zona habitável em verde. Vale ressaltar que apesar da aparente elipsidade da órbita dos planetas, não foram encontrados valores de excentricidade. Portanto, utilizamos órbitas circulares para todos os planetas de Kepler-62 nas simulações	52
4.20	Variação temporal do semi-eixo maior dos planetas do sistema planetário Kepler-62	53
4.21	Variação temporal da excentricidade dos planetas do sistema planetário Kepler-62	53
4.22	Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-62 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central em seis diferentes regiões da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo.	55
4.23	Continuação	56
4.24	Continuação	57
4.25	Verificação de instabilidade através da curva de colisão para as simulações 2 e 4.	57
4.26	Tempo de Sobrevivência da Terra Hipotética para o sistema planetário Kepler-62	58
4.27	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita). As simulações 2 e 12 pertencem à região próximo a Kepler-62e ao passo que as simulações 26 e 42 estão próximo a Kepler-62f.	60
4.28	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	61
4.29	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita). Terra hipotética na região estável com semi-eixo próximo de 0.5988 au	62
4.30	Variação Temporal do Semi-Eixo Maior (à esquerda) e Variação Temporal da Excentricidade (à direita). Terra Hipotética na região instável com semi-eixo 0.6 au	62

4.31	Ilustração do Sistema Kepler-30 Visto de Cima com sua Zona Habitável em Verde	64
4.32	Simulação de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-30	64
4.33	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	65
4.34	Continuação	66
4.35	Ilustração do sistema Kepler-103 visto de cima com sua zona habitável em verde	67
4.36	Simulação de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-103	68
4.37	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	69
4.38	Ilustração do sistema Kepler-289 visto de cima com sua zona habitável em verde	71
4.39	Teste de estabilidade para o sistema planetário Kepler-289	71
4.40	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	73
4.41	Sistema planetário Kepler-11 visto de cima com sua zona habitável em verde	75
4.42	à esquerda encontra-se a simulação cuja $e=0$ (mínimo) e à direita $e=0.15$ (máximo)	75
4.43	Continuação	76
4.44	Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior para o sistema planetário Kepler-11	77
4.45	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	78
4.46	Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior	79
4.47	Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).	79
4.48	Continuação	80
4.49	Continuação	81
4.50	Verificação de instabilidade dinâmica através da curva de colisão	82

4.51	Variação temporal do semi-eixo maior para os planetas do sistema planetário K2-19	84
4.52	Variação temporal da excentricidade para os planetas do sistema planetário K2-19	84
4.53	Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário K2-19 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central na região da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo.	86
5.1	Ilustração do telescópio espacial TESS que será lançado em junho de 2018. <i>Créditos: NASA/GSFC</i>	89
5.2	Ilustração do telescópio espacial JWST que será lançado em outubro de 2018. <i>Créditos: NASA/WIKIMEDIA COMMONS</i>	90

LISTA DE TABELAS

4.1	Parâmetros do sistema planetário Kepler-87	36
4.2	Parâmetros estelares derivados de espectroscopia	36
4.3	Semi-eixos e período da Terra Hipotética	39
4.4	Semi-eixos da Terra Hipotética. Note que entre duas simulações consecutivas há apenas o acréscimo do passo. Assim, não há a necessidade de mostrar os 51 valores de semi-eixo maior da Terra hipotética.	42
4.5	Parâmetros planetários utilizados nas simulações	52
4.6	Dados da estrela Kepler-62 utilizados na simulação	52
4.7	Semi-eixo maior da Terra Hipotética no sistema planetário Kepler-62	54
4.8	Semi-eixos da Terra Hipotética	58
4.9	Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-30 utilizados nas simulações	63
4.10	Parâmetros estelares	63
4.11	Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações	65
4.12	Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-103 utilizados nas simulações	66
4.13	Parâmetros estelares	66
4.14	Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações	68
4.15	Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-289 utilizados nas simulações	70
4.16	Parâmetros estelares	70
4.17	Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações	72
4.18	Dados do sistema Kepler-11	74
4.19	Parâmetros estelares	74
4.20	Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações para o sistema planetário Kepler-11	77
4.21	Parâmetros orbitais dos planetas de K2-1 utilizados nas simulações	83
4.22	Parâmetros estelares	83
4.23	Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações	85

1 Introdução

Numa tentativa de responder algumas das perguntas fundamentais relacionadas ao ser humano, em meados do século XVI haviam alguns estudiosos especulando sobre a possibilidade de existência de outros sistemas planetários tal como o sistema solar que conhecemos. Um personagem bastante interessante foi Giordano Bruno (1548-1600) que possuía uma visão de mundo bastante ousada para sua época. Mesmo sem muita base científica, Giordano Bruno era adepto do modelo copernicano e acreditava que o universo está cheio de mundos habitáveis. Naquela época não havia uma base cientificamente sólida para se afirmar sobre a existência de exoplanetas. À medida que a ciência progredia, a natureza expunha-se diante dos olhos do ser humano. A descoberta das leis que governam o movimento dos corpos bem como a compreensão dos fenômenos relacionados à natureza física da luz fez surgir diversos campos da ciência fundamentais à construção de equipamentos capazes de identificar planetas ao redor das estrelas: o telescópio. Este instrumento foi essencial para a retirada da Terra do centro do universo. As luas de Júpiter, as fases de Vênus, as crateras lunares bem como as manchas solares foram descobertas importantes que ocorreram ainda quando os telescópios não estavam bem aperfeiçoados. Ao longo dos séculos, outros modelos de telescópios foram pensados a fim de melhorar a qualidade das imagens. A partir dessas melhoras os anéis de Saturno puderam ser finalmente confirmados¹, sua maior lua, Titã, foi descoberta. Além disso, Urano e Netuno foram descoberto em 1781 e em 1846 respectivamente. Desde sua invenção, o telescópio foi capaz de revelar a verdadeira natureza do universo. É sabido que os seres humanos vivem num planeta que orbita ao redor de uma estrela, e o conjunto de todos esses planetas, luas, cometas, entre outros, compõem o chamado Sistema Solar. O nosso sistema planetário já era conhecido desde a grécia antiga, porém não com a extensão que o conhecemos atualmente. O conhecimento acerca do próprio Sistema Solar induz a busca por outros sistemas planetários. Em meados do século XX, astrônomos já buscavam por esses sistemas planetários. Apenas no final do século XX, o ser humano finalmente conseguiu provar a existência de um sistema exoplanetário; em 1992, foi confirmado o primeiro exoplaneta ao redor do pulsar PSR B1257+12 a 980 anos-luz da Terra na constelação de Virgem. Logo mais, em 1995, veio a confirmação do exoplaneta 51 Pegasi b orbitando uma estrela de sequência principal chamada 51 Pegasi. Ao longo do tempo mais planetas eram descobertos (Figura 1.1) aumentando ainda mais a popularidade desta nova área da astronomia [Chaisson and McMillan, 2002]. Podemos notar claramente que o avanço da tecnologia foi de grande importância para a descoberta de exoplanetas. Antes mesmo da descoberta do primeiro exoplaneta em 1992, já haviam dados obtidos através da técnica de velocidade radial que mostravam a possibilidade de que um planeta extra-solar orbi-

¹Galileu Galilei, e outros estudiosos já haviam percebido protuberâncias em Saturno devido ao anél, porém apenas na época do cientista Christiaan Huygens que foi possível atingir qualidade de imagem que mostrasse os anéis

tava a estrela chamada γ Cepheus-A, porém a tecnologia da época ainda não permitia confirmar o fato que teve que aguardar até 2002. De tempos em tempos uma nova missão espacial é lançada com melhores equipamentos de detecção como espectrógrafos e CCDs mais sensíveis, possibilitando a detecção de planetas mais distâtes e de tamanhos menores similares ao planeta Terra. O grande desafio tem sido encontrar planetas gêmeos da Terra na chamada zona habitável (ZH): região ao redor de uma estrela onde água líquida pode ser encontrada na superfície de planetas rochosos. Até agora, já foram lançadas as missões CoRoT (*Convection, Rotation and planetary Transits*), primeira missão dedicada à busca de exoplanetas através do método de trânsito, e a missão Kepler cujos objetivos são similares porém com um maior poder tecnológico.

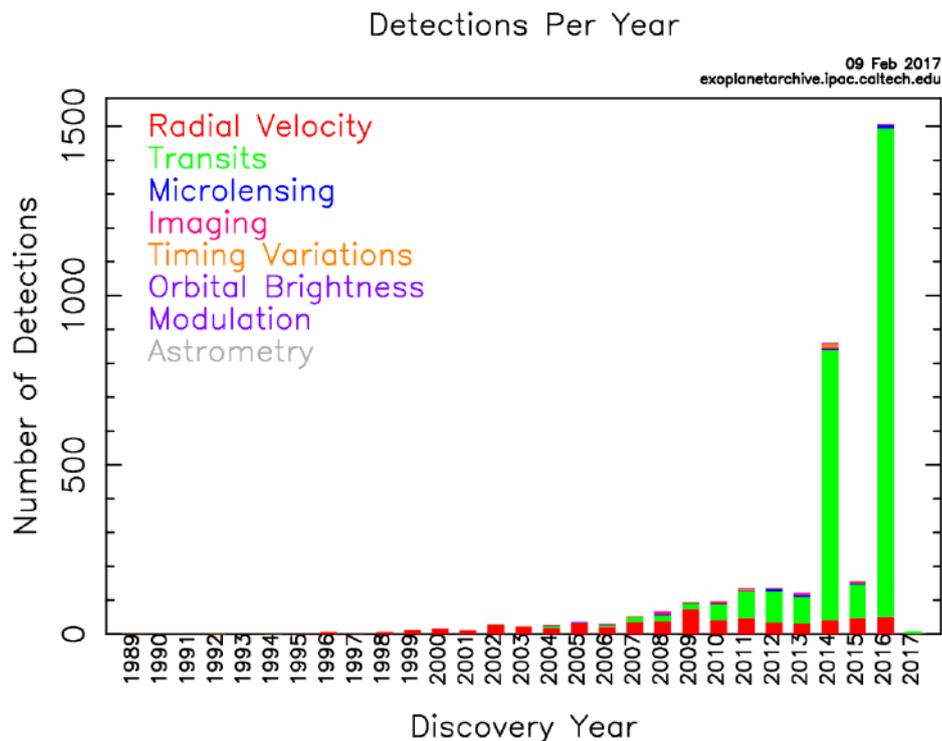


Figura 1.1: Número de exoplanetas descobertos até 2016. Cada cor representa um respectivo método de detecção de exoplanetas. O Método que mais se destaca é o método de trânsito que foi por meio do qual a missão kepler se baseou na busca por exoplanetas. *Créditos: NASA/Caltech*

Apesar da grande contribuição da missão Kepler na descoberta de sistemas extrassolares, ainda não foram detectados bastantes planetas do tipo Terra na ZH de sistemas planetários. Diversos estudos tem sido realizados a fim de mostrar que certos sistemas planetários podem hospedar planetas semelhantes à Terra na ZH de estrelas. [Jones et al., 2001] efetuou um estudo detalhado de dinâmica orbital para um conjunto de quatro sistemas planetários e concluiu que dentre os quatro Rho CrB, 47 UMa, Gliese 876 e Ups And, apenas os dois primeiros mostraram ser capazes de hospedar planetas do tipo Terra em suas zonas habitáveis. [Barnes & Raymond, 2004] realizaram um estudo

de partícula de teste, que consiste em colocar diversos corpos puntiformes sem massa no sistema. Diversas simulações foram executadas variando-se tanto os semi-eixos-maiores quanto as excentricidades das partículas de teste. Deste modo o autor conseguiu estudar quais regiões estão mais propensas a perturbações concluindo que dos cinco sistemas planetários estudados, HD 168443, HD 74156, HD 37124, HD 38529, e 55 Cnc, os dois primeiros ejetam as partículas de teste dentro de 2 milhões de anos ao passo que nos últimos três sistemas planetários, as partículas sobrevivem por 10 milhões de anos. Outros autores realizaram estudos semelhantes de teste de partícula. [Rivera & Haghighipour, 2007] estudaram os sistemas planetários *v* Andromedae, GJ 876, 47 UMa e 55 Cnc utilizando um algoritmo de ajuste de velocidade radial mais recente para a época. Nesse trabalho, os autores estudam a estabilidade de planetas rochosos de massa entre Terra e Vênus na ZH dos sistemas planetários e concluem que 47 UMa e 55 Cnc são os únicos quatro que podem hospedar planetas rochosos nas ZHs das estrelas. Além disso, os autores evidenciam que o último planeta descoberto do sistema planetário GJ 876 (GJ 876e) tem órbita instável. Podemos notar que o estudo de dinâmica orbital exerce um papel fundamental na busca por planetas do tipo Terra nos sistemas planetários. Estudando a dinâmica de um sistema planetário, podemos analisar se os planetas estão em órbitas estáveis/instáveis além de mostrar que um planeta gêmeo da Terra tem condições (ou não) de habitar em determinadas regiões onde as missões espaciais ainda não são capazes de detectar planetas. Desse modo, futuras missões poderão buscar planetas semelhantes à Terra nos sistemas planetários onde um estudo de análise dinâmica indicou estabilidade para um planeta que poderia sustentar vida como conhecemos. Tanto a análise de estabilidade dinâmica de sistemas planetários quanto o estudo da possibilidade de existência de planetas do tipo Terra em ZHs de estrelas serão abordados no nossos estudos.

1.1 Missão Kepler

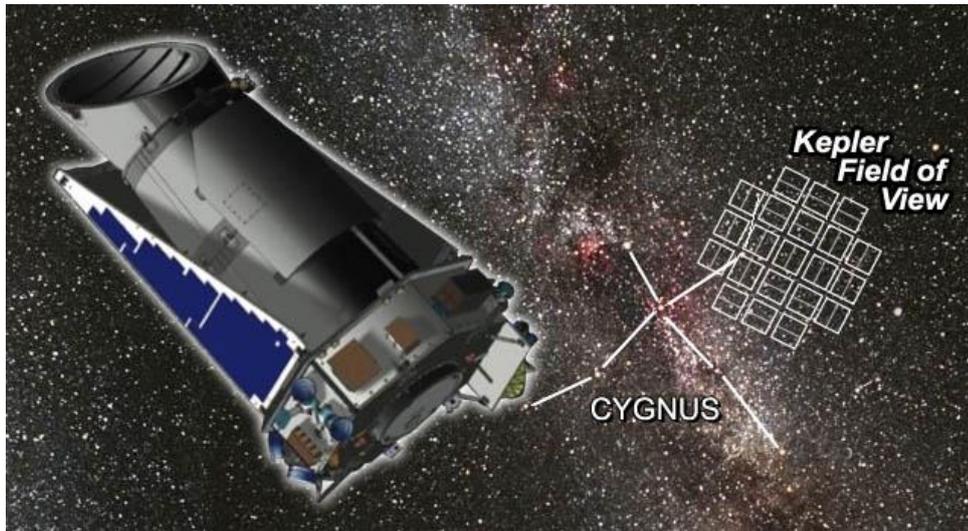


Figura 1.2: Imagem artística do telescópio espacial Kepler e a constelação de Cisne, alvo da missão na busca por exoplanetas. *Créditos: NASA/JPL*

A missão Kepler (Figura 1.2) foi lançada em março de 2009, tendo como objetivo identificar sistemas planetários pelo método de trânsito (Figura 1.3). O ponto principal da missão era a detecção de exoplanetas que poderiam estar orbitando na zona habitável de algumas das cerca de 150 mil estrelas de sequência principal na região da constelação de Cisne e Lira. Antes da missão Kepler (Figura 1.1) haviam menos de 100 planetas descobertos, muitos dos quais pertenciam ao grupo de planetas gasosos nomeados Júpiteres quentes, pois orbitam próximos de suas estrelas (em comparação à órbita de Mercúrio) e possuem massa similar a de Júpiter. Nos primeiros resultados vindos da missão Kepler, já foi possível detectar uma grande quantidade de planetas extra-solares cujos raios são de tamanhos do raio de Netuno até raios entre $1-10 R_{\oplus}$. Estes planetas são chamados de Super-Terras devido a proximidade de tamanho com o planeta Terra (Figura 1.4). Logo após alguns anos de funcionamento, a missão começou a apresentar problemas que impossibilitaram o telescópio de manter um apontamento fixo na região da constelação de Cisne, portanto a missão teve de ser rearranjada para que o alto custo embutido não fosse perdido, logo surgiu a missão K2. A missão Kepler e K2 trouxeram uma nova perspectiva no que tange o conhecimento estrutural e dinâmico de sistemas planetários. Atualmente possuímos bastantes dados se comparado com o que tínhamos há cerca de 20 anos. Até 2008, era sabido da existência de menos de 100 planetas extra-solares, no ano de 2014 foram confirmados pouco mais de 800 planetas de uma vez - um aumento de cerca de 800% no número de exoplanetas descobertos - e neste ano de 2017, dia 11 de fevereiro, 3.449 planetas e 577 sistemas planetários foram confirmados. Ainda há cerca de 4.696 candidatos a exoplanetas na lista de espera, estes apenas da missão Kepler (*NASA Exoplanet Archive*). Os astrônomos achavam que o sistema solar era ordinário, porém após

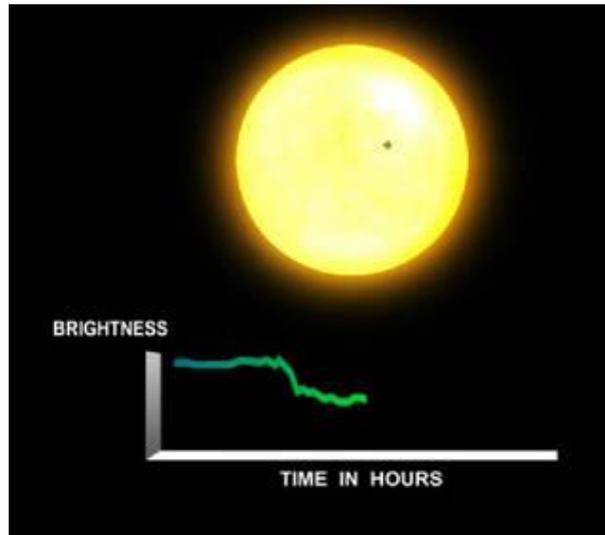


Figura 1.3: Imagem ilustrativa de um planeta atravessando em frente a uma estrela visto por um observador; este evento é chamado de trânsito. O método de trânsito é tal que detecta a diminuição do brilho da estrela ao longo do tempo decorrente do fenômeno do trânsito. Por meio deste método pode-se identificar alguns parâmetros importantes do exoplaneta: semi-eixo maior, período orbital e raio do planeta se conhecido o raio estelar. *Créditos: NASA Ames*

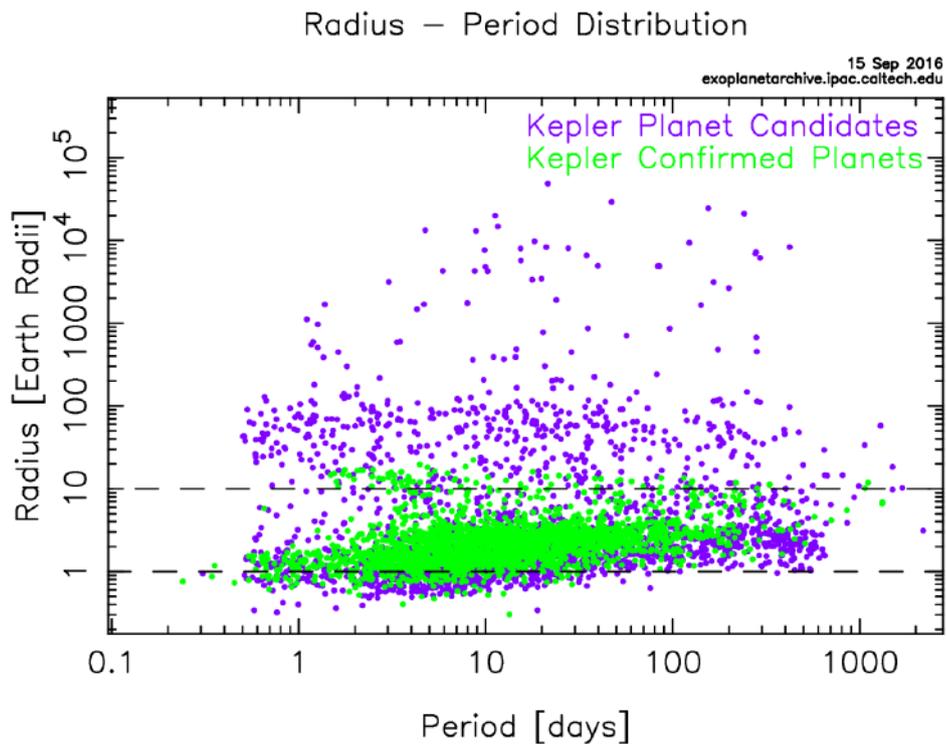


Figura 1.4: Gráfico de raio por período orbital dos planetas (verde) e candidatos a planetas (lilás) descobertos pela missão kepler. *Créditos: NASA/JPL*

a missão Kepler, diversos tipos de configurações de sistemas planetários foram descobertos pondo a teste não apenas a banalidade no que se refere ao nosso sistema solar mas também o próprio modelo de formação de sistemas planetários. O método de trânsito utilizado pela missão Kepler (descrito na Figura 1.3) é baseado em fotometria, ou seja, a cada 30 segundos o Kepler faz imagens das estrelas onde através delas é possível identificar o brilho das estrelas. Este método é bastante importante pois extrai informações relevantes como o semi-eixo maior, período orbital e raio planetário. No entanto, há diversos outros meios de detecção que vem sendo utilizado juntamente com o Kepler a fim de descobrir mais parâmetros relevantes como: excentricidades, obliquidade da órbita e massa para os planetas já conhecidos. Além disso, por meio dessa atuação conjunta de métodos de detecção mais planetas são descobertos. Alguns desses métodos de detecção são: o de velocidade radial que consiste em estudar a estrela central a fim de detectar perturbações causadas por planetas, uma vez que a interação entre ambos faz a estrela movimentar-se levemente causando mudanças nas linhas espectrais da estrela. É possível descobrir mais de um planeta ao redor da estrela central, além de determinar a excentricidade e massa planetária na maioria dos casos. O método TTV (*transit-timing variation*) analisa precisamente o momento do trânsito de um planeta descoberto em busca de um outro desconhecido. Devido a interação entre os planetas do sistema planetário, um planeta não descoberto perturba o já conhecido fazendo com que haja uma leve variação no tempo de trânsito. Deste modo é possível inferir que existe um outro planeta no sistema planetário. O telescópio espacial Hubble utiliza a astrometria. Este método observa a posição exata da estrela no céu. Ao longo do tempo, na presença de um planeta, a estrela move-se pelo plano do céu numa composição de dois movimentos, um causado pelo seu movimento próprio e o outro causado pela perturbação do planeta. Uma estrela sem planetas movimenta-se em linha reta. Através do movimento estelar é possível detectar a presença de um planeta através da astrometria. Há também o método de imageamento, lentes gravitacionais, entre outros. A utilização em conjunto desses métodos de detecção favorece o descobrimento de mais planetas e parâmetros importantes de massa, excentricidade, semi-eixo maior, etc. Além disso, um maior número de métodos utilizados diminui as chances de detecção de falsos-positivos, ou seja, sinais que parecem ser provenientes de planetas porém sua natureza é outra.

1.2 Sistemas Planetários



Figura 1.5: Sistema Solar fora de escala de distância. *Créditos: NASA/JPL*

Até antes das descobertas de outros sistemas planetários, o Sistema Solar (Figura 1.5) era visto como comum. No entanto, a descoberta dos mais de 500 sistemas planetários ocorrida nesta década mostra que talvez não seja verdade que o Sistema Solar seja tão genérico na nossa galáxia. Dentre os diversos sistemas planetários descobertos, alguns são bem diferentes entre si.

1- **Kepler-20** possui planetas orbitando a estrela central Kepler-20a a uma distância inferior a distância de Mercúrio com relação ao Sol, isso equivale a dizer que todo o sistema planetário caberia dentro da órbita de Mercúrio. Além disso, os planetas parecem assumir um certo padrão de tamanho, do mais interno ao mais externo, há uma alternância de planeta grande e pequeno (Figura 1.6). Kepler-20f (Figura 1.7) foi o primeiro planeta de tamanho similar à Terra a ser descoberto e apesar de não pertencer a ZH da sua estrela, há uma discussão sobre este planeta possuir uma atmosfera [Fressin et al., 2011].

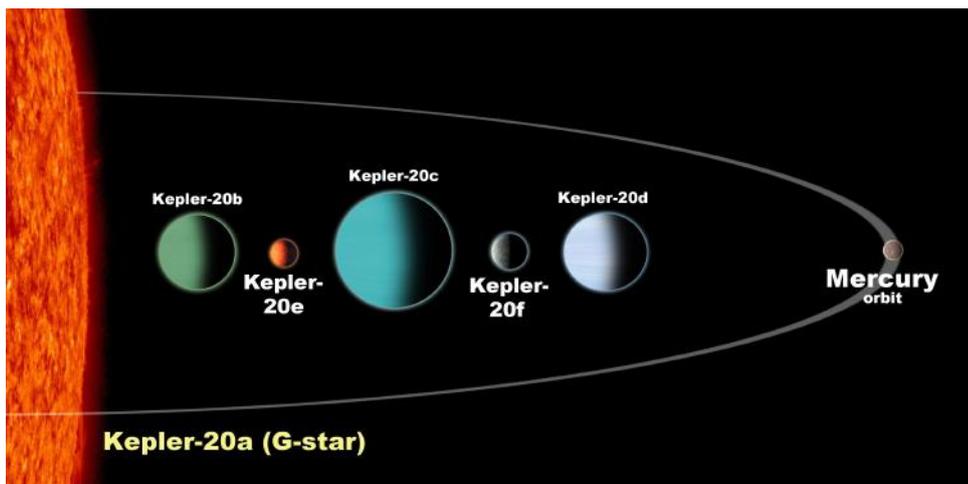


Figura 1.6: Sistema planetário Kepler-20. *Créditos: David A. Aguilar, CfA*

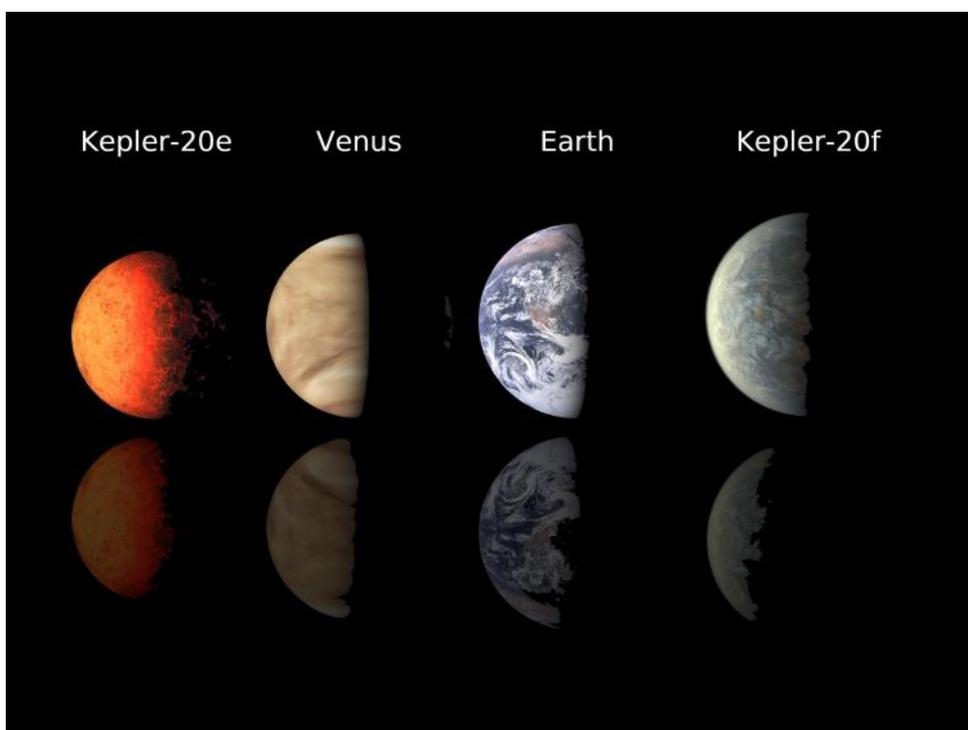


Figura 1.7: Comparação entre os tamanhos da Terra, Venus, Kepler-20e e Kepler-20f. *Créditos: NASA/Ames/JPL-Caltech*

2- **Kepler-11** (Figura 1.8) é um sistema planetário formado por uma estrela similar ao Sol orbitada por seis planetas, todos os planetas estão fora da região da zona habitável. Os seis planetas possuem raios de tamanhos que variam entre os raios de super-terras e Netunos. Além disso, os planetas estão numa órbita compacta que caberia dentro da órbita de Mercúrio exceto por Kepler-11g que encontra-se um pouco mais distante entre as órbitas de Mercúrio e Vênus [Lissauer et al., 2013]. Até o momento, não há registro de planetas na sua zona habitável, o que nos fez indagar acerca da possibilidade de existência de um planeta terrestre na ZH da estrela (Capítulo 4 secção 6).

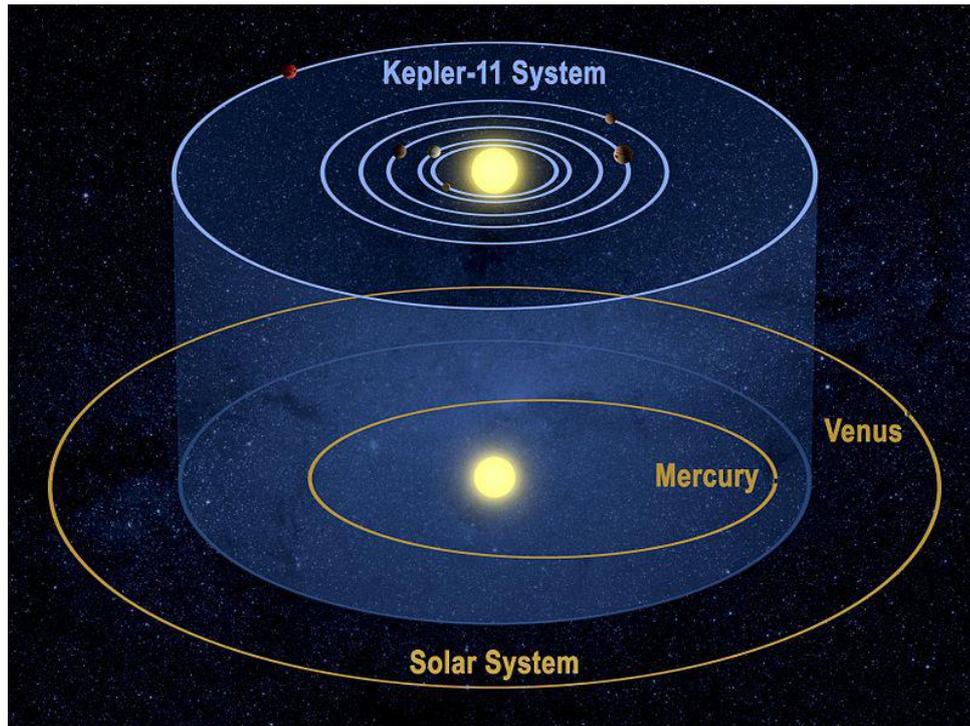


Figura 1.8: Imagem ilustrativa do sistema planetário Kepler-11 em comparação com as órbitas dos planetas Mercúrio e Vênus. *Créditos: NASA/Tim Pyle*

3- **Kepler-62** (Figura 1.9) é uma estrela relativamente fria de raio inferior ao do Sol. Está a uma distância de aproximadamente 1.200 anos-luz da Terra e possui cinco planetas cujos raios estão na faixa de 0.5-2.0 raios terrestres, o que implica na possibilidade de todos os planetas serem do tipo rochoso (Figura 1.10). Dois desses planetas, Kepler-62e e Kepler-62f orbitam na zona habitável da estrela, podendo haver água líquida em suas superfícies [Borucki et al., 2013]. Um fator interessante é a existência de uma faixa relativamente grande entre Kepler-62e e Kepler-62f, isto pode indicar que um planeta de baixa massa não detectado teria alguma possibilidade de orbitar entre estes planetas. Partindo-se desta premissa estudamos a dinâmica deste sistema planetário a fim de analisar a possibilidade de que um planeta do tipo Terra pudesse orbitar não apenas entre Kepler-62e e f mas também em outras regiões da ZH (Capítulo 4 seção 2).

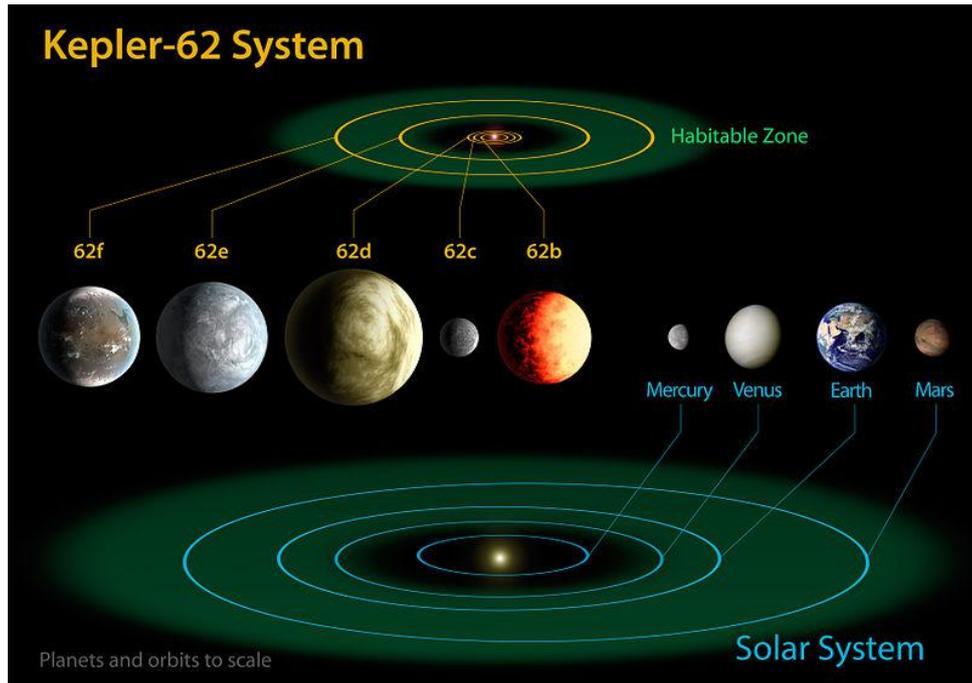


Figura 1.9: Imagem ilustrativa do sistema planetário Kepler-62 em comparação com o sistema solar interno. *Créditos: NASA Ames/JPL-Caltech*

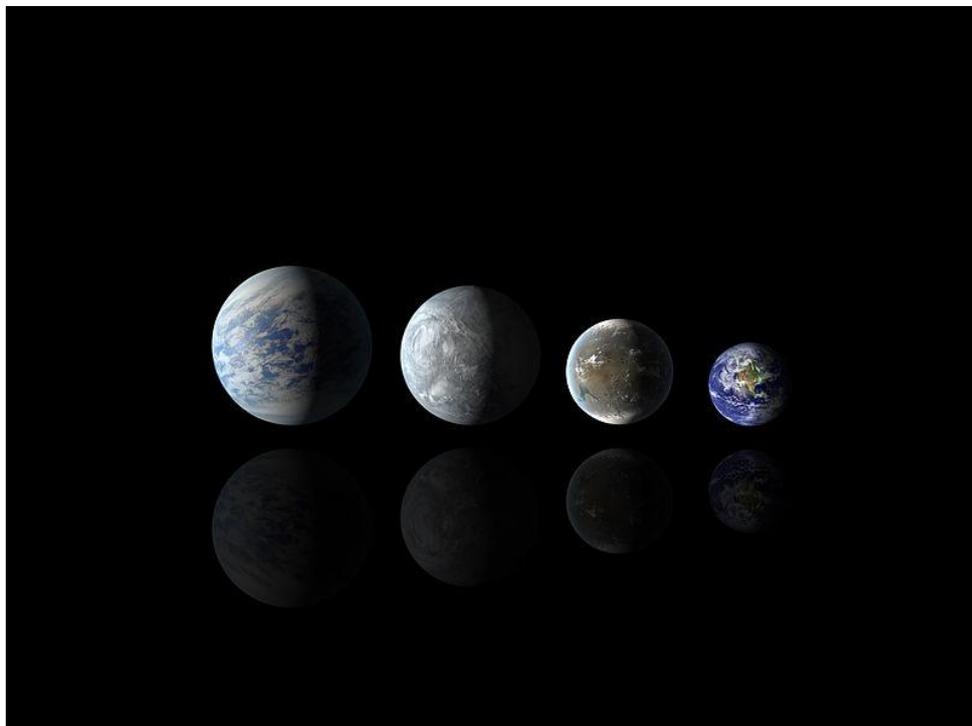


Figura 1.10: Comparação dos tamanhos relativos de três planetas descobertos nas zonas habitáveis de suas estrelas. Da esquerda à direita temos Kepler-69c, Kepler-62e, Kepler-62f e a Terra. Note que a face dos planetas é meramente especulativa, exceto pelo planeta Terra. *Créditos: NASA Ames/JPL-Caltech*

Além desses três exemplos de sistemas planetários distintos do Sistema Solar, existem alguns sistemas cujos planetas destacam-se por outros aspectos. **HD 80606b** possui uma alta excentricidade; **WASP-33b** orbita sua estrela no sentido retrógrado. Já foram encontrados até mesmo planetas de massa similar a de Júpiter que orbitam suas estrelas muito próximo (a $\lesssim 0.1$ UA) e por isso sofrem grandes efeitos de maré, além de incharem devido à elevada incidência de luz estelar. Tais características como: planetas de alta massa orbitando uma estrela tão próxima ou uma ordenação de planetas como no sistema Kepler-20 não era previsto nos modelos de formação de sistemas planetários, porém o fato desses planetas estarem a menos de 0.1 UA pode ter algo a ver com uma eventual migração ao longo do período de formação deles. A descoberta de sistemas planetários é fundamental para que possamos testar todas essas teorias na prática.

1.3 Habitabilidade



Figura 1.11: Ilustração das regiões ao redor de uma estrela em função da temperatura. *Créditos: Erik A. Petigura*

A habitabilidade é parte integrante dos nossos estudos, principalmente no que se refere à análise dinâmica de sistemas planetários. Pretendemos mostrar que para um conjunto de sistemas planetários existem faixas de estabilidade nas zonas habitáveis de alguns deles. Ecoesfera ou zona de habitabilidade são termos utilizados para definir uma certa região onde o fluxo de energia proveniente da estrela é tal que um planeta que recebe tal energia teria uma temperatura suficientemente alta para que água líquida pudesse ser encontrada na superfície. O planeta Terra encontra-se exatamente nesta faixa habitável, Vênus um pouco fora e Marte dentro porém mais afastado. Para podermos estudar a dinâmica de um planeta que esteja na ZH de uma estrela, e efetuamos o cálculo da ZH da estrela central dos sistemas planetários através das equações

abaixo[Underwood et al., 2003].

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_{eff}^4 \quad (1.1)$$

$$S_{interior} = 4.190 \times 10^{-8} T_{eff}^2 - 2.139 \times 10^{-4} T_{eff} + 1.268 \quad (1.2)$$

$$S_{exterior} = 6.190 \times 10^{-9} T_{eff}^2 - 1.319 \times 10^{-5} T_{eff} + 0.2341 \quad (1.3)$$

$$r_{interior} = \sqrt{\frac{L_*}{S_{interior}}} \quad (1.4)$$

$$r_{exterior} = \sqrt{\frac{L_*}{S_{exterior}}}, \quad (1.5)$$

onde L_* , R_* e T_{eff} são a luminosidade, raio e temperatura efetiva da estrela. σ , $S_{interior}$, $S_{exterior}$, são a constante de Stefan-Boltzmann, fluxo estelar na região interna e externa da ZH e $r_{interior}$, $r_{exterior}$, são as distâncias da estrela até a borda interna e externa da ZH estelar. O conceito de habitabilidade não implica que necessariamente um planeta orbitando uma estrela nesta região será habitável ou haverá formação de água líquida na superfície do planeta, apenas que: para determinadas condições, água líquida poderá ser formada. Um planeta além de estar na ZH, precisa ter capturado gás nos estágios iniciais de protoplaneta para formar uma atmosfera que possa, por meio de mecanismos como o efeito estufa, aquecer-se. A massa do planeta é fundamental neste processo uma vez que planetas de baixa massa ($M_p \leq 1M_{\oplus}$) geralmente capturam pouco gás e, portanto, podem possuir uma atmosfera tênue que não seria capaz de manter um aquecimento suficiente através do efeito estufa para formar água líquida na superfície. Além da massa do planeta, se ele estiver muito inclinado com relação ao plano da órbita, levando em consideração planetas de período $T_p \approx T_{\oplus}$ ou maior, uma parte do planeta receberá luz solar com menor intensidade por um longo tempo, ao passo que a outra parte ficaria exposto a uma grande incidência de luz; logo o planeta orbitar na zona habitável não necessariamente implica que ele fornecerá um ambiente completamente propício ao surgimento de vida. A excentricidade do planeta também não deve ser muito alta ($e \geq 0.1 - 0.2$, pois assim haveria mudanças drásticas de temperatura, velocidade dos ventos, nível do oceano entre outros. Os planetas precisam ter certos parâmetros orbitais para que a vida possa florescer sobre a superfície, por outro lado, as estrelas também precisam possuir 'bons' parâmetros. Estrelas de baixa massa (tipo espectral K e M por exemplo) possuem zonas habitáveis mais próximas, deste modo, um planeta do tipo terrestre poderia sofrer efeitos de maré que o deixaria com uma face voltada para a estrela permanentemente, elevando a temperatura de uma face do planeta e deixando a outra face a temperaturas extremamente baixas em alguns casos. Além disso, o planeta receberia grandes quantidades de radiação letal à vida, caso sua atmosfera não seja composta de gases que absorvam radiações tal como as de raios-x e ultravioleta. Já estrelas de alta massa (tipo espectral O e B por exemplo)

possuem zonas habitáveis mais distantes, porém, não possuem tempo suficiente para que um planeta possa ser formado na ZH, uma vez que estas estrelas possuem pouco tempo de vida se comparado ao tempo de vida de estrelas de tipo espectral A em diante. Portanto, caso o planeta não possua os valores adequados de excentricidade, semi-eixo, inclinação, massa, entre outros e/ou as estrelas não sejam adequadas, a vida como a conhecemos não poderia surgir na superfície de um planeta.

2 O Modelo

Todo o movimento planetário obedece certas leis fundamentais da natureza. Descreveremos aqui as equações de movimento de um sistema planetário que constituem o nosso modelo utilizado.

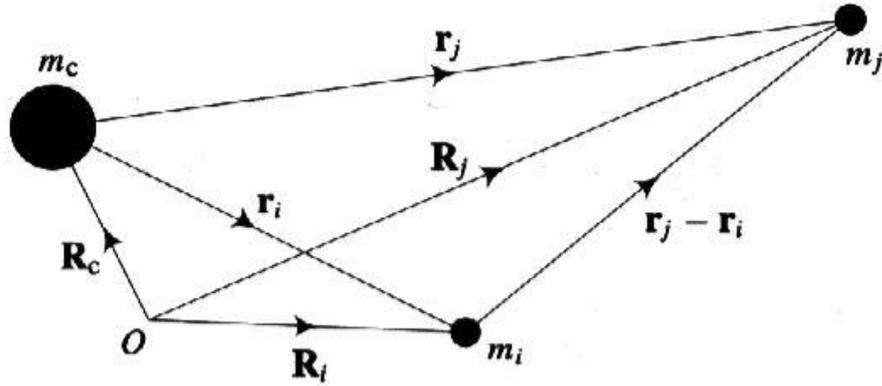


Figura 2.1: Ilustração de um sistema planetário arbitrário constituído de N planetas cuja origem está fixada em O (Adaptado de Solar System Dynamics - Murray e Dermoff, 1999).

O problema de dois corpos é um caso particular onde podemos resolver as equações do movimento. Para este caso, podemos obter alguns parâmetros como o semi-eixo maior e a excentricidade que serão constantes uma vez que não há perturbação de outros corpos. Para o caso onde lidamos com um sistema planetário de 3 ou mais corpos, não há soluções analíticas para as equações do movimento. A interação mútua entre os planetas do sistema planetário causará uma aceleração extra e portanto os elementos orbitais não mais serão constantes. Apesar do problema de 3 ou mais corpos ter de ser resolvido numericamente, há, por meio de aproximações, a possibilidade de se obter alguns resultados analíticos por meio da expansão da chamada função perturbadora.

2.1 As Equações do Movimento

A figura 2.1 mostra um caso arbitrário de um sistema com N corpos, em que apenas dois são mostrados: o planeta i e j além do corpo celeste de maior massa que chamaremos de estrela. A letra "m" será utilizada para denominar as massas dos corpos ao passo que " R_n " e " r_n " são, respectivamente, os vetores posição do planeta n com relação à origem "O" e os vetores posição do planeta n com relação aos outros planetas do sistema. Pela 2ª lei de Newton e lei da gravitação universal:

$$\mathbf{F}_g = \frac{-GMm\mathbf{r}}{r^3} \quad (2.1)$$

e definindo as distâncias entre estrela-planeta e planeta-planeta:

$$|\mathbf{r}_i| = r_i = (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{1/2} \quad (2.2)$$

$$|\mathbf{r}_j| = r_j = (x_j^2 + y_j^2 + z_j^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{1/2}, \quad (2.4)$$

podemos escrever as equações do movimento planetário a partir das leis de Newton e da lei da gravitação universal:

$$m_c \ddot{\mathbf{R}}_c = Gm_c m_i \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} + Gm_c m_j \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \quad (2.5)$$

$$m_i \ddot{\mathbf{R}}_i = Gm_i m_j \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3} - Gm_i m_c \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} \quad (2.6)$$

$$m_j \ddot{\mathbf{R}}_j = Gm_j m_i \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} - Gm_j m_c \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \quad (2.7)$$

Observe que adotamos os vetores como positivo na direção radial e sentido centrífugo. Assim, na equação 2.7 trocamos os vetores r_i e r_j de posição devido ao sinal negativo. De acordo com a figura 2.1, aplicando o operador derivada duas vezes na relação entre os vetores posição, obtemos os vetores aceleração:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = \ddot{\mathbf{R}}_i - \ddot{\mathbf{R}}_c \quad (2.8)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_j = \ddot{\mathbf{R}}_j - \ddot{\mathbf{R}}_c \quad (2.9)$$

Substituindo as equações 2.8 e 2.9 nas equações de movimento e reorganizando, poderemos eliminar a dependência relacionada aos vetores posição com origem em "O". As novas equações podem ser escritas como:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i + G(m_c + m_i) \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} = Gm_j \left(\frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3} - \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \right) \quad (2.10)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_j + G(m_c + m_j) \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} = Gm_i \left(\frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} - \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} \right) \quad (2.11)$$

Note que, no caso de N-corpos, nas equações do movimento 2.10 e 2.10, para a massa "i" e "j", mais termos apareceriam à direita; além disso, teríamos duas equações apenas, mas n-1 equações. No caso particular de apenas uma estrela e um planeta (m_i), na equação 2.10, m_j seria zero e a soma da massa da estrela e do planeta m_i seria aproximadamente a massa da estrela, logo teríamos a equação de movimento simples de um planeta ao redor de uma estrela. As equações (2.10) e (2.11) são as equações exatas do movimento para os planetas i e j. Devido à impossibilidade de serem resolvidas de forma analítica, é preciso

usar o recurso de integradores numéricos para obter a variação de posições e velocidades. Estes integradores numéricos ainda oferecem a possibilidade de transformação de posições e velocidades em elementos orbitais, possibilitando assim obter os resultados da evolução orbital do sistema completo.

3 Metodologia

3.1 Seleção de Sistemas Planetários

A princípio, fizemos uma garimpagem nos diversos bancos de dados de exoplanetas existentes cuja principal função é catalogar os numerosos sistemas planetários descobertos. Concedemos preferência aos sistemas planetários que possuem maior quantidade de dados publicados, como a massa, semi-eixo maior, excentricidade, entre outros. No caso de não haver valores de massa, utilizamos a relação entre raio e massa [Weiss and Marcy, 2014] e (Lissauer et al. 2012) para calcular as massas dos planetas através de seus respectivos raios obtidos através dos trânsitos. Alguns sistemas planetários possuem planetas cujo valor de massa possui apenas um limite superior, nesses casos utilizamos o valor da massa planetário no limite máximo.

3.2 MERCURY

O programa MERCURY é descrito como "um integrador simpléctico híbrido que permite encontros próximos entre corpos de alta massa" (Chambers, J. E. 1999) e foi programado para calcular os valores dos elementos orbitais dos planetas ao longo do tempo num campo gravitacional de um corpo central, podendo este ser uma estrela ou até mesmo um planeta tal como Júpiter e seu conjunto de satélites. Utilizamos esse *software* para resolver as equações de N corpos para casos onde o valor de N gira em torno de 5-10 planetas. Utilizamos o sistema de coordenadas astrocêntricas onde os elementos orbitais são: semi-eixo maior (a) em unidades astronômicas (au), excentricidade (e), inclinação (i) em graus, longitude do pericentro (g) em graus, longitude do nodo ascendente (n) e a anomalia média (M) em graus. Sempre que não há informações completas adotamos o valor padrão zero para os elementos g , n e M . Na ausência de outros dados como raio de Hill, densidade planetária, entre outros deixamos os valores padrões adotados pelo programa. Utilizamos o passo de integração como sendo $(1/20)$ do menor período (T) dos planetas do sistema planetário tal como é utilizado na literatura de forma constante. O parâmetro passo de integração (*steptime*) do MERCURY está relacionado à incerteza no momento da integração numérica das equações do movimento. Realizamos simulações cujo tempo de integração é de 1 milhão de anos e, caso haja uma possível instabilidade, expandiremos o tempo de integração de acordo com a necessidade.

3.3 Planeta Hipotético

Após a constatação de que os planetas de um sistema planetário possuem órbitas estáveis, calculamos a zona habitável da estrela e inserimos um planeta hipotético com a

mesma massa e densidade do planeta Terra nesta região. Sabendo-se o tamanho da região de habitabilidade (Δa_{ZH}), calculamos o que chamaremos de passo, que possui valor fixo e será utilizado para executar diversas integrações ao longo da ZH. O passo é um pequeno incremento que será adicionado ao semi-eixo da Terra hipotética para cada simulação, por exemplo, na simulação 1 a Terra possui semi-eixo maior a , na simulação 2, semi-eixo $a+\text{passo}$, na simulação 3, semi-eixo $a+2*\text{passo}$, e assim por diante até a Terra hipotética orbitar a fronteira externa da ZH. Um número razoável de simulações seria entre 5-10 simulações, porém, eventualmente este número será aumentado caso regiões instáveis ou indícios de perturbações mais acentuadas surjam.

3.4 Curva de Colisão

Após a realização das simulações, analisamos os casos de instabilidade a partir das **curvas de colisão**. Seja um sistema planetário qualquer com N planetas, para dois planetas próximos, onde Q_b é a distância apocêntrica do planeta b , dado pela equação (3.1), e q_c a distância pericêntrica do planeta c , dado pela equação (3.2). Quando a distância apocêntrica do planeta b aproxima-se da distância pericêntrica do planeta c , ou seja, $Q_b \approx q_c$, e dependendo da configuração orbital, existe maior risco de encontros próximos, entre os planetas.

$$Q_b = a_b(1 + e_b) \quad (3.1)$$

$$q_c = a_c(1 - e_c) \quad (3.2)$$

$$e_c \approx 1 - (1 + e_b) \frac{a_b}{a_c} \quad (3.3)$$

Assim, igualando (3.1) a (3.2) e isolando e_c temos a equação (3.3) que é chamada de curva de colisão. Criando gráficos de e_c VS e_b a partir dos resultados das simulações numéricas, e inserindo a curva de colisão podemos mostrar que num sistema instável necessariamente haverá pontos acima da curva, e para sistemas estáveis todos os pontos estarão localizados abaixo da curva.

4 Resultados

4.1 Kepler-87

O sistema planetário Kepler-87 (Figura 4.1) é composto por dois planetas confirmados e dois candidatos a planetas (Kepler-87c e Kepler-87d). Sua estrela possui massa similar ao Sol e o dobro do raio aproximadamente. Com o intuito de analisar a estabilidade do sistema, realizamos simulações utilizando os dados das tabelas 4.1 e 4.2 [Ofir et al., 2014] para Kepler-87b e Kepler-87c onde o tempo de integração foi de 10 milhões de anos. Observando a Figura 4.2 e Figura 4.3, não notamos qualquer indício de instabilidade pois as excentricidades oscilam com pequena amplitude ao redor dos respectivos valores médios e os semi-eixos maiores permanecem quase invariantes.

Tabela 4.1: Parâmetros do sistema planetário Kepler-87

Planetas	a [au]	e	Massa M_{\oplus}	Raio [R_{\oplus}]
Kepler-87b	0.471	0.036	324.2	13.49
Kepler-87c	0.664	0.039	6.4	6.14
Kepler-87d	0.0660	-	-	1.68
Kepler-87e	0.0880	-	-	1.93

Tabela 4.2: Parâmetros estelares derivados de espectroscopia

Estrela Central	Massa M_{\odot}	Raio [R_{\odot}]	Idade [Gyr]
Kepler-87a	1.1 ± 0.05	1.82 ± 0.04	7-8

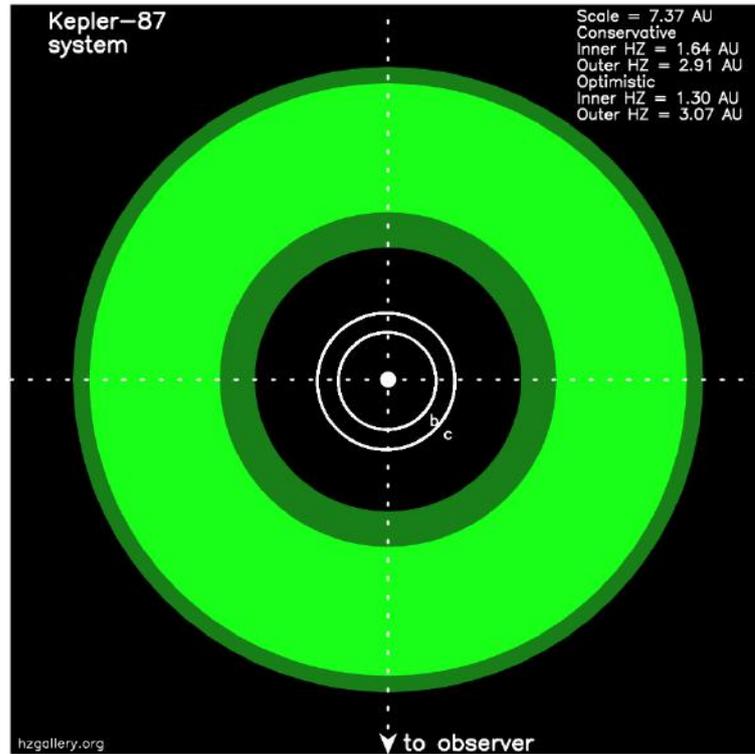


Figura 4.1: Ilustração do sistema kepler-87 visto de cima com sua zona habitável conservadora em verde claro e a ZH otimista contendo todos os tons de verde.

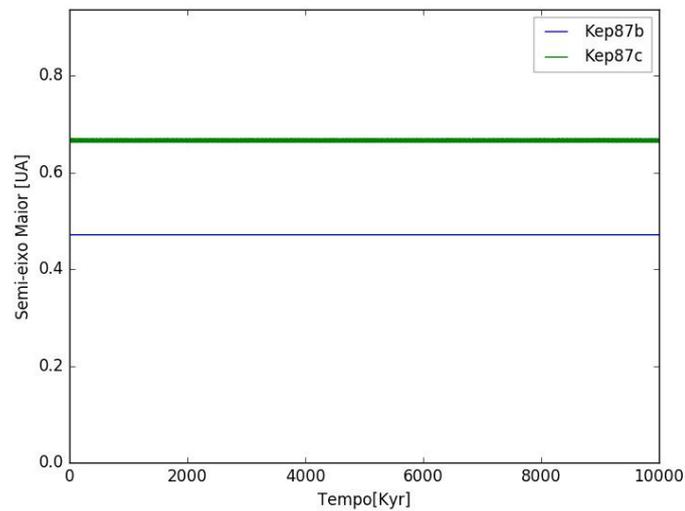


Figura 4.2: Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário kepler-87

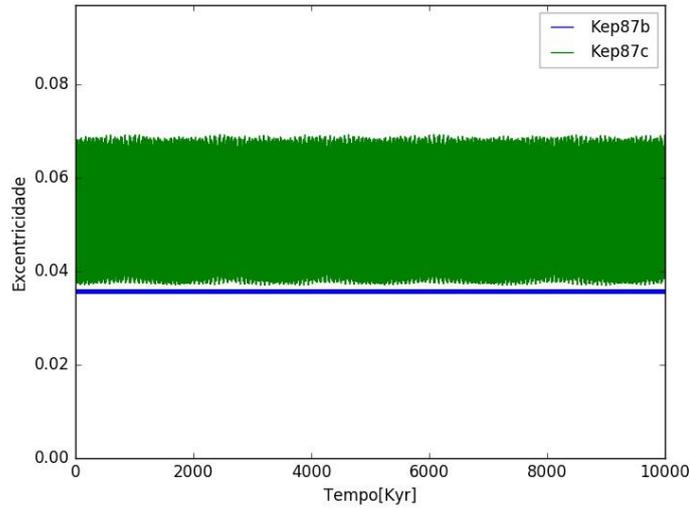


Figura 4.3: Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87

Como o sistema é estável, analisaremos a dinâmica do sistema planetário após inserir um planeta similar à Terra chamado de **Terrahip**; sua excentricidade inicial será nula. Nossos estudos serão restringidos à zona habitável da estrela central (Figura 4.1) a fim de mostrar em quais regiões da ZH existe a possibilidade de que um planeta extrassolar do tipo Terra permaneça estável. A princípio, realizamos uma simulação de 10 milhões de anos para observar o comportamento da Terrahip além do sistema planetário como um todo. Podemos notar que o comportamento do semi-eixo maior e a excentricidade é regular para todos os planetas do sistema incluindo a Terra hipotética (Figura 4.4 e Figura 4.5).

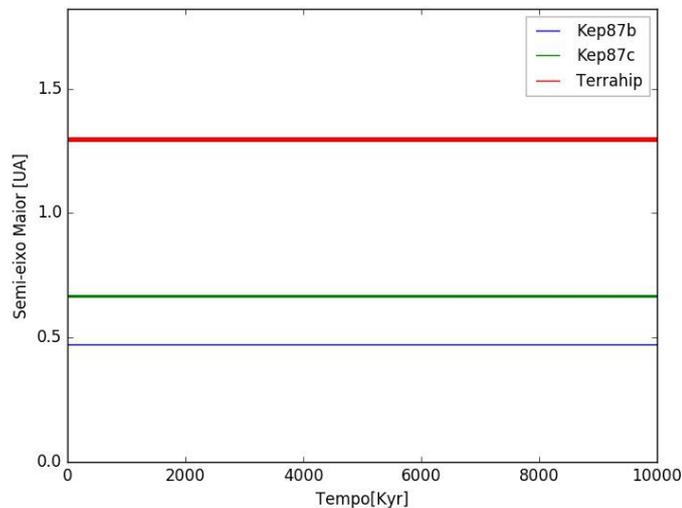


Figura 4.4: Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário Kepler-87 com a Terra hipotética

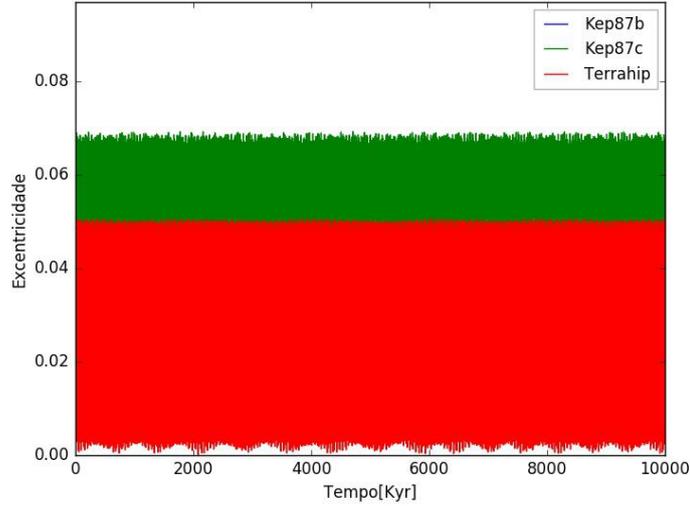


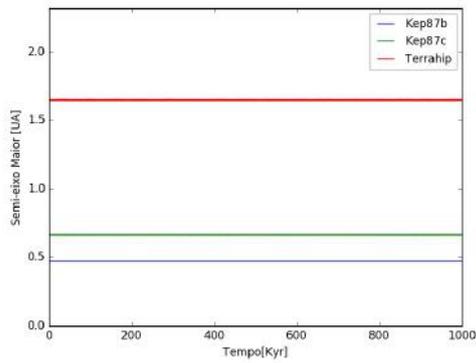
Figura 4.5: Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com a Terra hipotética

Conforme a metodologia adotada, calculamos um passo e fizemos mais simulações variando o semi-eixo da Terra hipotética. A Tabela 4.3 representa os valores dos semi-eixos utilizados nestas simulações. Inicialmente realizamos apenas cinco integrações ao longo de toda a ZH a fim de identificar regiões de instabilidade. Para estas cinco simulações utilizamos um passo $\Delta a_{ZH} = 0.354$ au. Todas as integrações possuem um tempo de 10 milhões² de anos onde não encontramos qualquer instabilidade para um planeta terrestre orbitando na zona habitável deste sistema planetário considerando órbitas circulares e coplanares. Apesar do sistema ser estável (Figuras 4.6 e 4.7), notamos que a simulação 2(d) possui uma excentricidade um pouco mais elevada se comparada às outras simulações. A explicação deste comportamento, associado a fenômenos de perturbação mútua entre os planetas, está fora do alcance deste trabalho e será abordada em próximas pesquisas.

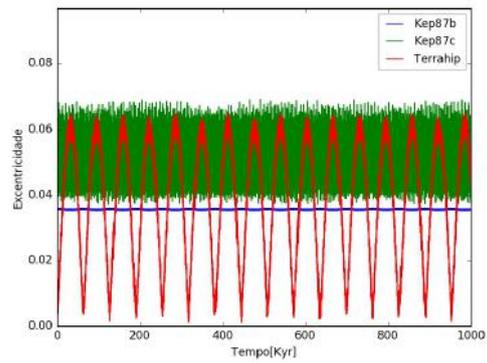
Tabela 4.3: Semi-eixos e período da Terra Hipotética

-	a [au]	T (yrs)
Simulação 1	1.654	2.231
Simulação 2	2.008	2.984
Simulação 3	2.362	3.807
Simulação 4	2.716	4.695
Simulação 5	3.070	5.642

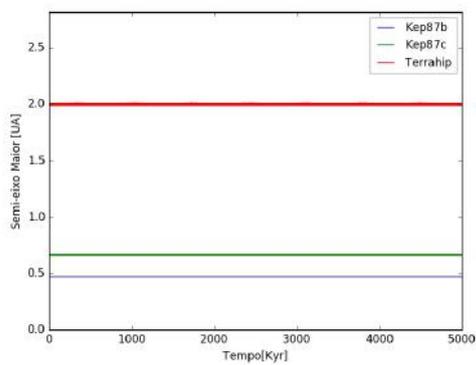
²Apenas este sistema planetário foi rodado para 10 milhões de anos. Devido ao tempo elevado para executar as simulações (2-3 semanas), restringimos o tempo para 1 milhão de anos para a execução dos próximos sistemas planetários.



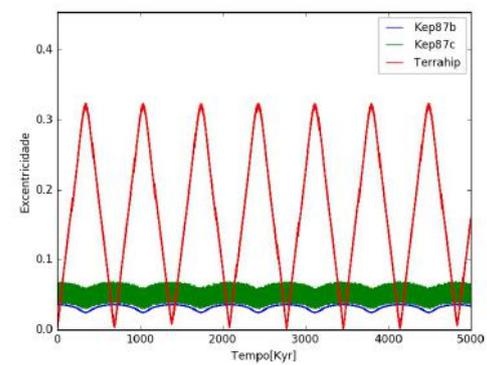
(a) Simulação 1



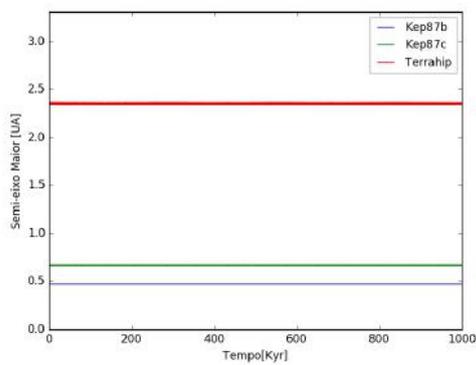
(b) Simulação 1



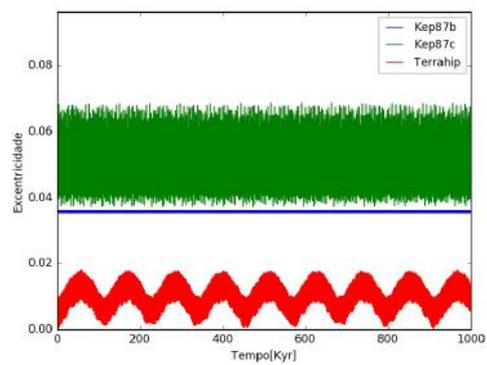
(c) Simulação 2



(d) Simulação 2

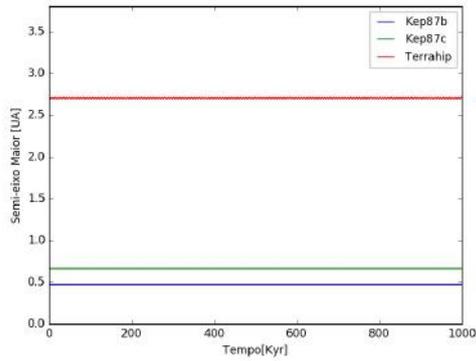


(e) Simulação 3

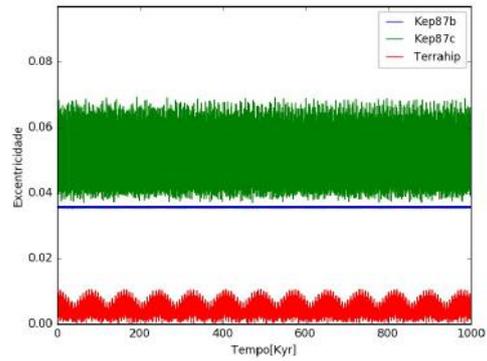


(f) Simulação 3

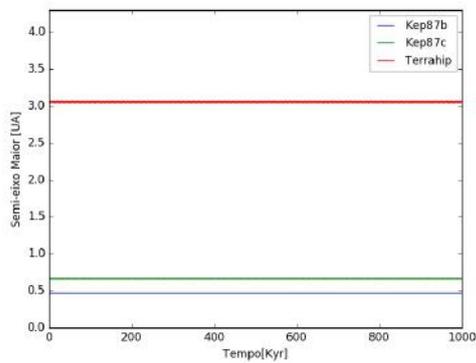
Figura 4.6: À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo para cinco simulações com a Terrahip dentro da zona habitável de Kepler-87a. Restringimos a janela para um tempo de integração de 1 milhão de anos para melhor visualização (exceto pela simulação 2 que tem uma janela de 5 milhões de anos).



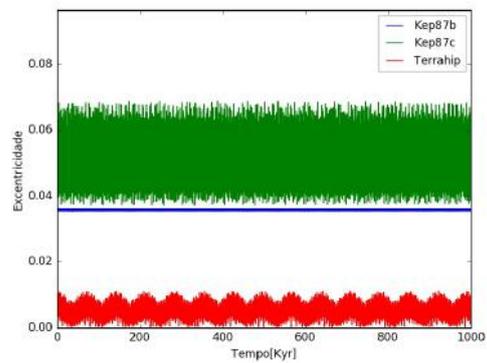
(a) Simulação 4



(b) Simulação 4



(c) Simulação 5



(d) Simulação 5

Figura 4.7: Continuação

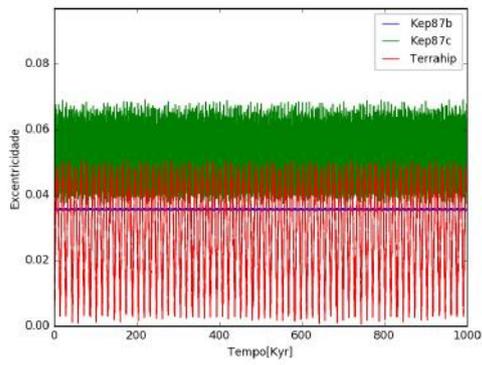
Próximo à região da simulação 2 (Figura 4.6), podem haver regiões de instabilidade uma vez que a excentricidade da Terra hipotética possui uma alta amplitude. Baseando-se nesta hipótese, realizamos um número maior de simulações a fim de detectar quais regiões da ZH são instáveis. Executamos um total de cinquenta e uma integrações de 10 milhões de anos³ cujo passo utilizado foi $\Delta a_{ZH} = 0.0354$ au. Os semi-eixos maiores da Terrahip encontram-se na Tabela 4.4.

³Apesar de termos rodado as simulações por 10 milhões de anos, para uma melhor visualização restringimos a janela para 1 milhão de anos uma vez que há uma certa constância das oscilações de a e e para o resto do tempo

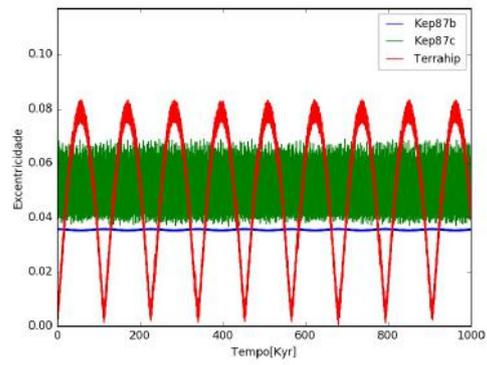
Tabela 4.4: Semi-eixos da Terra Hipotética. Note que entre duas simulações consecutivas há apenas o acréscimo do passo. Assim, não há a necessidade de mostrar os 51 valores de semi-eixo maior da Terra hipotética.

-	a[UA]
Simulação 1	1.3
Simulação 2	1.3354
Simulação 3	1.3708
Simulação 4	1.4062
Simulação 5	1.4416
Simulação 6	1.477
Simulação 7	1.5124
Simulação 8	1.5478
Simulação 9	1.5832
Simulação 10	1.6186
.....	...
Simulação 45	2.8576
Simulação 46	2.893
Simulação 47	2.9284
Simulação 48	2.9638
Simulação 49	2.9992
Simulação 50	3.0346
Simulação 51	3.07

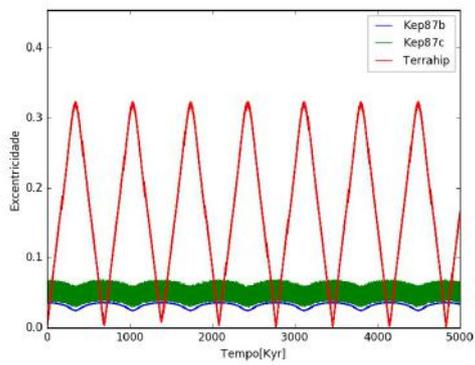
Analisando os dados obtidos, notamos que para nenhuma das simulações ocorreu ejeção, colisão ou instabilidade para qualquer planeta. No entanto, as simulações apresentam uma oscilação na excentricidade. À medida que deslocamos a Terra hip para regiões mais afastadas, ocorre um crescente aumento no valor absoluto da amplitude das oscilações. Tal evento ocorre de maneira progressiva até a simulação vinte e um (Figura 4.8); a partir deste ponto as amplitudes diminuem. Apesar deste padrão ao longo das simulações, o semi-eixo maior permanece constante e estável (Figura 4.9).



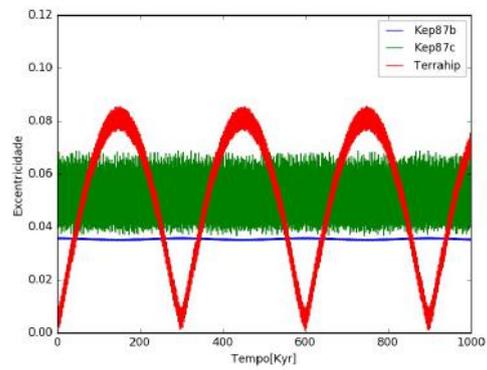
(a) Simulação 1



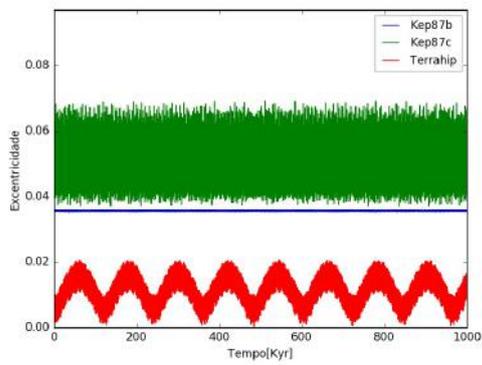
(b) Simulação 14



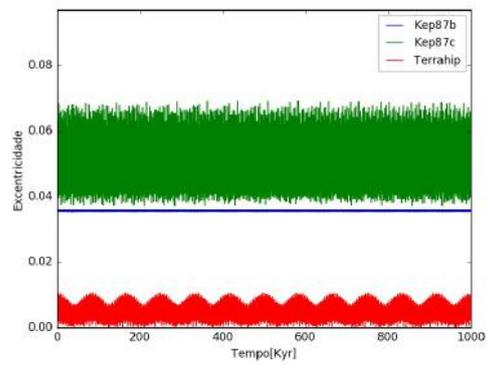
(c) Simulação 21



(d) Simulação 23

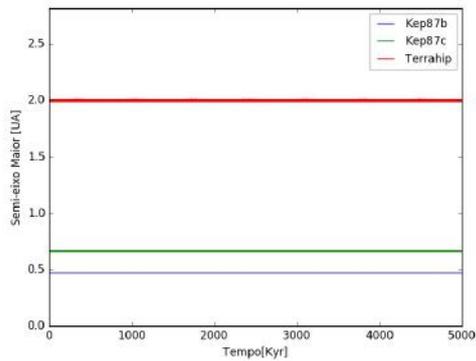


(e) Simulação 30

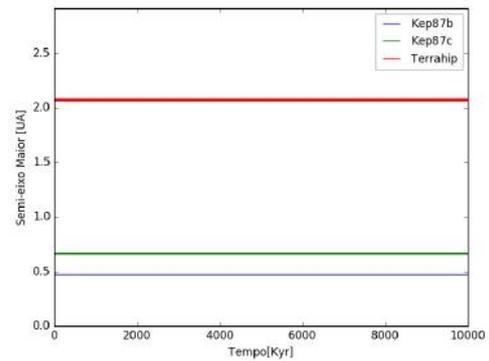


(f) Simulação 40

Figura 4.8: Variação temporal da excentricidade para algumas das 51 simulações



(a) Simulação 21



(b) Simulação 23

Figura 4.9: Variação temporal do semi-eixo maior para algumas das 51 simulações

Nas simulações para Kepler-87, estipulamos dentro do programa que para um valor de 10 unidades astronômicas, o planeta seria considerado ejetado deste sistema. Para melhor visualização de todas as simulações, criamos um gráfico de sobrevivência para o planeta Terra hipotético onde constatamos que em todas as 51 simulações o planeta Terra sobreviveu até o final do tempo de integração de 10 milhões de anos (Figura 4.10).

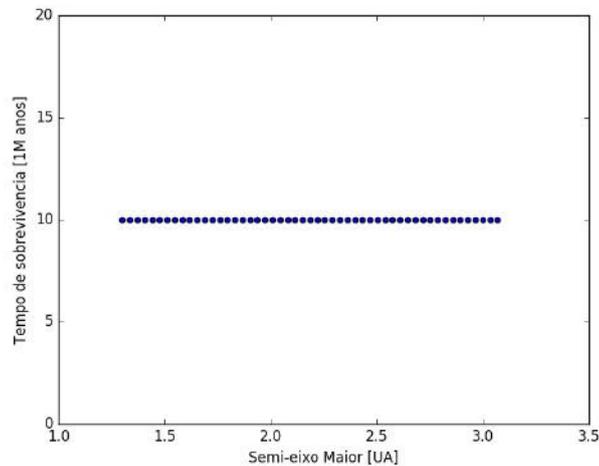


Figura 4.10: Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior para o sistema planetário Kepler-87 com dois planetas

Ainda é cedo para poder concluir sobre uma possível existência de um planeta do tipo Terra na região habitável do sistema Kepler-87 uma vez que mais simulações com um período de integração maior devem ser executadas. No entanto, podemos concluir que, caso este sistema planetário possua um planeta similar à Terra na ZH da estrela, os resultados acima mostram que este planeta é estável se sua órbita é circular.

De acordo com [Ofir et al., 2014], dados de curva de luz da missão Kepler para este sis-

tema planetário, revelam sinais que podem ser de dois possíveis candidatos a planetas; KOI 1574.03 (Kep87d) e KOI 1574.04 (Kep87e). Devido à possibilidade de que estes candidatos sejam confirmados, realizamos um estudo dinâmico no sistema planetário Kepler-87 contendo os quatro planetas, Kepler-87b, Kepler-87c, Kepler-87d e Kepler-87e. Vale ressaltar que não há valores de excentricidade e massa determinados para os planetas Kepler-87d e Kepler-87e. Deste modo, adotamos órbitas circulares para ambos e calculamos suas respectivas massas utilizando a relação raio-massa mostrado na equação (4.1) [Weiss and Marcy, 2014] e (Lissauer et al. 2012). Note que ambos os planetas possuem raios entre $[1,2]^*R_{\oplus}$, logo a massa calculada para Kepler-87d e Kepler-87e, respectivamente são de aproximadamente $4.5M_{\oplus}$ e $5M_{\oplus}$. A partir deste ponto realizamos os mesmos procedimentos adotados para Kepler-87 contendo dois planetas. Rodamos as simulações para o sistema planetário a fim de testar sua estabilidade que revelou ser dinamicamente estável (Figura 4.11 e 4.12). Portanto, introduzimos um planeta Terra hipotético na borda interna da ZH do sistema. As simulações também indicaram estabilidade dinâmica (Figura 4.13 e 4.14).

$$M = 2.69M_{\oplus} \left(\frac{Rp}{R_{\oplus}} \right)^{0.93}, \quad \text{para } 1.5R_{\oplus} < Rp < 4.0R_{\oplus} \quad (4.1)$$

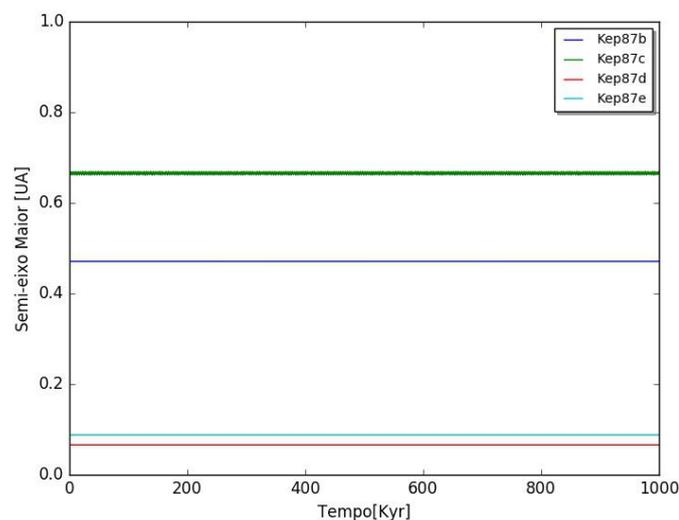


Figura 4.11: Variação temporal do semi-eixo maior do sistema Kepler-87 com os planetas b, c e os candidatos Kepler-87d e Kepler-87e

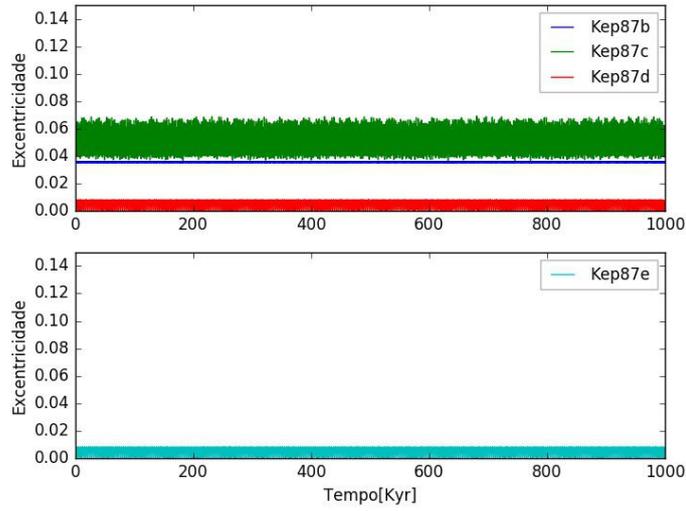


Figura 4.12: Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c e os candidatos a planetas Kepler-87d e Kepler-87e.

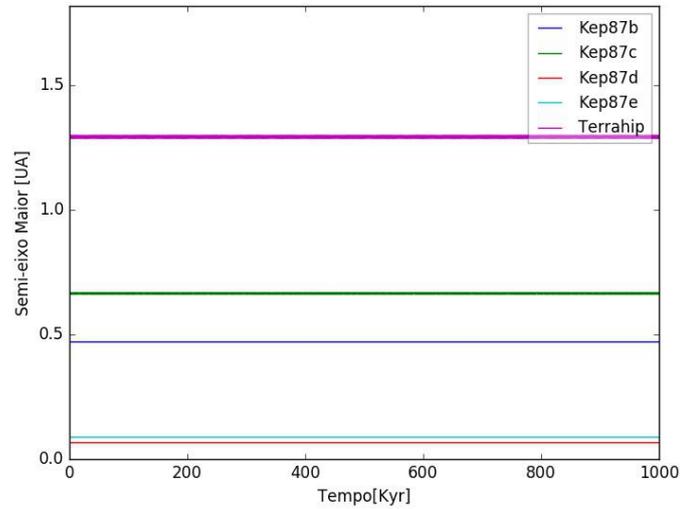


Figura 4.13: Variação temporal do semi-eixo maior do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c, os candidatos Kepler-87d, Kepler-87e e a Terra hipotética

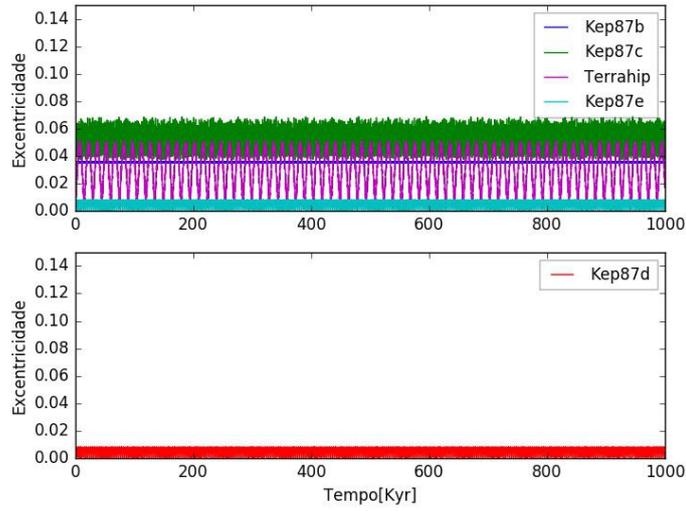
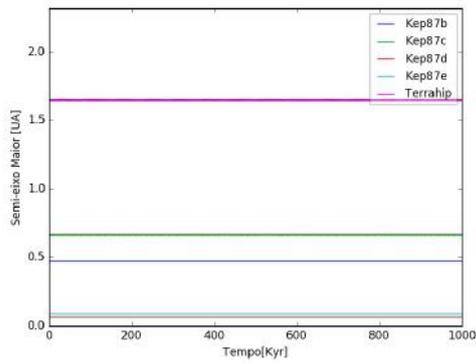
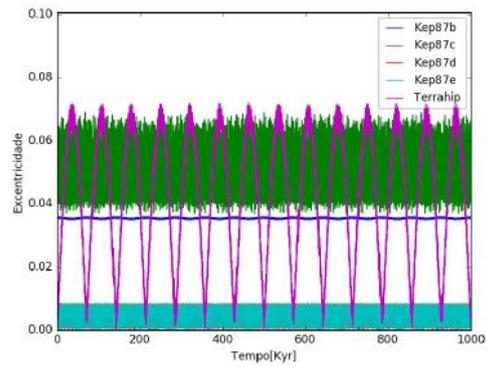


Figura 4.14: Variação temporal da excentricidade do sistema planetário Kepler-87 com os planetas b, c, os candidatos Kepler-87d, Kepler-87e e a Terra hipotética

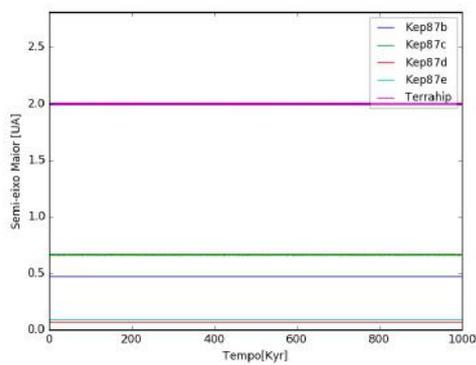
Baseando-se nos resultados acima de estabilidade, fizemos uma análise da dinâmica orbital do sistema planetário com a Terra hipotética orbitando cinco regiões ao longo da zona habitável. Os semi-eixos maiores da Terrahip utilizados podem ser encontrados na tabela 4.3.



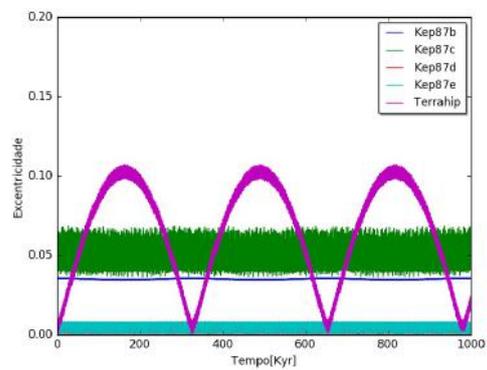
(a) Simulação 1



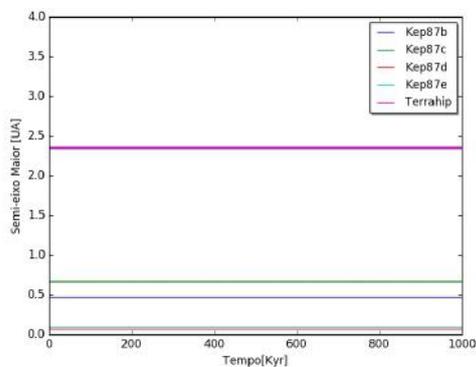
(b) Simulação 1



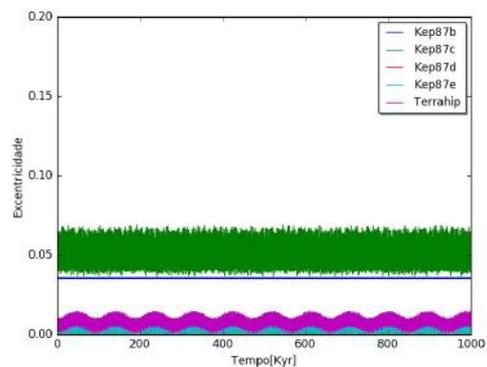
(c) Simulação 2



(d) Simulação 2



(e) Simulação 3



(f) Simulação 3

Figura 4.15: Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-87 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central em cinco diferentes regiões da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo para as cinco simulações.

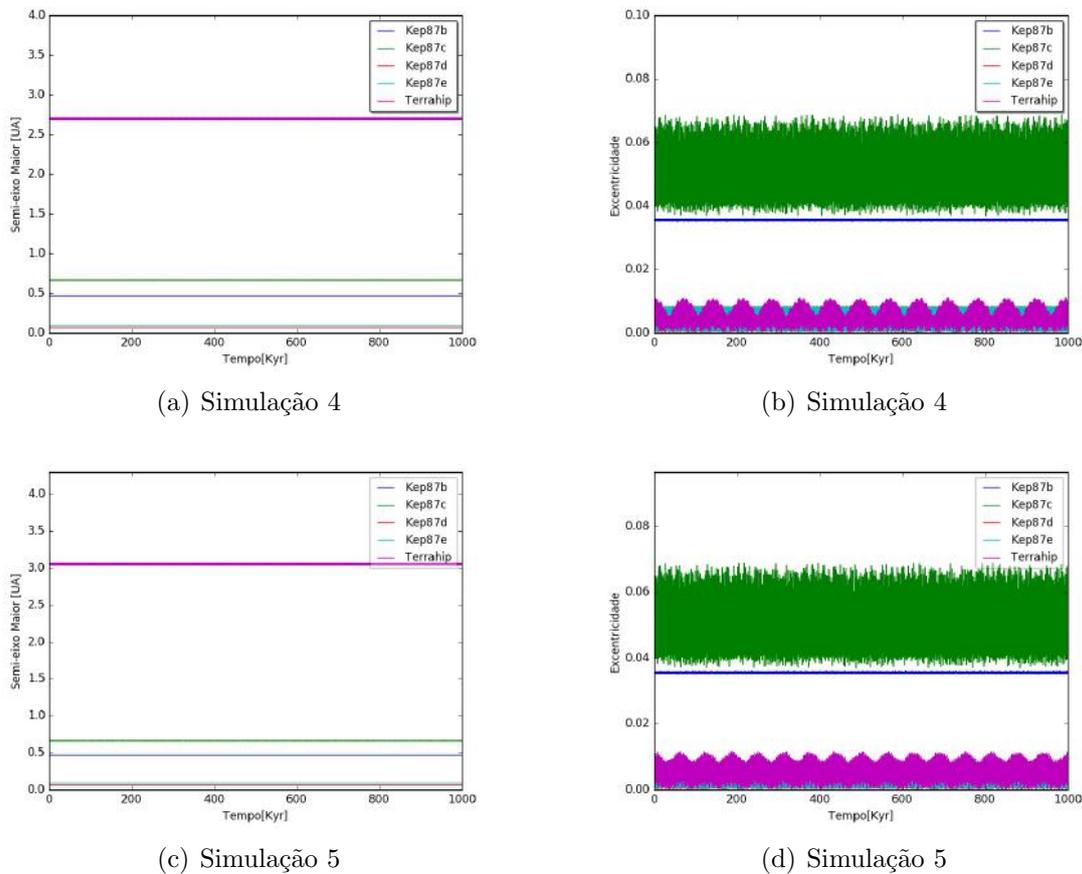
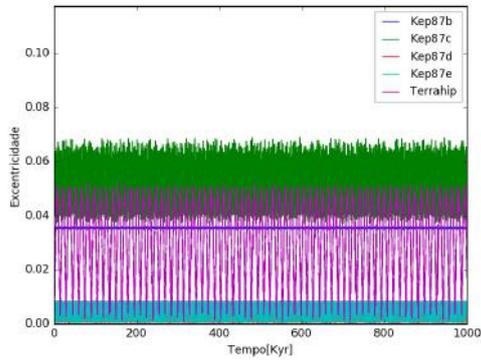


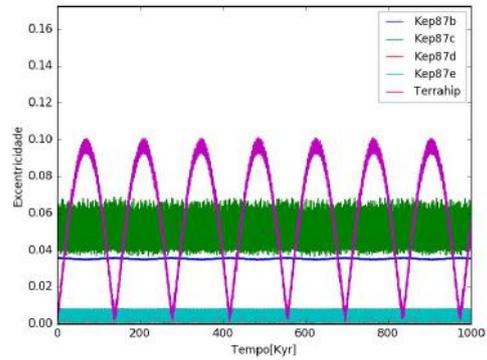
Figura 4.16: Continuação

Observando as simulações para o sistema Kepler-87 com os cinco planetas (Figuras 4.15 e 4.16), o sistema se comporta de modo estável. Podemos observar, no entanto, que para a simulação 2(d), a inserção desses dois planetas introduziu um certo amortecimento que causou a diminuição na amplitude das oscilações da excentricidade da Terrahip se comparado com o caso em que apenas 2 planetas são considerados no sistema (ver Figura 4.6 d). Note que as simulações (Figuras 4.6 e 4.7 e Figura 4.15 e 4.16) são bastante similares. Portanto, concluímos que a introdução dos planetas Kepler-87d e Kepler-87e possivelmente não causaria uma perturbação significativa na estabilidade de um possível planeta do tipo Terra habitando na zona habitável deste sistema planetário (levando em conta as condições nas quais as simulações foram executadas). Dentre as 5 simulações rodadas, notamos que a Terrahip apresentou, na simulação 2, um comportamento tal que sua excentricidade ao longo do tempo permanecia relativamente alta. Portanto, nas proximidades desta região pode haver regiões de completa instabilidade dinâmica. Baseando-se nesta hipótese, executamos mais 51 simulações para estudar a dinâmica da Terra hipotética com mais detalhe em toda a ZH. Constatamos que para nenhuma das 51 simulações executadas, a Terra hipotética sofreu instabilidades em sua órbita, sobrevivendo até o final das simulações em todas as regiões da ZH. A Figura 4.17 mostra algumas

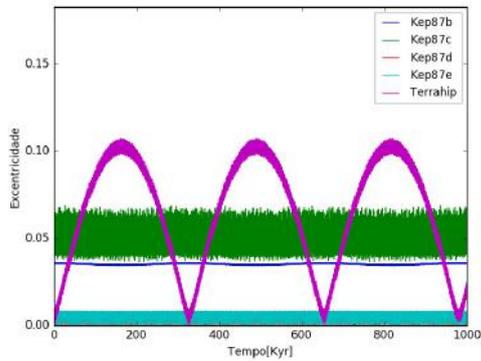
das 51 simulações rodadas.



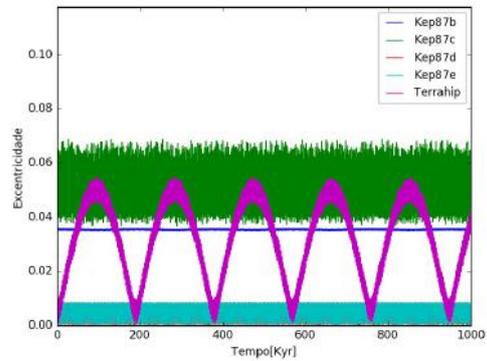
(a) Simulação 1



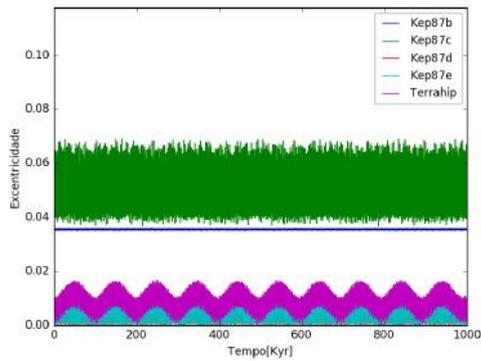
(b) Simulação 14



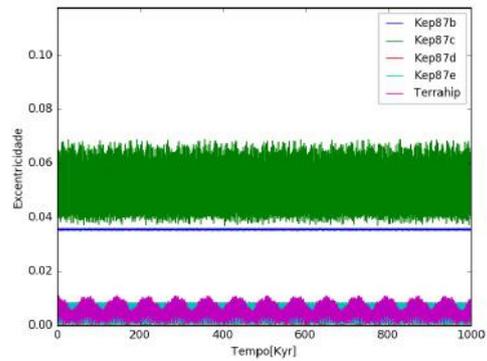
(c) Simulação 21



(d) Simulação 23

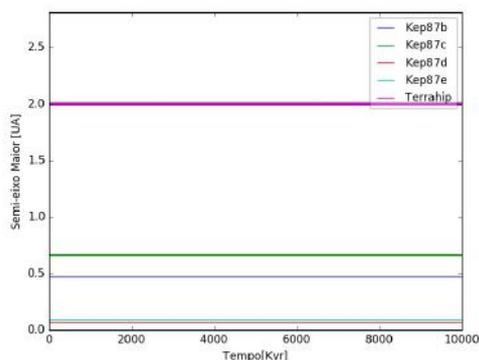


(e) Simulação 30

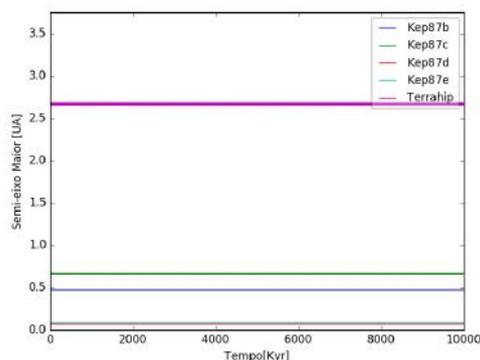


(f) Simulação 40

Figura 4.17: Variação temporal da excentricidade para algumas das 51 simulações do sistema planetário Kepler-87



(a) Simulação 21



(b) Simulação 40

Figura 4.18: Variação temporal do semi-eixo maior para algumas das 51 simulações

Até o momento, a validade dos candidatos a planetas KOI 1574.03 (Kepler-87d) e KOI 1574.04 (Kepler-87e) ainda está sob investigação. Assumindo que estes candidatos a planetas sejam confirmados em breve, os estudos aqui apresentados mostram-se compatíveis com o fato de que o sistema planetário seria estável incluindo uma Terra hipotética na zona habitável. Deste modo, caso Kepler-87 tenha de fato quatro planetas, a presença de uma Terra na zona habitável nas condições apresentadas parece viável.

4.2 Kepler-62

Kepler-62 é um sistema planetário formado por cinco planetas e uma estrela central⁴(Figura 1.10). Este sistema planetário possui dois planetas na sua zona habitável: Kepler-62e e Kepler-62f. Existe uma distância média considerável entre estes planetas, podendo então haver um planeta não detectado nesta região. Além de analisar a dinâmica do sistema planetário, estudamos a possibilidade de um planeta tipo Terra coexistir na ZH com estes dois planetas. É importante ressaltar que as massas destes planetas são uma estimativa de limite superior, e não foram obtidas via técnicas de velocidade radial (RV) mas levando em conta modelos planetários [Borucki et al., 2013]. Executamos uma simulação por um tempo de 1 milhão de anos utilizando os dados da tabela 4.5 e 4.6 a fim de mostrar que o sistema é estável; consideramos órbitas circulares⁵ (Figura 4.20 e Figura 4.21) para todos os planetas.

⁴Uma descrição qualitativa deste sistema planetário pode ser encontrada no capítulo 1 (seção 2).

⁵Utilizaremos órbitas circulares todas as vezes que não encontrarmos dados de excentricidade.

Tabela 4.5: Parâmetros planetários utilizados nas simulações

Planetas	a [au]	e	Massa (limite) M_{\oplus}	Raio R_{\oplus}
Kepler-62b	0.0553	-	9	1.31
Kepler-62c	0.0926	-	4	0.54
Kepler-62d	0.120	-	14	1.95
Kepler-62e	0.427	-	36	1.61
Kepler-62f	0.718	-	35	1.41

Tabela 4.6: Dados da estrela Kepler-62 utilizados na simulação

Estrela Central	Massa M_{\odot}	Raio R_{\odot}
Kepler-62a	0.69	0.64



Figura 4.19: Ilustração do sistema Kepler-62 visto de cima com sua zona habitável em verde. Vale ressaltar que apesar da aparente elipsidade da órbita dos planetas, não foram encontrados valores de excentricidade. Portanto, utilizamos órbitas circulares para todos os planetas de Kepler-62 nas simulações

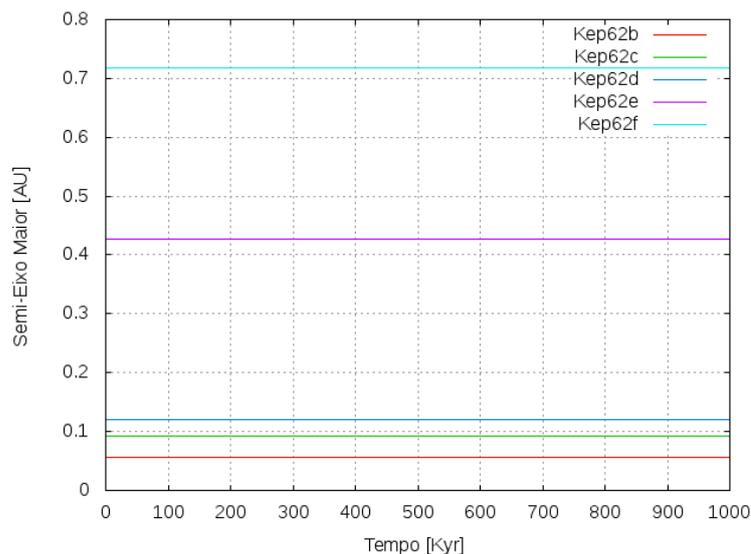


Figura 4.20: Variação temporal do semi-eixo maior dos planetas do sistema planetário Kepler-62

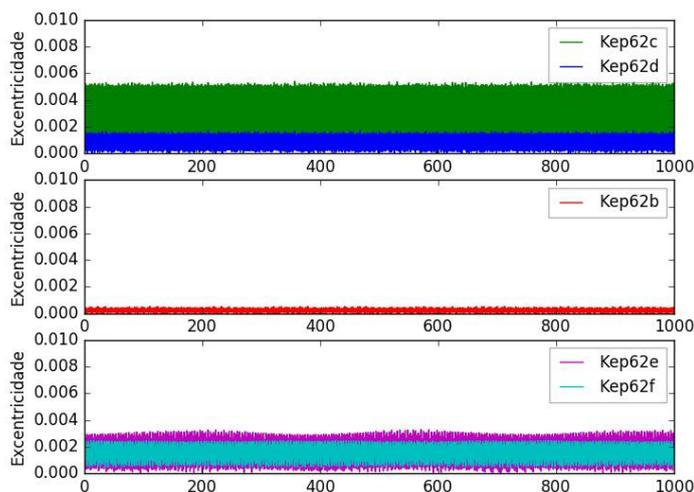


Figura 4.21: Variação temporal da excentricidade dos planetas do sistema planetário Kepler-62

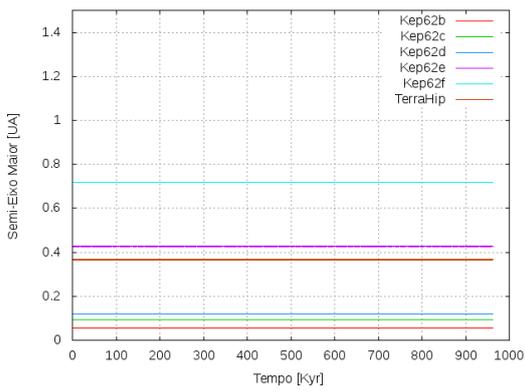
Uma vez que o sistema aparenta ser estável para o tempo de 1 milhão de anos, não há necessidade de realização de uma integração de maior período pois nenhuma instabilidade neste período foi observada. Para mostrar que um planeta de baixa massa pode orbitar na ZH de Kepler-62a, introduzimos uma Terra hipotética na ZH e rodamos simulações. A priori, executamos seis com um passo $\Delta a_{ZH} = 0.104$ au e semi-eixos maiores dados pela tabela 4.7. Para executar as simulações com a Terra hipotética, o MERCURY estava configurado para ejetar um planeta apenas no caso onde o mesmo assumia semi-eixo maior da ordem de 100 UA (valor padrão). Vale ressaltar que começamos os estudos

utilizado valores padrões para os parâmetros do MERCURY. De fato, Kepler-62 foi estudado primeiro, por esta razão o parâmetro de ejeção de planetas permaneceu 100 au para Kepler-62, diferentemente dos outros sistemas planetários que possuem este parâmetro ajustado para 10 au. De qualquer forma, estamos interessados apenas na estabilidade dinâmica da Terra hipotética na ZH, caso a Terra seja estável porém orbite além da ZH, estes casos não nos interessa.

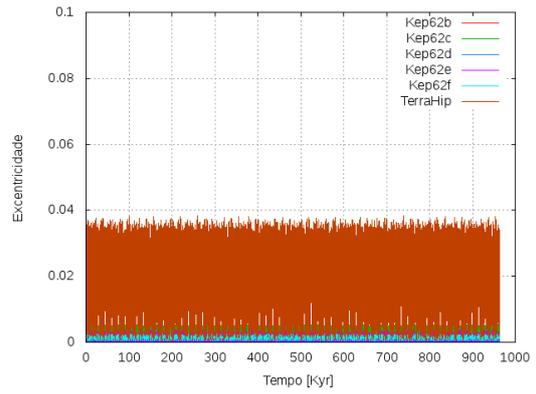
Tabela 4.7: Semi-eixo maior da Terra Hipotética no sistema planetário Kepler-62

-	a[au]
Simulação 1	0.370
Simulação 2	0.474
Simulação 3	0.578
Simulação 4	0.682
Simulação 5	0.786
Simulação 6	0.890

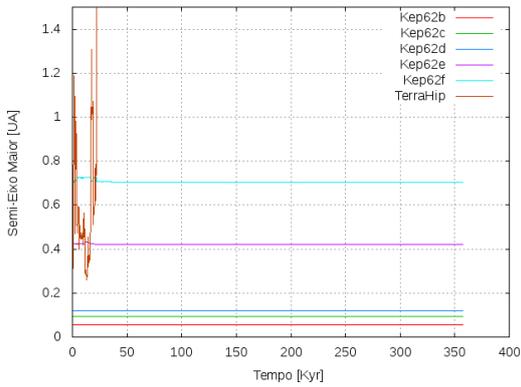
Podemos notar que as simulações 2 e 4 são instáveis (Figura 4.22, 4.23 e 4.24). À medida que aproximamos a Terra hipotética de Kepler-62e e f, a interação destes planetas com a Terrahip aumenta. Quando a interação fica mais intensa, ocorrem aumentos na excentricidade do planeta de menor massa, causando encontros próximos com outros planetas, podendo provocar ejeções ou colisões. Com base nos dados, temos que as regiões pertencentes à zona de influência dos planetas Kepler-62e e Kepler-62f estão na faixa entre $a \approx 0.47$ UA e $a \approx 0.68$ UA. As simulações instáveis dois e quatro, pertencem a estas faixas. Tratando-se de regiões de instabilidade, realizamos uma análise através da curva de colisão a fim de mostrar que a interação entre a Terra hipotética e os respectivos planetas Kepler-62e e Kepler-62f interagiram com a Terra de tal modo que houve a ejeção da mesma para regiões mais externas (Figuras 4.25). Note que quando os pontos ficam acima da curva de colisão temos um caso de instabilidade, ao passo que quando todos os pontos permanecem abaixo da curva, não houve riscos de perturbação.



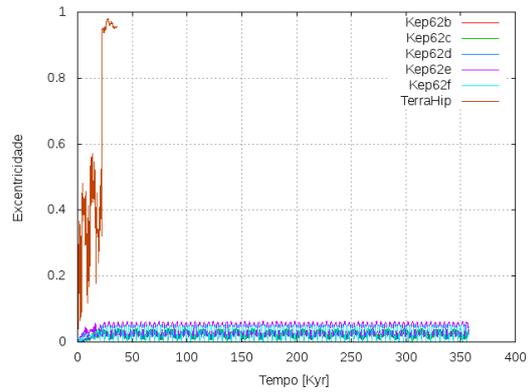
(a) Simulação 1



(b) Simulação 1

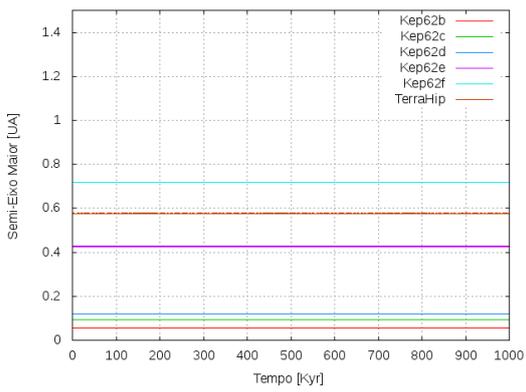


(c) Simulação 2

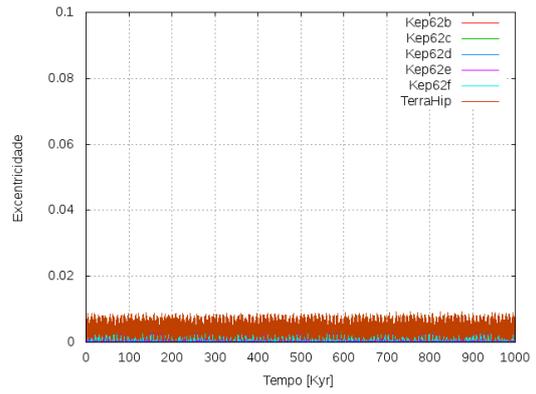


(d) Simulação 2

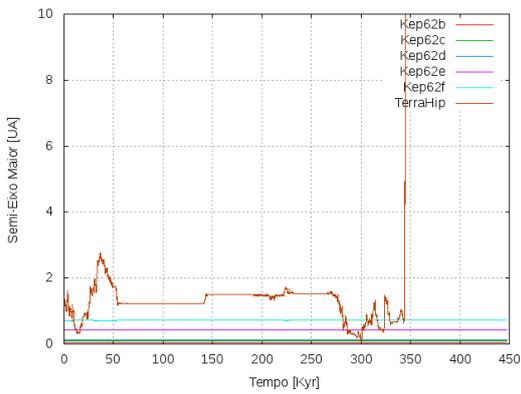
Figura 4.22: Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-62 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central em seis diferentes regiões da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo.



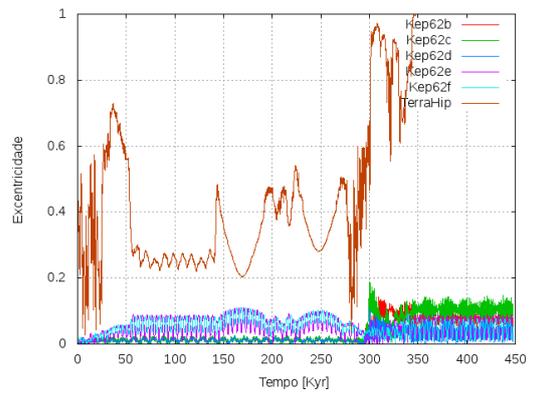
(a) Simulação 3



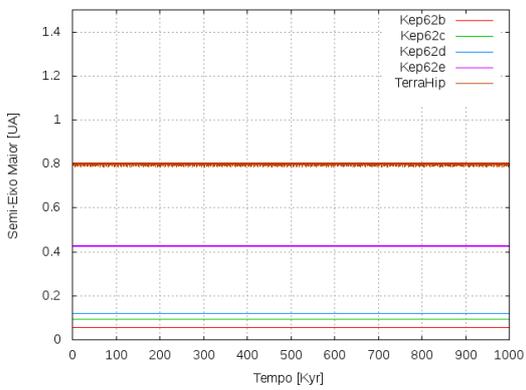
(b) Simulação 3



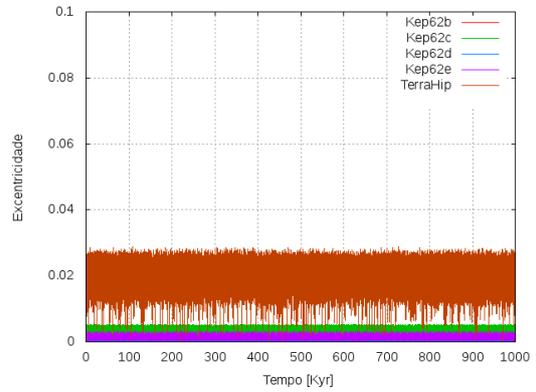
(c) Simulação 4



(d) Simulação 4

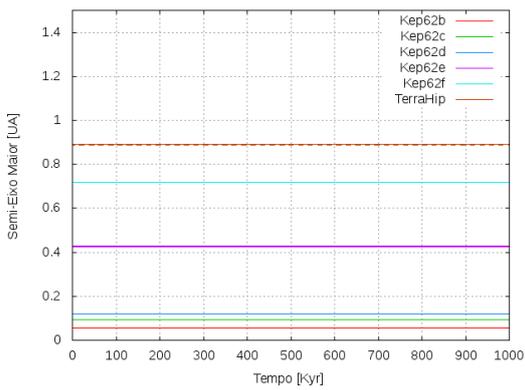


(e) Simulação 5

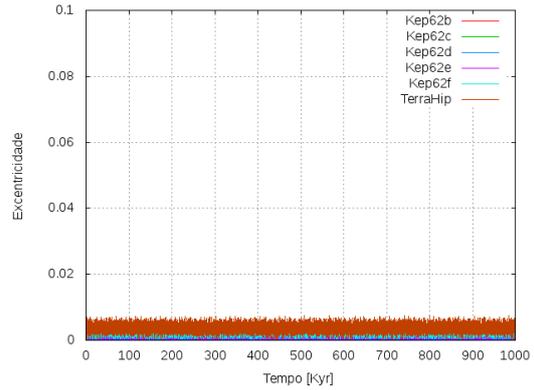


(f) Simulação 5

Figura 4.23: Continuação

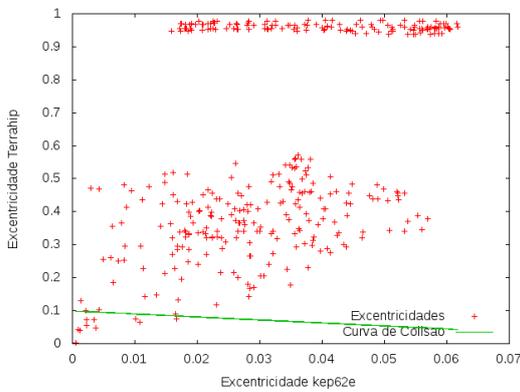


(a) Simulação 6

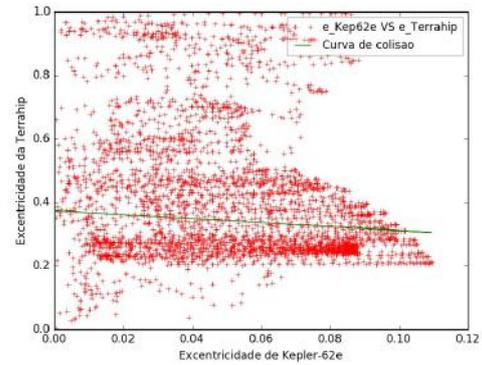


(b) Simulação 6

Figura 4.24: Continuação



(a) Terra hipotética vs Kepler-62e



(b) Terra hipotética vs Kepler-62e

Figura 4.25: Verificação de instabilidade através da curva de colisão para as simulações 2 e 4.

Visto que as instabilidades nas simulações 2 e 4 ocorreram na faixa entre Kepler-62e e f, realizamos mais simulações, porém, apenas para a TerraHip orbitando entre as órbitas desses dois planetas. Rodamos um total de 25 simulações para identificar as faixas estáveis/instáveis entre Kepler-62e e Kepler-62f, porém, após este estudo, percebemos a necessidade de estudar a ZH por completo e de forma mais detalhado. Diferentemente do estudo anterior, onde focamos apenas na região entre Kepler-62e e Kepler-62f, executamos 51 simulações ao longo de toda a ZH. Este conjunto de simulações é mais detalhada, uma vez que o passo utilizado é menor do que aquele nas 25 simulações. Por este motivo, mostraremos mais à frente apenas os resultados das 51 simulações (Tabela 4.8) realizadas ao longo de toda a ZH. Vale ressaltar que este conjunto de simulações engloba os resultados anteriores uma vez que a região entre os planetas Kepler-62e e f está inclusa nas 51 simulações. Pela análise do gráfico de sobrevivência da Terra hipotética (Figura 4.26), podemos notar que, das primeiras 10 simulações, apenas a simulação 1 sobrevive até o fim da simulação. Caso não tivéssemos executado várias simulações e com um passo pequeno,

não teríamos notado a grande faixa de instabilidade entre $[0.4,0.5]$ au, daí a importância de um estudo mais detalhado de toda a ZH.

Tabela 4.8: Semi-eixos da Terra Hipotética

-	a[au]
Simulação 1	0.37
Simulação 2	0.3804
Simulação 3	0.3908
Simulação 4	0.4012
Simulação 5	0.4116
Simulação 6	0.422
Simulação 7	0.4324
Simulação 8	0.4428
Simulação 9	0.4532
Simulação 10	0.4636
.....	...
Simulação 45	0.8276
Simulação 46	0.838
Simulação 47	0.8484
Simulação 48	0.8588
Simulação 49	0.8692
Simulação 50	0.8796
Simulação 51	0.890

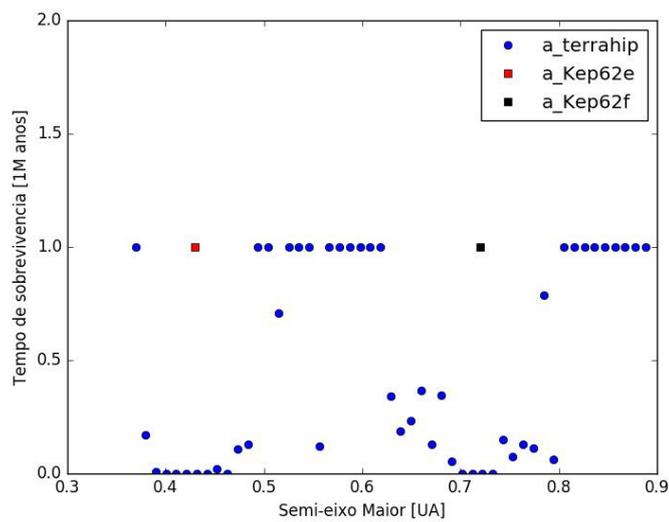
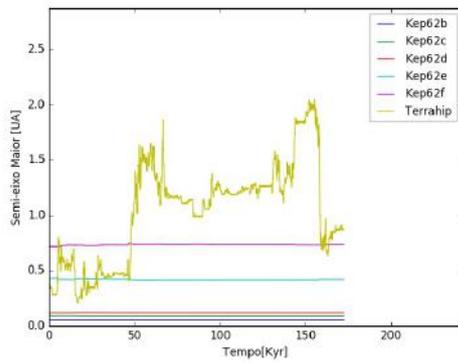


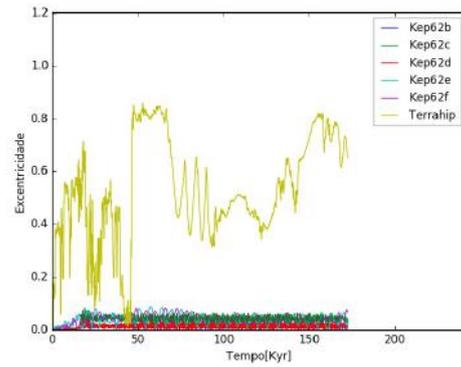
Figura 4.26: Tempo de Sobrevivência da Terra Hipotética para o sistema planetário Kepler-62

Evidentemente, nas proximidades dos planetas Kepler-62e e Kepler-62f a Terrahip não sobrevive sequer por 100 mil anos, sendo ejetada do sistema. Estas regiões são dominadas gravitacionalmente pelos planetas da ZH, assim, dificilmente um planeta do

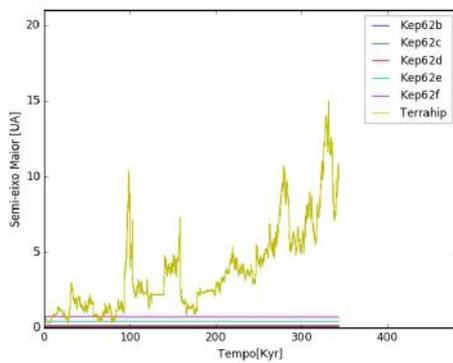
tipo Terra seria estável nestas faixas de $\approx [0.38, 0.48]$ au e $\approx [0.63, 0.80]$ au (Figura 4.27). Além disso, podemos notar duas faixas de instabilidade nas regiões entre 0.5 e 0.6 UA (Figura 4.28). Todas as regiões onde a Terrahip sobrevive ao tempo de 1 milhão de anos representam faixas estáveis (Figura 4.29) exceto pela simulação 23 onde a Terra apesar de sobreviver até o final da simulação apresenta altos valores de excentricidade ($e > 0.8$) e variações no semi-eixo maior (Figura 4.30). Para a região mais externa da ZH ($a > 0.8au$) tanto o semi-eixo maior quanto as excentricidades nessas regiões comportam-se de maneira tal que um planeta do tipo Terra poderia existir nestas regiões da zona habitável (Figura 4.29).



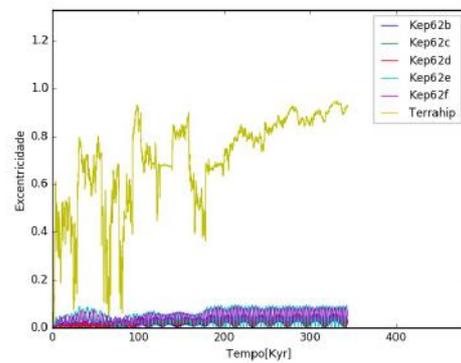
(a) Simulação 2



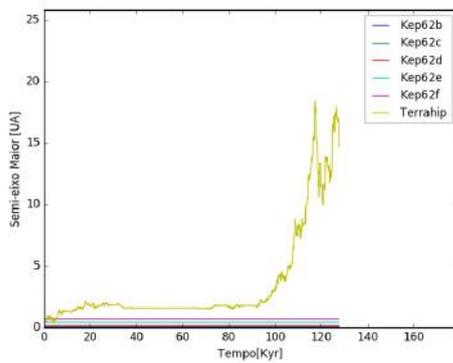
(b) Simulação 2



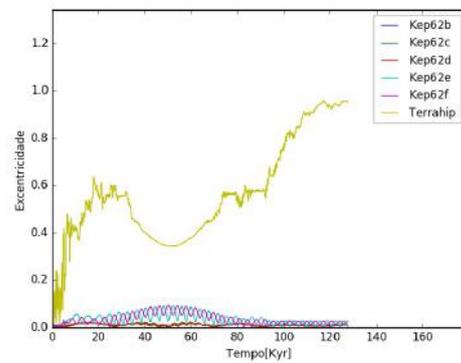
(c) Simulação 26



(d) Simulação 26

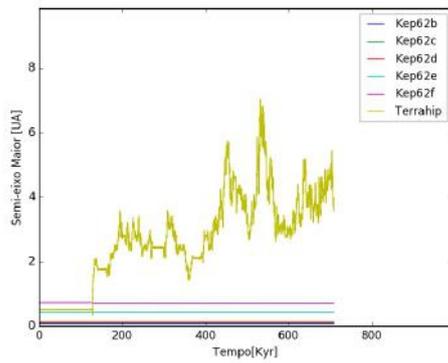


(e) Simulação 42

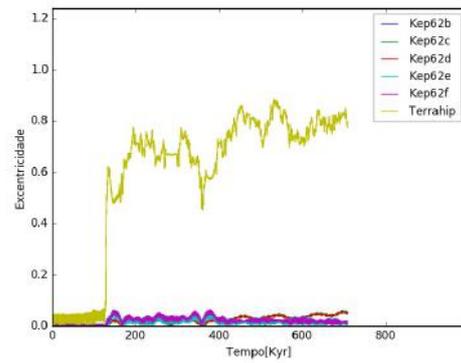


(f) Simulação 42

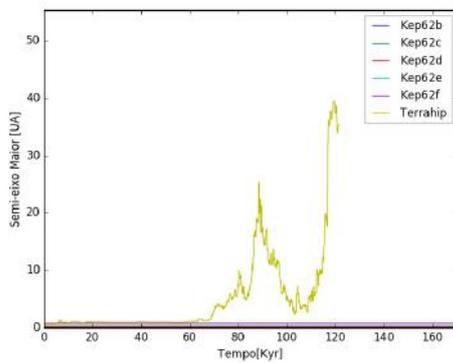
Figura 4.27: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita). As simulações 2 e 12 pertencem à região próxima a Kepler-62e ao passo que as simulações 26 e 42 estão próxima a Kepler-62f.



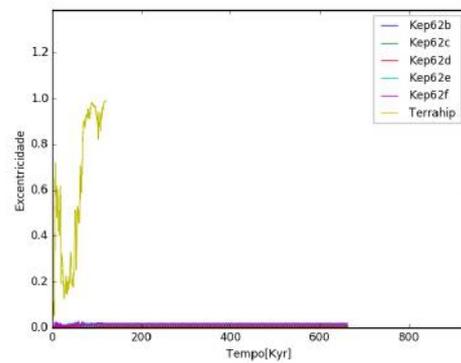
(a) Simulação 15



(b) Simulação 15

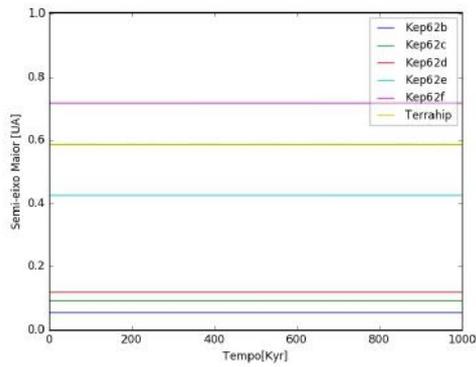


(c) Simulação 19

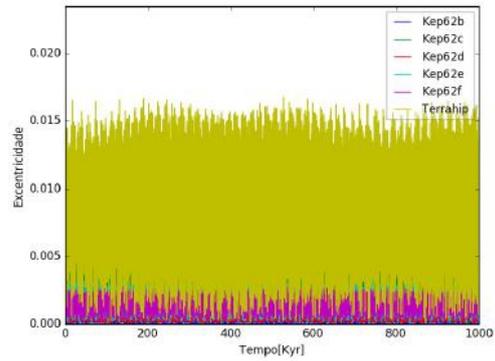


(d) Simulação 19

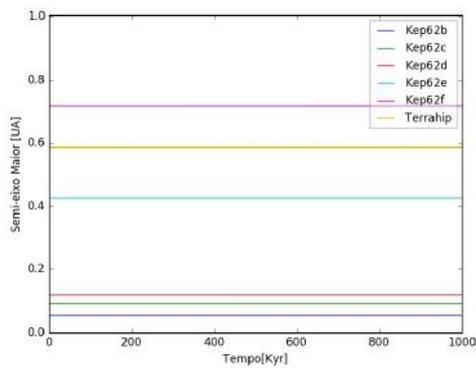
Figura 4.28: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).



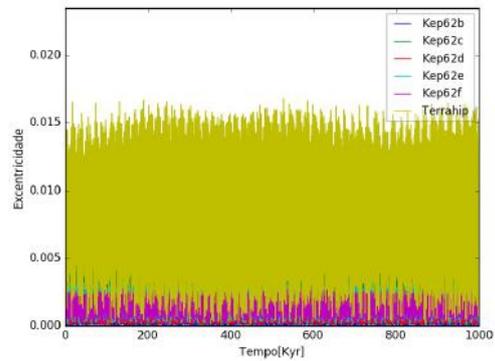
(a) Simulação 22



(b) Simulação 22

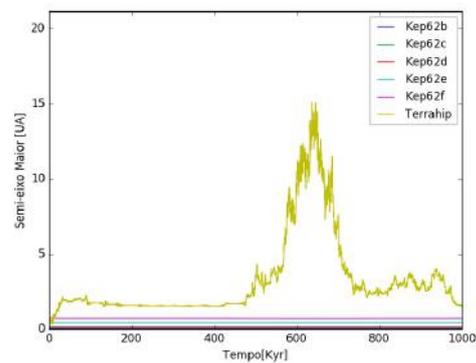


(c) Simulação 24

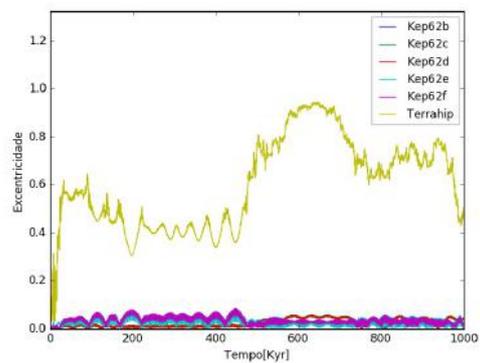


(d) Simulação 24

Figura 4.29: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita). Terra hipotética na região estável com semi-eixo próximo de 0.5988 au



(a) Simulação 23



(b) Simulação 23

Figura 4.30: Variação Temporal do Semi-Eixo Maior (à esquerda) e Variação Temporal da Excentricidade (à direita). Terra Hipotética na região instável com semi-eixo 0.6 au

4.3 Kepler-30

Tabela 4.9: Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-30 utilizados nas simulações

Planetas	a [au]	e	Massa M_{\oplus}	Raio R_{\oplus}
Kepler-30b	0.18	0.042 ± 0.003	11.3 ± 1.4	3.9 ± 0.2
Kepler-30c	0.3	0.0111 ± 0.0010	640 ± 50	12.3 ± 0.4
Kepler-30d	0.5	0.022 ± 0.005	23.1 ± 2.7	8.8 ± 0.5

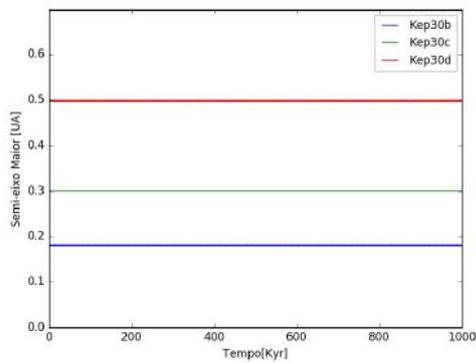
Tabela 4.10: Parâmetros estelares

Estrela Central	Massa [M_{\odot}]	Raio [R_{\odot}]	Temperatura [K]
Kepler-30a	0.99 ± 0.08	0.95 ± 0.12	5498.0 ± 54.0

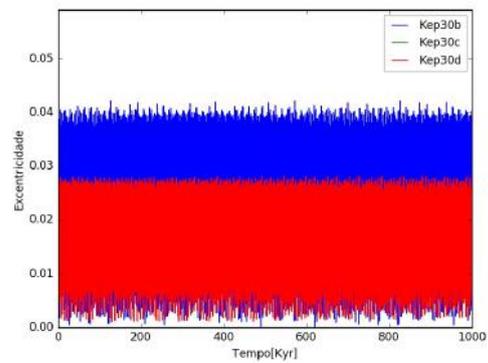
Kepler-30 é composto por uma estrela central chamada Kepler-30a e três planetas, Kepler-30b, Kepler-30c e Kepler-30d. Kepler-30a possui bastante semelhança com o Sol embora deva ser um pouco mais jovem, julgando pela sua velocidade de rotação e manchas estelares mais proeminentes [Sanchis-Ojeda et al., 2012]. Todos os parâmetros orbitais utilizados nesse estudo têm como base os dados retirados de [Sanchis-Ojeda et al., 2012]. Para rodar as simulações no *MERCURY* utilizamos o algoritmo *HYBRID* e um tempo de integração de 1/20 do menor período orbital dentre os planetas do sistema planetário Kepler-30 além de ter ajustado a distância de ejeção para 10 au. Este sistema planetário é de grande interesse pois tem valores de excentricidade, massa e semi-eixos maiores bem determinados. Além disso, a distribuição dos planetas é tal que um deles, Kepler-30d, orbita nas proximidades da zona habitável (Figura 4.31), logo a presença de um planeta do tipo Terra na ZH, pode sofrer perturbações que resultem em instabilidades para a mesma ou para outros planetas do sistema planetário. Baseando-se nesta hipótese e aplicando a metodologia, executamos algumas simulações para verificar a estabilidade do sistema para um tempo de integração de 1 milhão de anos. De acordo com a Figura 4.32, notamos que o sistema comporta-se de maneira estável. Portanto, introduzimos um planeta do tipo Terra na zona habitável e rodamos 51 simulações variando o semi-eixo da Terra hip ao longo de toda a ZH. Para estas 51 simulações utilizamos os dados da tabela 4.11, um passo $\Delta a_{ZH} = 0.018$ au e adotamos órbitas circulares para a Terra hip.



Figura 4.31: Ilustração do Sistema Kepler-30 Visto de Cima com sua Zona Habitável em Verde



(a) Variação temporal do semi-eixo maior



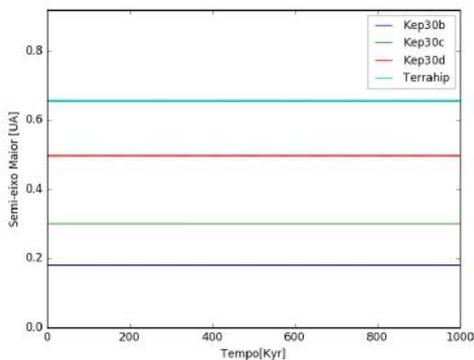
(b) Variação temporal da excentricidade

Figura 4.32: Simulação de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-30

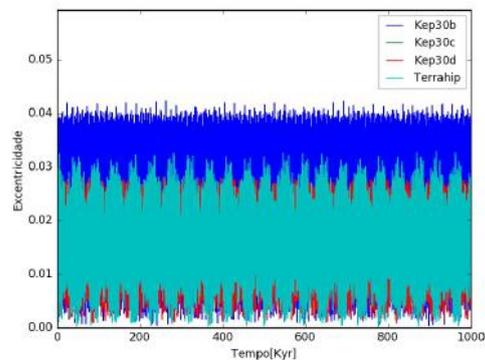
Tabela 4.11: Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações

-	a[au]
Simulação 1	0.66000
Simulação 2	0.67800
Simulação 3	0.69600
Simulação 4	0.71400
Simulação 5	0.73200
Simulação 6	0.75000
Simulação 7	0.76800
Simulação 8	0.78600
Simulação 9	0.80400
Simulação 10	0.82200
.....	...
Simulação 45	1.45200
Simulação 46	1.47000
Simulação 47	1.48800
Simulação 48	1.50600
Simulação 49	1.52400
Simulação 50	1.54200
Simulação 51	1.56000

As Figuras 4.33 e 4.34 mostra algumas simulações escolhidas aleatoriamente dentre as 51 simulações rodadas. Podemos notar que todas mostram a Terra hipotética estável ao longo de todo o tempo de integração. De fato, em todas as 51 simulações a Terra hip sobreviveu até o fim, mostrando-se estável em todas as regiões da zona habitável de Kepler-30. A partir desses resultados, podemos concluir que, para as condições estabelecidas no começo do estudo, existe a possibilidade (do ponto de vista da dinâmica orbital) de que um planeta do tipo Terra orbite o sistema planetário Kepler-30 na zona habitável.

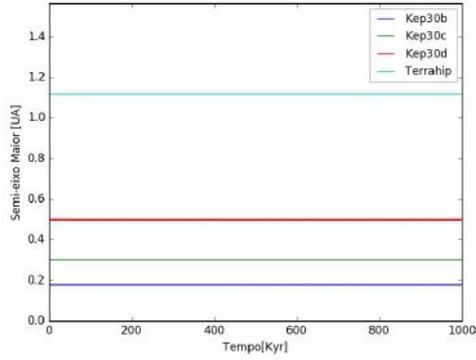


(a) Simulação 1

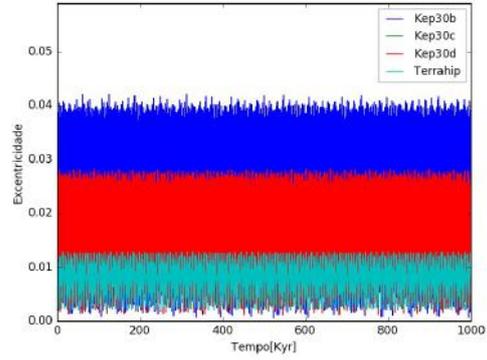


(b) Simulação 1

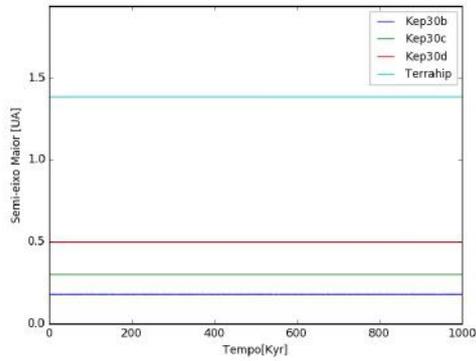
Figura 4.33: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).



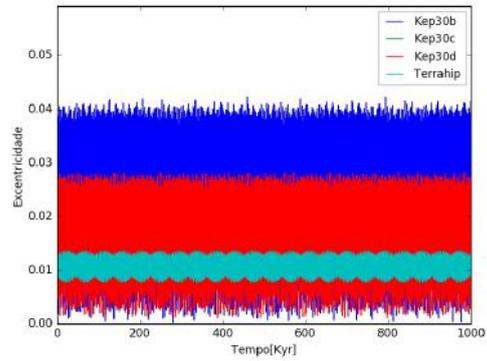
(a) Simulação 27



(b) Simulação 27



(c) Simulação 42



(d) Simulação 42

Figura 4.34: Continuação

4.4 Kepler-103

Tabela 4.12: Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-103 utilizados nas simulações

Planetas	a [au]	e	Massa M_{\oplus}	Raio R_{\oplus}
Kepler-103b	0.187	0.0 (adotado)	9.7 ± 8.6	3.37 ± 0.09
Kepler-103c	0.939	0.0 (adotado)	36.10 ± 25.2	5.14 ± 0.14

Tabela 4.13: Parâmetros estelares

Estrela Central	Massa [M_{\odot}]	Raio [R_{\odot}]	Temperatura [K]
Kepler-103a	1.09 ± 0.07	1.44 ± 0.04	5845 ± 88

Kepler-103 é um sistema planetário composto por uma estrela central chamada Kepler-103a e dois planetas, Kepler-103b e Kepler-103c (Figura 4.35). Kepler-103a possui quase a mesma massa que o Sol mas um raio maior, de modo que a sua zona habitável é mais distante do que a do Sol. Para este sistema planetário, utilizamos os mesmos

algoritmos e distância de ejeção do caso anterior (Kepler-30). Os dados utilizados no MERCURY para as simulações de Kepler-103 foram extraídos de [Marcy et al., 2014]. No entanto, não encontramos dados de semi-eixo maior neste artigo para Kepler-103. Portanto, calculamos o semi-eixo maior dos planetas via 3ª lei de Kepler a partir de seus períodos que por sua vez são extraídos via trânsito planetário. A ausência de dados de excentricidade nos fez adotar órbitas circulares para todos os planetas de Kepler-103. Inicialmente, executamos algumas simulações para verificar a estabilidade do sistema dentro de um período de 1 milhão de anos. A Figura 4.36 mostra que tanto o semi-eixo maior quanto a excentricidade dos planetas comportam-se de maneira estável. Portanto, introduzimos um planeta do tipo Terra na zona habitável e rodamos 51 simulações na faixa da zona habitável. Para estas simulações utilizamos os dados da tabela 4.14 e um passo $\Delta a_{ZH} = 0.0298$ au.

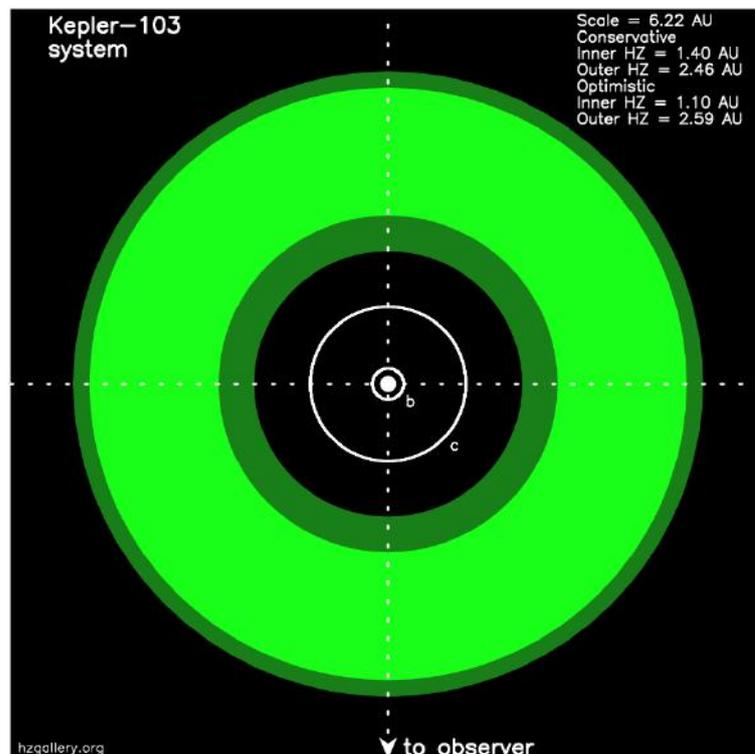


Figura 4.35: Ilustração do sistema Kepler-103 visto de cima com sua zona habitável em verde

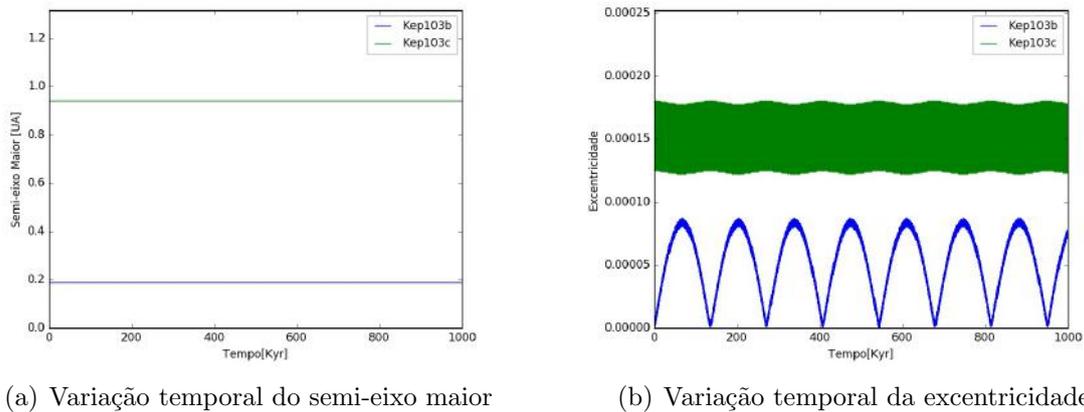
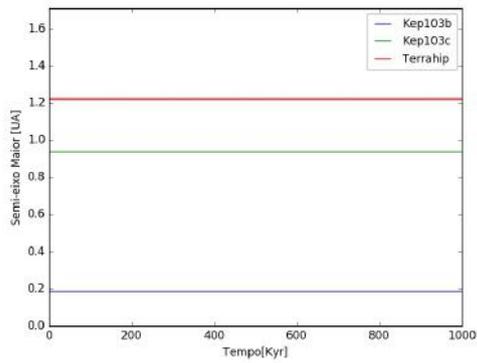


Figura 4.36: Simulação de 1 milhão de anos para o sistema planetário Kepler-103

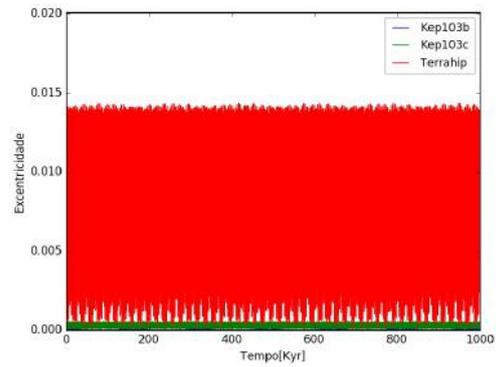
Tabela 4.14: Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações

-	a[au]
Simulação 1	1.1
Simulação 2	1.1298
Simulação 3	1.1596
Simulação 4	1.1894
Simulação 5	1.2192
Simulação 6	1.249
Simulação 7	1.2788
Simulação 8	1.3086
Simulação 9	1.3384
Simulação 10	1.3682
.....	...
Simulação 45	2.4112
Simulação 46	2.441
Simulação 47	2.4708
Simulação 48	2.5006
Simulação 49	2.53040
Simulação 50	2.5602
Simulação 51	2.59

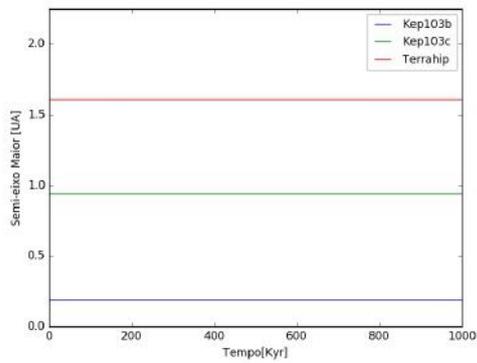
A Figura 4.37 mostra alguns gráficos das 51 simulações rodadas. Observe que todas mostram a Terra hipotética estável. De fato nenhuma simulação mostrou-se instável, ou seja, o tempo de sobrevivência para a Terra hipotética foi de 1 milhão de anos. A partir desses resultados, podemos concluir que um planeta tipo Terra poderia orbitar a estrela Kepler-103a na ZH do sistema planetário sem sofrer grandes perturbações dos outros planetas caso a excentricidade dos planetas de Kepler-103 seja próxima de zero.



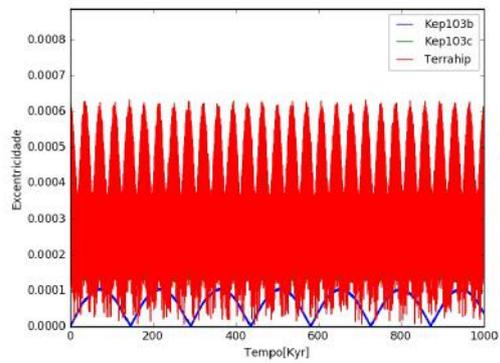
(a) Simulação 5



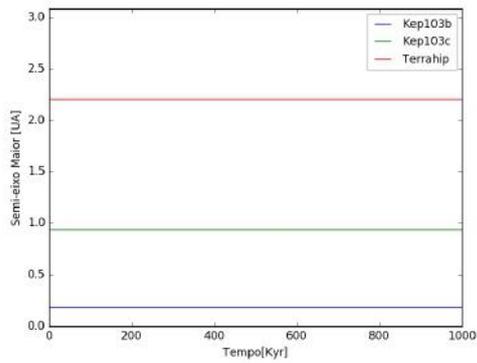
(b) Simulação 5



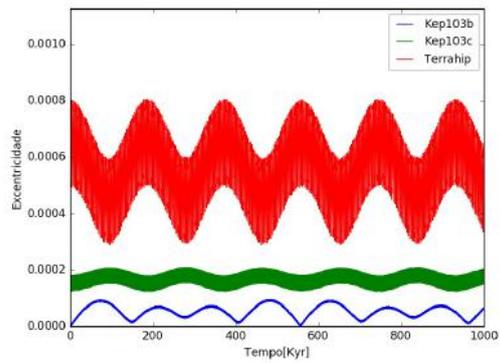
(c) Simulação 18



(d) Simulação 18



(e) Simulação 38



(f) Simulação 38

Figura 4.37: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).

4.5 Kepler-289

Tabela 4.15: Parâmetros orbitais dos planetas de Kepler-289 utilizados nas simulações

Planetas	a [au]	e	Massa M_{\oplus}	Raio R_{\oplus}
Kepler-289b	0.21 ± 0.01	0.0 (adotado)	7.3 ± 6.8	2.15 ± 0.10
Kepler-289c	0.51 ± 0.03	0.0 (adotado)	132 ± 17	11.59 ± 0.19
Kepler-289d	0.33 ± 0.02	0.0 (adotado)	4.0 ± 0.9	2.68 ± 0.17

Tabela 4.16: Parâmetros estelares

Estrela Central	Massa [M_{\odot}]	Raio [R_{\odot}]	Temperatura [K]
Kepler-289a	1.08 ± 0.02	1.00 ± 0.02	5990 ± 38

O sistema planetário Kepler-289 possui uma estrela central bem parecida com o Sol em massa e raio. Está localizado a aproximadamente 2.300 anos-luz do Sistema Solar e possui três planetas descobertos. Um deles, Kepler-289d é uma super-Terra. Nenhum planeta foi detectado na zona de habitabilidade de Kepler-289a (Figura⁶ 4.38). A fim de estudar este sistema planetário, recorreremos aos dados do artigo [Lynn10 et al., 2011]. Vale lembrar que os valores dos parâmetros do *MERCURY* citados anteriormente no estudo de Kepler-30 e Kepler-103, são os mesmos para Kepler-289.

⁶Note que a ordem de Kepler-289c e Kepler-289d encontra-se trocadas, pois Kepler-289d foi descoberto recentemente. A ordem das letras dadas aos planetas tem relação com a descoberta e não com a distância da estrela ao planeta.



Figura 4.38: Ilustração do sistema Kepler-289 visto de cima com sua zona habitável em verde

Inicialmente, verificamos a estabilidade do sistema planetário para um tempo de 1 milhão de anos onde não constatamos qualquer instabilidade aparente (Figura 4.39). Portanto, introduzimos um planeta do tipo Terra na zona habitável numa órbita circular. Os parâmetros utilizados nas 51 simulações podem ser encontrados na tabela 4.17 e o incremento no semi-eixo maior da Terra é $\Delta a_{ZH} = 0.0246$ au.

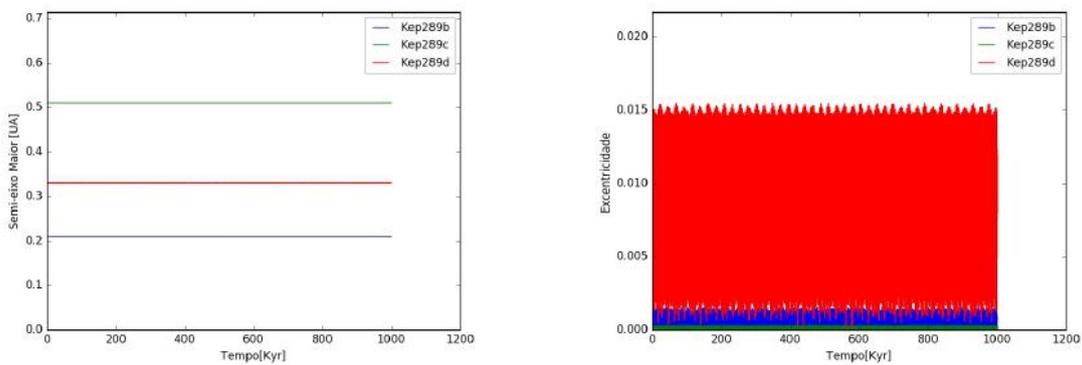
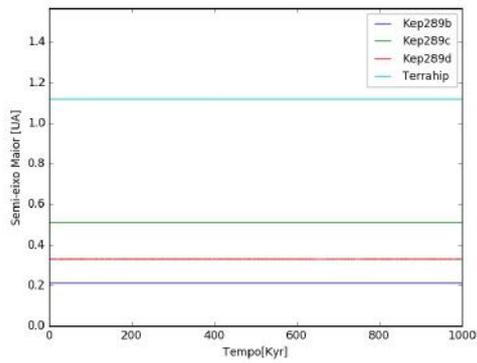


Figura 4.39: Teste de estabilidade para o sistema planetário Kepler-289

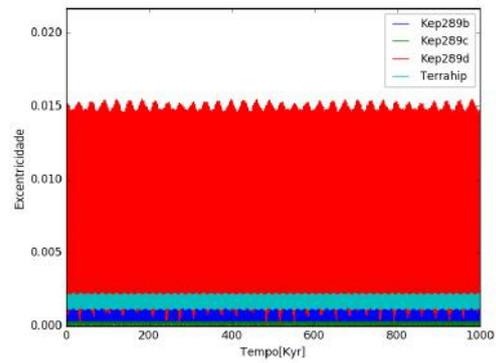
Tabela 4.17: Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações

-	a[au]
Simulação 1	0.9100
Simulação 2	0.9246
Simulação 3	0.9492
Simulação 4	0.9738
Simulação 5	0.9984
Simulação 6	1.023
Simulação 7	1.0476
Simulação 8	1.0722
Simulação 9	1.0968
Simulação 10	1.0968
.....	...
Simulação 45	1.9824
Simulação 46	2.007
Simulação 47	2.0316
Simulação 48	2.0562
Simulação 49	2.0808
Simulação 50	2.1054
Simulação 51	2.13

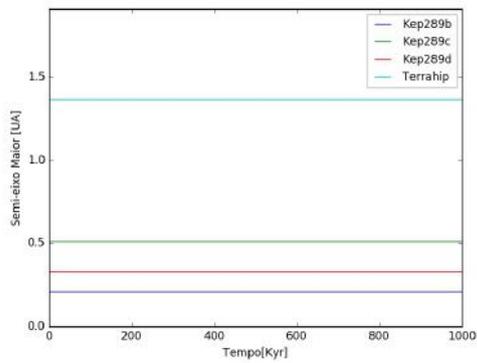
Note que Kepler-289 possui o planeta de maior massa com aproximadamente $1/3$ da massa de Júpiter. Portanto, as chances de que este planeta perturbe a órbita de uma Terra hipotética na ZH a ponto de desestabilizá-la são pequenas uma vez que a maior aproximação entre ambos, no começo das simulações, é de aproximadamente 0.39 au (na simulação 1). A Figura 4.40 mostra algumas simulações dentre as 51 simulações rodadas; não apenas as simulações mostradas abaixo mas em todas a Terra hipotética comportando-se de modo estável. Portanto, podemos concluir que um planeta do tipo Terra pode orbitar a estrela Kepler-289a na ZH do sistema planetário sem sofrer grandes perturbações dos outros planetas, desde que a órbita seja circular e que nenhum novo planeta seja adicionado ao sistema. A descoberta de um novo planeta geraria a necessidade de mais estudos dinâmicos.



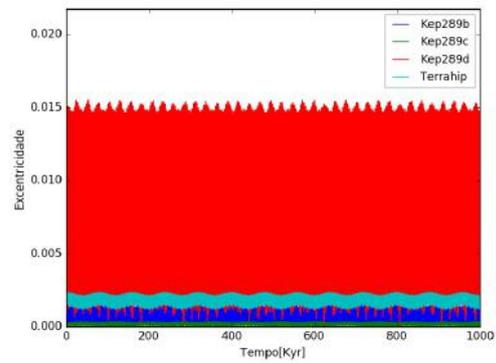
(a) Simulação 10



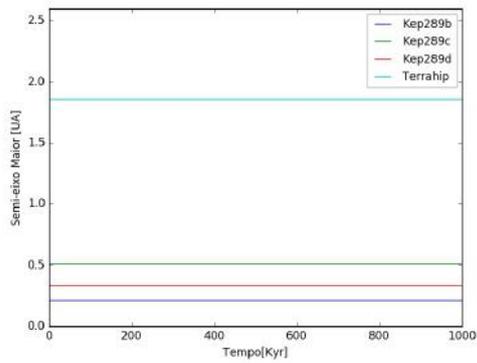
(b) Simulação 10



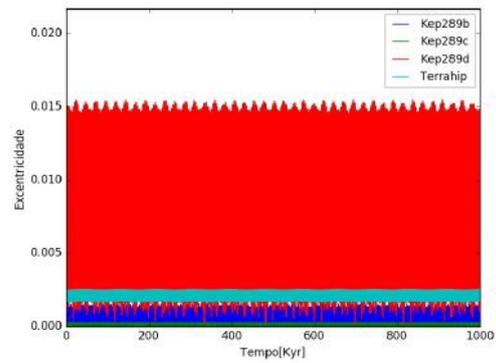
(c) Simulação 20



(d) Simulação 20



(e) Simulação 40



(f) Simulação 40

Figura 4.40: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).

4.6 Kepler-11

Tabela 4.18: Dados do sistema Kepler-11

-	Kep11b	Kep11c	Kep11d	Kep11e	Kep11f	Kep11g
Semi-Eixo maior[au]	0.091 ± 0.001	0.107 ± 0.001	0.155 ± 0.001	0.195 ± 0.002	0.250 ± 0.002	0.466 ± 0.001
excentricidade	$0.045^{+0.068}_{-0.042}$	$0.026^{+0.063}_{-0.013}$	$0.004^{+0.002}_{-0.002}$	$0.012^{+0.006}_{-0.006}$	$0.013^{+0.011}_{-0.009}$	< 0.15
Massa (M_{\oplus})	$1.9^{+1.4}_{-1.0}$	$2.9^{+2.9}_{-1.6}$	$7.3^{+0.8}_{-1.5}$	$8.0^{+1.5}_{-2.1}$	$2.0^{+0.8}_{-0.9}$	< 25
Raio (R_{\oplus})	$1.8^{+0.03}_{-0.05}$	$2.87^{+0.05}_{-0.06}$	$3.12^{+0.06}_{-0.07}$	$4.19^{+0.07}_{-0.09}$	$2.49^{+0.048}_{-0.07}$	$3.33^{+0.06}_{-0.08}$

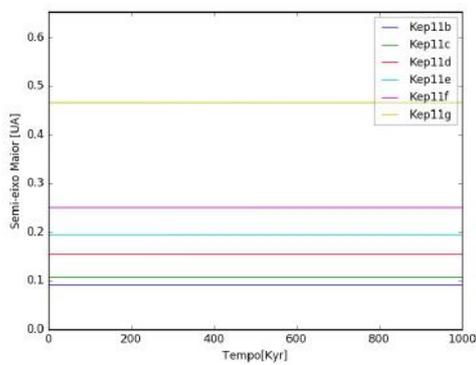
Tabela 4.19: Parâmetros estelares

Estrela Central	Massa [M_{\odot}]	Raio [R_{\odot}]	Temperatura [K]
Kepler-11a	$0.961^{+0.025}_{-0.025}$	$1.065^{+0.017}_{-0.022}$	5663^{+55}_{-66}

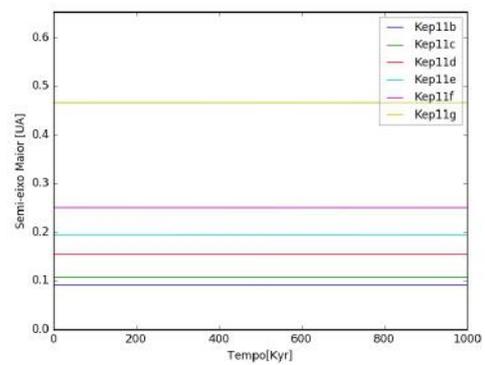
O sistema exoplanetário Kepler-11 é composto por seis planetas, todos possivelmente de baixa densidade. O menor planeta possui raio $R = 1.8R_{\oplus}$ e o maior planeta um raio $R = 4.2R_{\oplus}$. A estrutura desse sistema planetário é tal que todos os planetas estão numa órbita bem compacta (Figura 4.41) [Lissauer et al., 2013]. Alguns parâmetros orbitais utilizados neste estudo podem ser encontrados na Tabela 4.18. Kepler-11g não possui massa nem excentricidade bem determinadas [Lissauer et al., 2013]. O limite máximo de massa para este planeta, de acordo com a literatura é de $25M_{\oplus}$, enquanto que o limite máximo de excentricidade é de 0.15; esses valores máximos são determinados por estudos de dinâmica orbital aumentando os parâmetros de massa planetária e verificando para quais valores o sistema planetário é estável. Devido a maior influência causada por planetas de alta massa num sistema planetário qualquer, fixamos a massa de Kepler-11g no limite máximo. Deste modo, as chances de encontrarmos instabilidades serão maiores. Estudando a dinâmica planetária de Kepler-11 neste contexto, se o sistema planetário permanecer estável após a introdução de uma Terra hipotética, podemos induzir que, no caso de Kepler-11g possuir uma massa verdadeira menor do que $25M_{\oplus}$, é possível que o sistema planetário continue estável. Baseando-se nesta hipótese, executamos inicialmente duas simulações para testar a estabilidade do sistema: uma fixando Kepler-11g numa órbita circular e a outra numa órbita tal que Kepler-11g possua excentricidade $e = 0.15$. Podemos notar que tanto para a excentricidade máxima permitida ($e = 0.15$) quanto para a mínima ($e=0$), até 1 milhão de anos, os planetas não sofrem instabilidades dinâmicas (Figuras 4.42 e 4.43).



Figura 4.41: Sistema planetário Kepler-11 visto de cima com sua zona habitável em verde

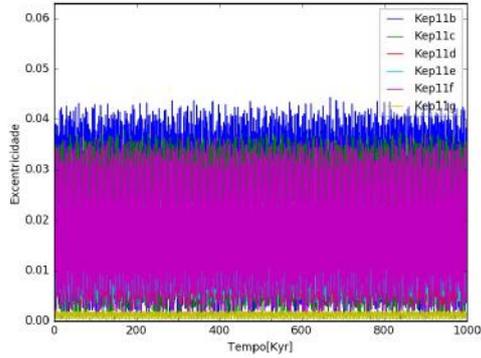


(a) Variação temporal do semi-eixo maior

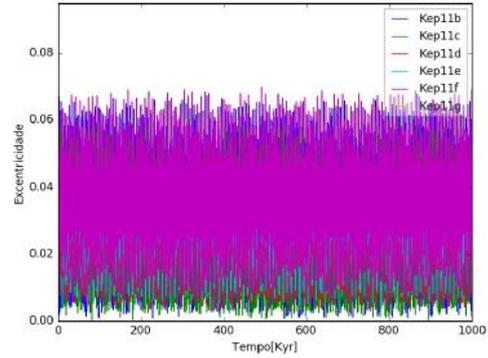


(b) Variação temporal do semi-eixo maior

Figura 4.42: à esquerda encontra-se a simulação cuja $e=0$ (mínimo) e à direita $e=0.15$ (máximo)



(a) Variação temporal da excentricidade



(b) Variação temporal da excentricidade

Figura 4.43: Continuação

Portanto, introduzimos um planeta do tipo Terra na ZH e executamos 52 simulações (Tabela 4.20), tal que o passo utilizado é de $\Delta a_{ZH} = 0.0208$ au e a excentricidade inicial de Kepler-11g nula. Analisando todas as simulações rodadas, não encontramos qualquer indício de instabilidade até 1 milhão de anos (Figura 4.44). Podemos assim concluir que, na presença de um planeta cuja massa é aproximadamente $25M_{\oplus}$ e órbita circular, as chances de sobrevivência de um planeta semelhante à Terra é alta. Portanto, como obtivemos resultados onde o sistema planetário comporta-se de modo estável, é bem provável que novas simulações realizadas posteriormente à determinação exata da massa e da excentricidade de Kepler-11g resultem em estabilidade para o sistema planetário. A Figura 4.45 mostra alguns resultados das 52 simulações analisadas.

Tabela 4.20: Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações para o sistema planetário Kepler-11

-	a[au]
Simulação 1	0.77
Simulação 2	0.790784314
Simulação 3	0.811568628
Simulação 4	0.832352942
Simulação 5	0.853137256
Simulação 6	0.87392157
Simulação 7	0.894705884
Simulação 8	0.915490198
Simulação 9	0.936274512
Simulação 10	0.957058826
.....	...
Simulação 45	1.684509816
Simulação 46	1.70529413
Simulação 47	1.726078444
Simulação 48	1.746862758
Simulação 49	1.767647072
Simulação 50	1.788431386
Simulação 51	1.8092157
Simulação 52	1.830000014

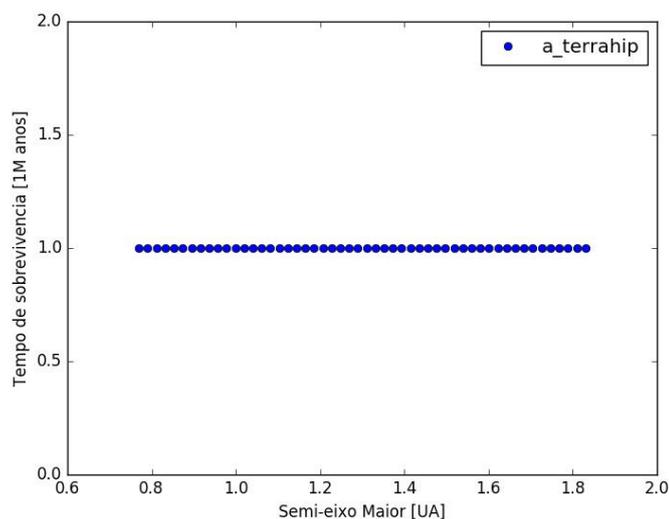
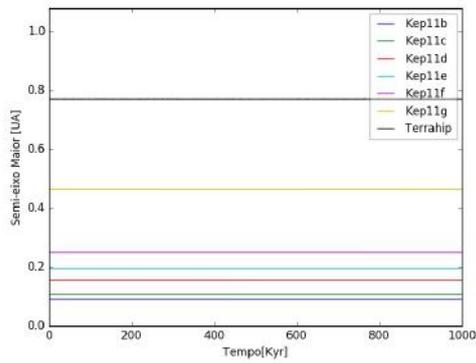
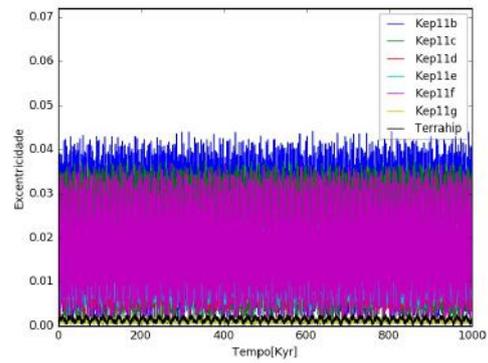


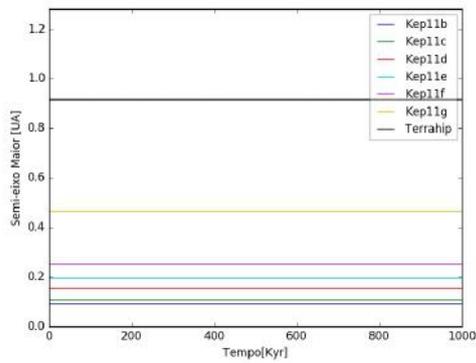
Figura 4.44: Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior para o sistema planetário Kepler-11



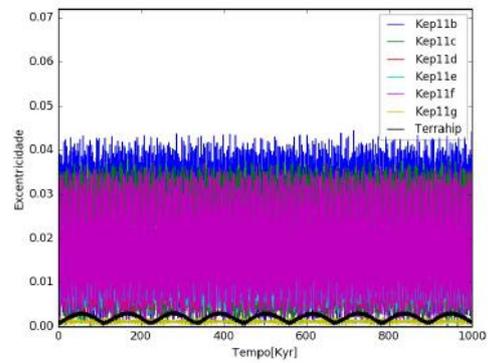
(a) Simulação 1



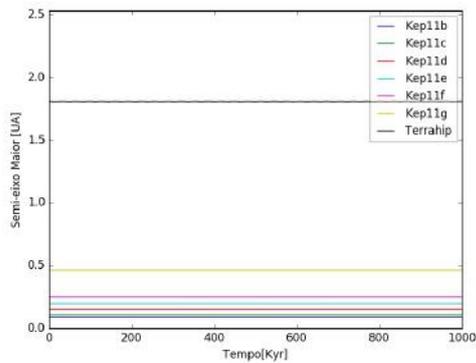
(b) Simulação 1



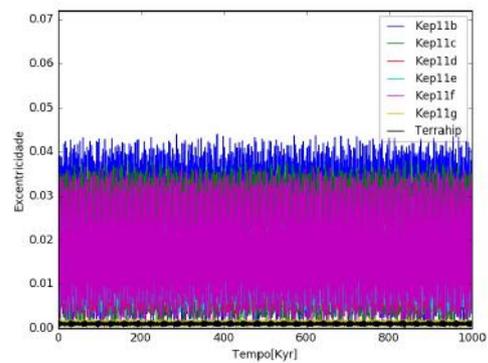
(c) Simulação 8



(d) Simulação 8



(e) Simulação 51



(f) Simulação 51

Figura 4.45: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).

No caso anterior tínhamos Kepler-11g numa órbita circular, no entanto, Kepler-11g pode ter uma órbita elíptica dado que a excentricidade deste planeta não está determinada. Portanto, executamos 52 simulações tal como foi realizado anteriormente com o mesmo passo, tempo de integração e valores de semi-eixo maior para a Terra hipotética, porém, alteramos a excentricidade de Kepler-11g para o limite máximo permitido de

$e=0.15$. Vale ressaltar que a distância de ejeção utilizada foi de 10 UA. O gráfico de sobrevivência ao longo do tempo para cada semi-eixo maior dentro da ZH mostra que existe instabilidade apenas para a simulação 15. Nesta região, a Terra hipotética sobrevive por pouco menos de 500 mil anos (Figura 4.46). Como este é um caso de instabilidade dinâmica, fizemos uma verificação através da curva de colisão (Figura 4.50). Note que tanto para Kepler-11f quanto para Kepler-11g a Terra interage com ambos os planetas o suficiente para haver instabilidade (pontos acima da reta), ao passo que não há perturbação mútua entre Kepler-11b e a Terra (pontos abaixo da reta). Observe que para algumas simulações do início, a Terra hipotética assume valores grandes de excentricidade com $e > 0.2$ (simulação 13) e a partir da simulação 16, as amplitudes das excentricidades diminuem significativamente (Figuras 4.47, 4.48 e 4.49).

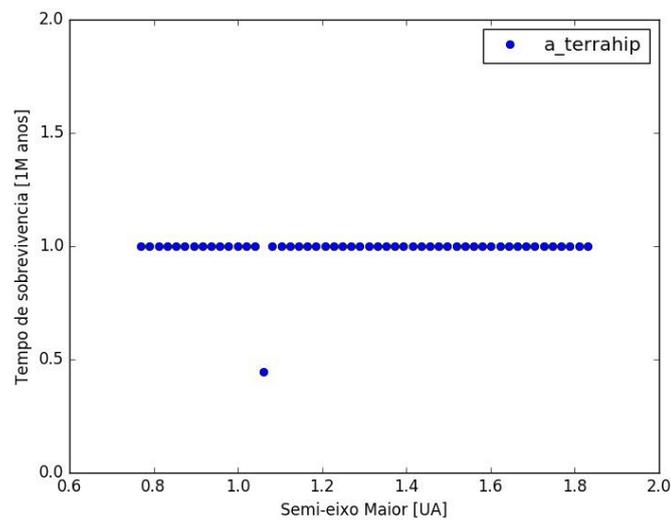
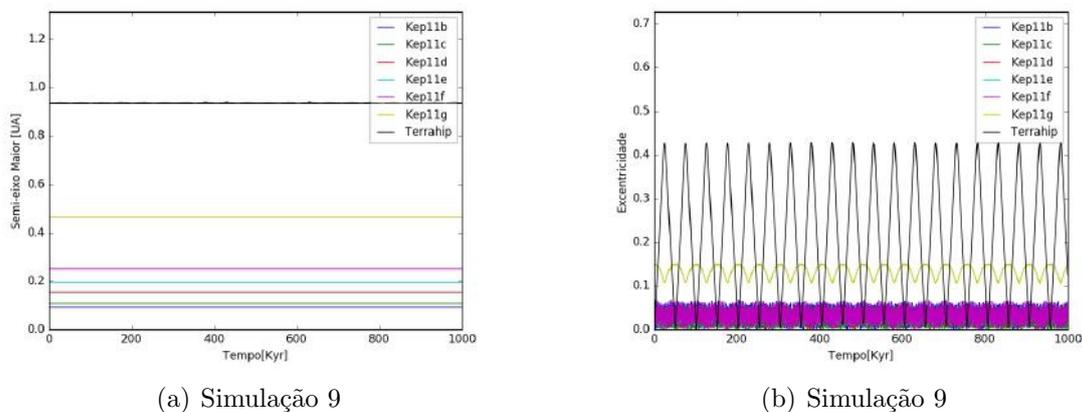


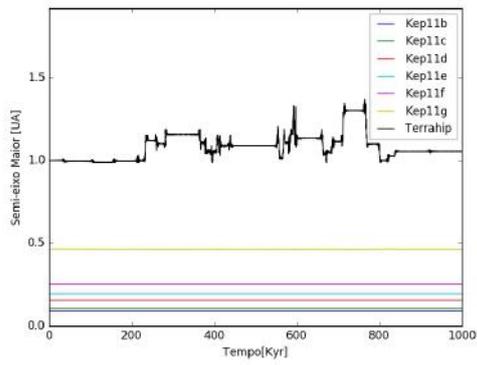
Figura 4.46: Tempo de sobrevivência da Terra hipotética versus valor inicial de semi-eixo maior



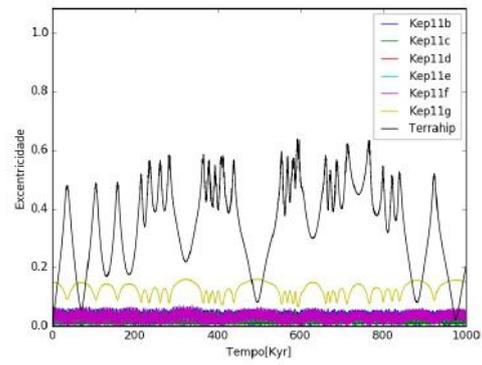
(a) Simulação 9

(b) Simulação 9

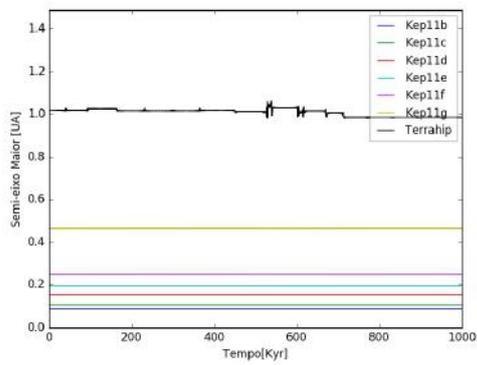
Figura 4.47: Variação temporal do semi-eixo maior (à esquerda) e variação temporal da excentricidade (à direita).



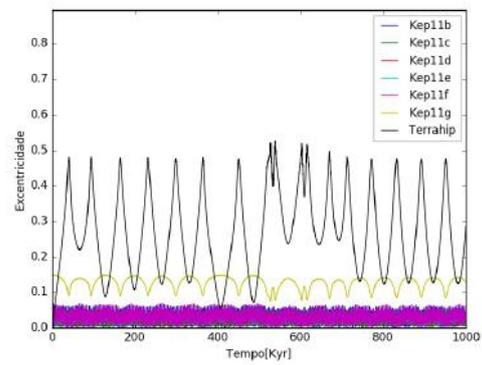
(a) Simulação 12



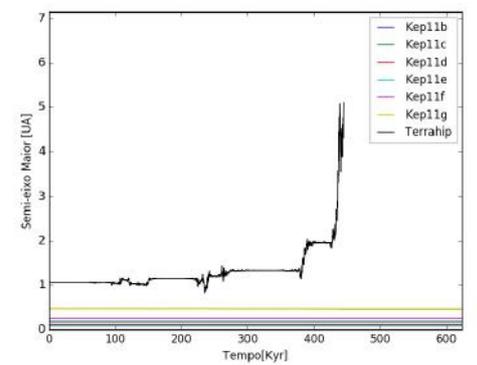
(b) Simulação 12



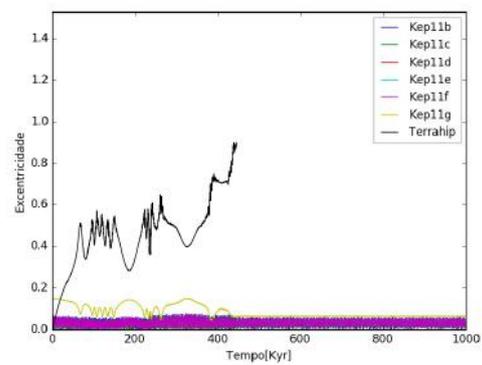
(c) Simulação 13



(d) Simulação 13

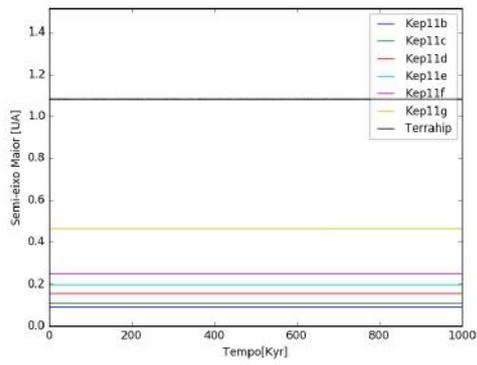


(e) Simulação 15

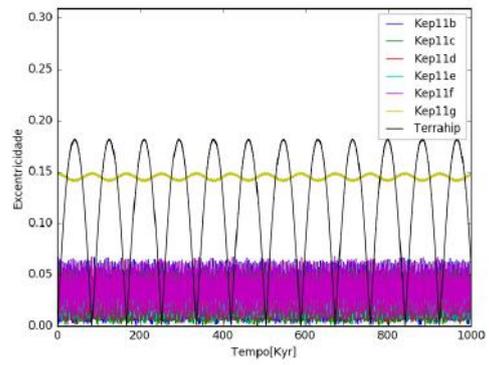


(f) Simulação 15

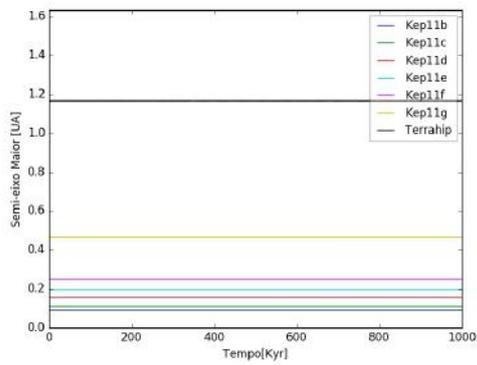
Figura 4.48: Continuação



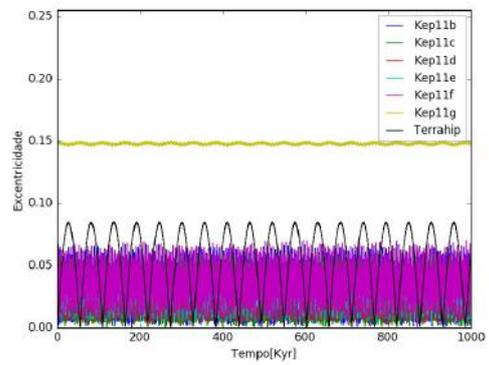
(a) Simulação 16



(b) Simulação 16

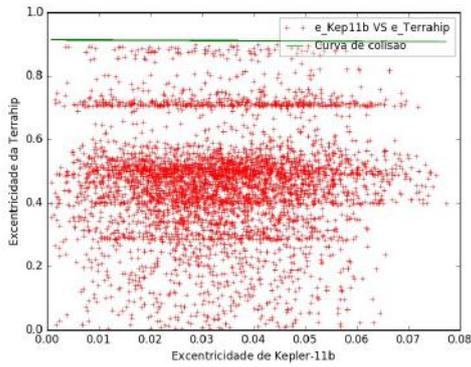


(c) Simulação 20

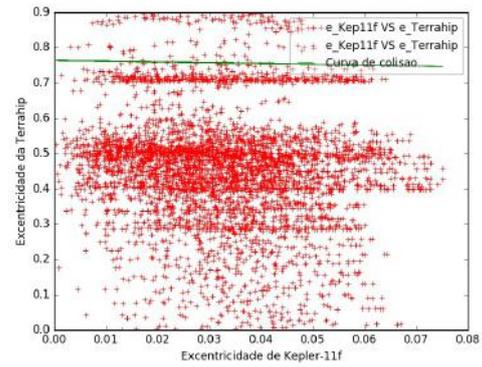


(d) Simulação 20

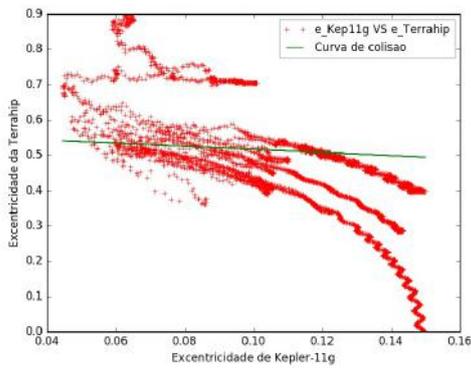
Figura 4.49: Continuação



(a) Curva de colisão para Kepler-11b vs Terra



(b) Curva de colisão para Kepler-11f vs Terra



(c) Curva de colisão para Kepler-11g vs Terra

Figura 4.50: Verificação de instabilidade dinâmica através da curva de colisão

Baseando-se nos resultados, podemos concluir que Kepler-11g orbitando a estrela central fora de uma órbita circular causa uma perturbação aparente na dinâmica do sistema planetário. Tanto a massa de Kepler-11g quanto sua excentricidade foram fixados no maior valor possível de acordo com [Lissauer et al., 2013]. Baseando-se nesses resultados, podemos inferir que há possibilidades do sistema planetário hospedar uma Terra hipotética na zona habitável supondo que a massa de Kepler-11g possua valor menor ou igual a $25M_{\oplus}$ e/ou sua excentricidade seja inferior ao limite máximo.

4.7 K2-19

K2-19 é um sistema planetário com uma estrela central de tipo espectral G9V com três planetas orbitando ao seu redor. Um desses três planetas, K2-19d, possui um limite máximo de 14 vezes a massa da Terra e raio similar ao da Terra. K2-19c e K2-19d são os dois planetas mais externos. Estes planetas estão numa ressonância de movimentos médios (MMR) 3:2 [Sinukoff et al., 2015]. Vale ressaltar que o valor de massa para este sistema

planetário possui algumas disparidades na literatura. [Barros et al., 2015] encontrou valores de massa para K2-19b e K2-19c de aproximadamente 44 e 16 massas terrestres, ao passo que [Dai et al., 2016] encontrou para ambos os planetas massas de cerca de 28 e 25 massas terrestres. Utilizamos os valores calculados de massa de [Dai et al., 2016] pois havia mais informações a respeito dos parâmetros planetários neste trabalho. As tabelas 4.21 e 4.22 mostram os parâmetros utilizados nestas simulações.

Tabela 4.21: Parâmetros orbitais dos planetas de K2-1 utilizados nas simulações

Planetas	a [au]	e	Massa M_{\oplus}	Raio R_{\oplus}
K2-19b	0.0740 ± 0.0012	-	$28.5^{+5.4}_{-5.0}$	7.74 ± 0.39
K2-19c	0.0971 ± 0.0016	-	$25.6^{+7.1}_{-7.1}$	$4.86^{+0.62}_{-0.44}$
K2-19d	0.0344 ± 0.0006	-	< 14.0	1.14 ± 0.13

Tabela 4.22: Parâmetros estelares

Estrela Central	Massa [M_{\odot}]	Raio [R_{\odot}]	Temperatura [K]	Fronteiras da ZH [au]
Kepler-11a	0.93 ± 0.05	0.86 ± 0.04	5430 ± 60	[0.583,1.386]

Inicialmente executamos uma simulação para testar a estabilidade do sistema planetário. A simulação permaneceu rodando até um tempo de integração de 1 milhão de anos. O passo de integração utilizado foi de 1/20 do menor período orbital dentre os planetas de K2-19 e as órbitas dos planetas foram adotadas como circulares. De acordo com as Figuras 4.51 e 4.52, o sistema planetário não apresenta instabilidades. Para estudarmos a possibilidade de existência de um planeta do tipo Terra na zona habitável, nós calculamos a região habitável ao redor de K2-19a [Kopparapu et al., 2014] através de sua luminosidade e temperatura efetiva; os resultados podem ser encontrados na (Tabela 4.22). Rodamos 51 simulações com a Terrahip na ZH de K2-19 começando da fronteira interna. Os valores de semi-eixo maior da Terra hipotética encontram-se na tabela 4.23. Analisamos os dados das 51 simulações e não encontramos qualquer instabilidade nos parâmetros orbitais dos planetas, ou seja, todo o sistema planetário sobreviveu até o final das simulações. Tal resultado poderia ser esperado uma vez que o planeta de maior massa, possui menos de $30M_{\oplus}$, ou seja, a perturbação causada por este planeta é pequena. A Figura 4.53 mostra algumas das 51 simulações rodadas. Podemos concluir que, para os planetas do sistema planetário K2-19, assumindo excentricidades próximas de zero, um planeta do tipo Terra poderia orbitar a estrela central na zona habitável.

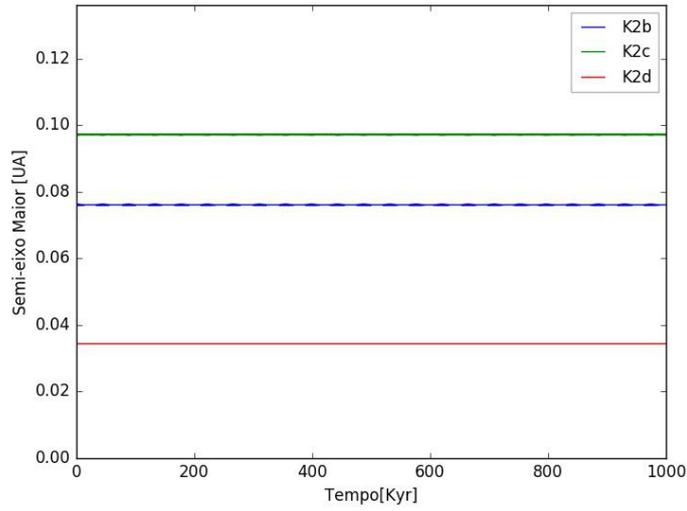


Figura 4.51: Variação temporal do semi-eixo maior para os planetas do sistema planetário K2-19

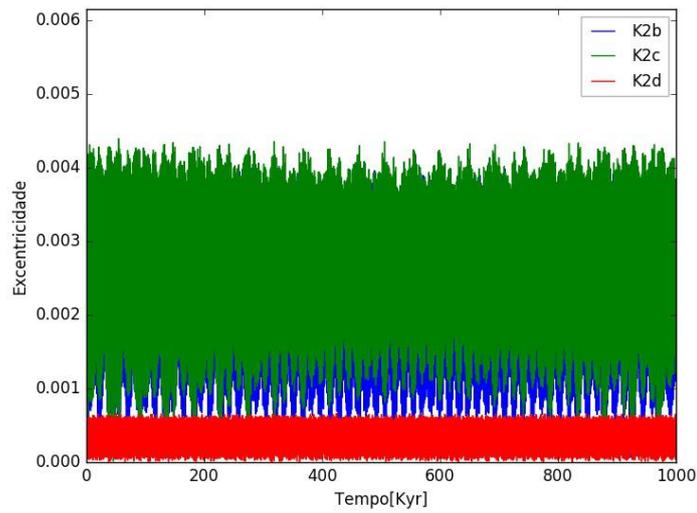
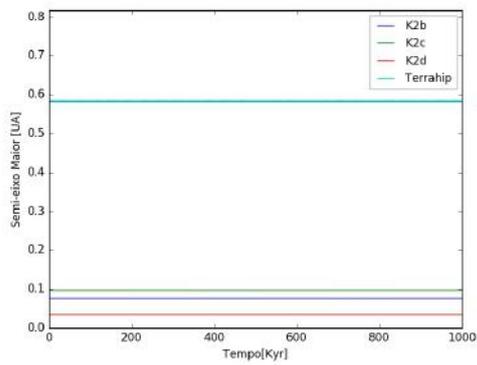


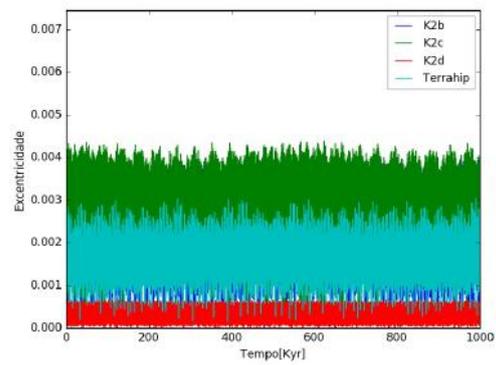
Figura 4.52: Variação temporal da excentricidade para os planetas do sistema planetário K2-19

Tabela 4.23: Semi-eixos da Terra hipotética utilizados nas 51 simulações

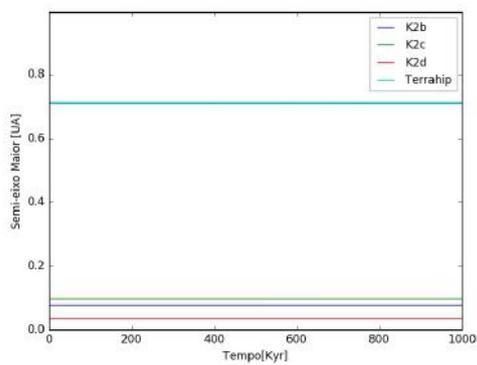
-	a[au]
Simulação 1	0.583
Simulação 2	0.59906
Simulação 3	0.61512
Simulação 4	0.63118
Simulação 5	0.64724
Simulação 6	0.6633
Simulação 7	0.67936
Simulação 8	0.69542
Simulação 9	0.71148
Simulação 10	0.72754
.....	...
Simulação 45	1.28964
Simulação 46	1.3057
Simulação 47	1.32176
Simulação 48	1.33782
Simulação 49	1.35388
Simulação 50	1.36994
Simulação 51	1.386



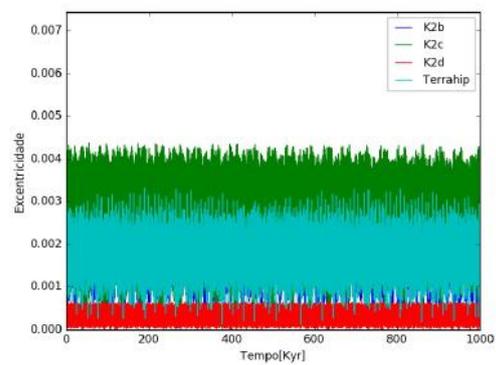
(a) Simulação 1



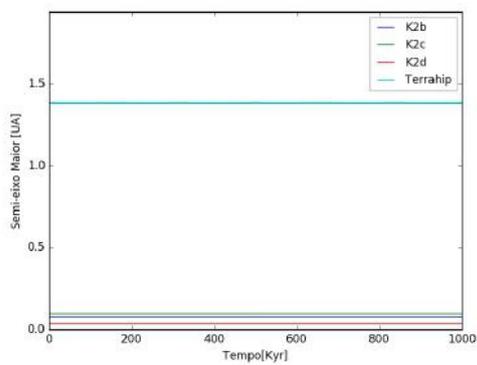
(b) Simulação 1



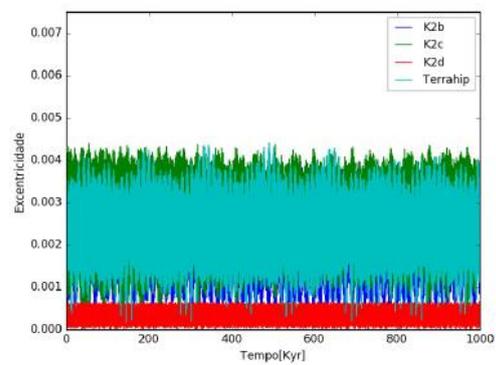
(c) Simulação 9



(d) Simulação 9



(e) Simulação 51



(f) Simulação 51

Figura 4.53: Integração de 1 milhão de anos para o sistema planetário K2-19 com um planeta do tipo Terra orbitando a estrela central na região da zona habitável. À esquerda encontram-se os gráficos de Semi-eixo maior vs Tempo e à direita Excentricidade vs Tempo.

5 Conclusões e Perspectivas

Grande parte dos nossos estudos apresentaram resultados que mostram que a presença de um planeta do tipo Terra seria viável na zona habitável da maioria dos sistemas planetários estudados, porém, como alguns sistemas planetários possuem planetas cuja incerteza de alguns parâmetros tal como a massa são altos, ainda é necessário a realização de mais estudos de dinâmica orbital para que possamos ter maiores certezas de que um planeta Terra possa ser hospedado na zona habitável desses sistemas planetários.

5.1 Estudo da dinâmica orbital de exoplanetas

Neste trabalho estudamos a dinâmica orbital de alguns sistemas extrassolares. Este estudo é de fundamental importância, uma vez que existe a necessidade de entender o comportamento dos planetas em suas órbitas. Não havendo um estudo dinâmico, dificilmente saberíamos se um determinado planeta que esteja orbitando sua estrela seria estável por um longo período de tempo. Estudamos sete sistemas exoplanetários, porém há diversos outros a serem estudados; muitos dos quais não possuem todos os dados necessários. Quando um planeta não possui valores de massa e/ou excentricidade determinados, o estudo de dinâmica orbital torna-se mais detalhado e complexo. Tal complexidade demanda um maior tempo de CPU para executar simulações, por este motivo executamos cerca de 50 simulações por sistema planetário. Alguns sistemas planetários como o Kepler-62 e o Kepler-11 possuem valores de limite superior de massa para um ou mais planetas. A fim de entendermos melhor a dinâmica desses sistemas planetários, é necessário mais estudos para que suas massas bem como as excentricidades planetárias sejam determinadas. As simulações realizadas para estes sistemas planetários foram executadas tomando como base os maiores valores possíveis de massa. Constatamos que existem regiões de estabilidade para a Terra hipotética na ZH dado a condição inicial. Assim, quando as massas planetárias tornarem-se conhecidas, elas devem possuir valores menores que o valor utilizado. Logo, é esperado que, para planetas cuja massa seja menor do que a utilizada, a Terra hipotética deverá sobreviver na ZH tal como foi mostrado para o Kepler-11 e Kepler-62 em algumas regiões. Devido ao tempo gasto em cada simulação executamos cerca de 50 simulações de um milhão de anos. No entanto, seria interessante realizar simulações da ordem de 10-20 milhões de anos, principalmente para alguns casos onde a Terra hipotética assume amplitudes de excentricidade maiores do que 0.1. Estes casos ocorreram para o sistema planetário Kepler-11 quando estipulamos que Kepler-11g possuiria massa e excentricidade nos limites máximos permitidos. Ampliar o tempo das simulações nesses casos poderia revelar casos de instabilidades que não aparecem para o tempo de um milhão de anos. Vale ressaltar que este estudo foi realizado para apenas sete sistemas planetários. A grande parte dos sistemas planetários conhecidos não possuem

valores de massa e excentricidade bem determinados, onde muitas vezes a incerteza atinge valores tão grandes quanto o próprio valor absoluto de massa/excentricidade. Tanto para Kepler-11 quanto Kepler-62, caso esses parâmetros não sejam catalogados em breve, um estudo de dinâmica orbital onde tomamos grades de valores de massa para os planetas podem ser realizados. Este tipo de estudo mostraria quais valores de massa os planetas podem assumir, uma vez que temos grandes incertezas de massa, como é o caso de Kepler-11c.

5.2 Próximas Missões

No começo da década de 90 até os anos 2000 pouco era sabido a respeito de exoplanetas. Apenas algumas dezenas de planetas extrassolares tinham sido descobertos. Algumas missões foram importantes para o começo da busca por novos sistemas exoplanetários. O telescópio espacial Hubble, Spitzer, entre outros, localizados no espaço e em solo foram responsáveis pelas primeiras dezenas de exoplanetas a serem publicados na literatura. As missões CoRoT e Kepler trouxeram um novo olhar tanto quantitativo quanto qualitativo a respeito dos sistemas planetários que até então eram desconhecidos. O grande desafio dessas missões é detectar planetas do tipo Terra em zonas habitáveis de estrelas semelhantes ao Sol. Essas estrelas possuem zonas habitáveis relativamente distantes de suas estrelas, além do fato de que planetas terrestres são pequenos, logo, quando orbitam suas estrelas na ZH causam uma enorme dificuldade de detecção. As próximas missões espaciais *Transit Exoplanet Survey Satellite* (TESS) (Figura 5.1) e *James Webb Space Telescope* (JWST) (Figura 4.1) serão promissoras. TESS será lançada no ano de 2018, utilizará o mesmo método de detecção que o telescópio espacial Kepler. No entanto, TESS não ficará restrito a uma pequena área do céu em busca de exoplanetas. Observará quase meio milhão de estrelas de tipo espectral G, K e M, das quais cerca de 100 mil estrelas estarão num raio de até 200 anos luz. A missão TESS deve identificar um total de 3 mil candidatos a exoplanetas semelhantes à Terra na zona habitável. Com o intuito de obter mais detalhes nas observações, outras missões como a JWST analisarão com mais detalhes os candidatos a planetas em diversas estrelas. O JWST será utilizado em diversas áreas, desde o estudo de estrelas e exoplanetas até galáxias. Ele contará com um espectrógrafo que será utilizado para espectroscopia de trânsito, que serve para analisar a atmosfera de exoplanetas. Atualmente a tecnologia não permite a fácil detecção de planetas gêmeos da Terra nem a fácil detecção de elementos químicos na atmosfera de exoplanetas distantes. No entanto, as missões espaciais e terrestres foram capazes de determinar diversos parâmetros fundamentais ao estudo de dinâmica orbital. As próximas missões nos fornecerão mais informações sobre sistemas planetários, principalmente aqueles que possuem planetas pequenos de difícil determinação de elementos orbitais. A obtenção desses parâmetros será crucial para que possamos determinar se um

planeta semelhante à Terra é estável. A questão relacionada a vida fora da Terra não é recente, para respondermos essas questões precisamos de dados para pôr em prática o método científico. As missões TESS e a JWST são apenas um pequeno passo a frente na busca pelo entendimento dessas questões relacionadas ao ser humano. Buscar vida fora da Terra é um meio de entender a nossa própria origem, o nosso lugar no universo; e essas missões espaciais tem nos ajudado bastante a responder essas questões filosóficas. Além do TESS e o JWST, existem missões espaciais mais ambiciosas projetadas. Algumas que devem ser lançadas até o final de 2030 são as missões PLATO, JUICE e ATHENA. Cada missão trará novas respostas que costumam implicar em mais perguntas. Este ciclo tem se prolongado por milênios, forçando o ser humano a buscar mais respostas. As missões espaciais têm sido aperfeiçoadas cada vez mais por consequências diretas e indiretas deste ciclo de perguntas e respostas, e hoje essas missões tornaram-se fundamentais no processo de busca pelo conhecimento do ser humano pelo próprio ser humano.

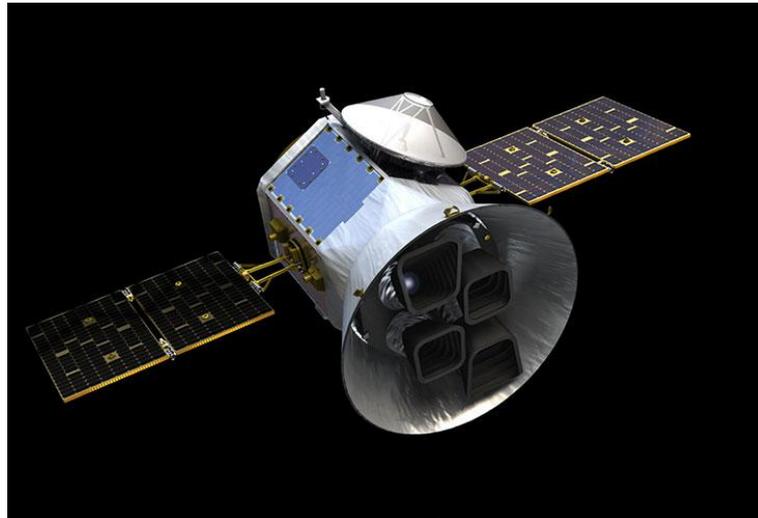


Figura 5.1: Ilustração do telescópio espacial TESS que será lançado em junho de 2018. *Créditos: NASA/GSFC*

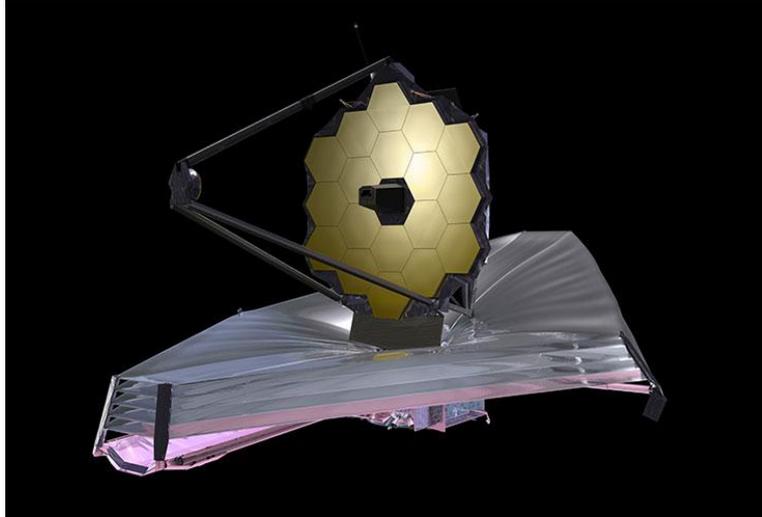


Figura 5.2: Ilustração do telescópio espacial JWST que será lançado em outubro de 2018. *Créditos: NASA/WIKIMEDIA COMMONS*

REFERÊNCIAS

- [Barnes and Raymond, 2004] Barnes, R. and Raymond, S. N. (2004). Predicting planets in known extrasolar planetary systems. i. test particle simulations. *The Astrophysical Journal*, 617(1):569.
- [Barros et al., 2015] Barros, S., Almenara, J., Demangeon, O., Tsantaki, M., Santerne, A., Armstrong, D. J., Barrado, D., Brown, D., Deleuil, M., Lillo-Box, J., et al. (2015). Photodynamical mass determination of the multiplanetary system k2-19. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(4):4267–4276.
- [Borucki et al., 2013] Borucki, W. J., Agol, E., Fressin, F., Kaltenegger, L., Rowe, J., Isaacson, H., Fischer, D., Batalha, N., Lissauer, J. J., Marcy, G. W., et al. (2013). Kepler-62: a five-planet system with planets of 1.4 and 1.6 earth radii in the habitable zone. *Science*, 340(6132):587–590.
- [Chaisson and McMillan, 2002] Chaisson, E. and McMillan, S. (2002). *Astronomy today*. Prentice Hall.
- [Chambers, 1999] Chambers, J. E. (1999). A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304(4):793–799.
- [Dai et al., 2016] Dai, F., Winn, J. N., Albrecht, S., Arriagada, P., Bieryla, A., Butler, R. P., Crane, J. D., Hirano, T., Johnson, J. A., Kiilerich, A., et al. (2016). Doppler monitoring of five k2 transiting planetary systems. *The Astrophysical Journal*, 823(2):115.
- [Dole, 1964] Dole, S. (1964). Habitable planets for man.
- [Fressin et al., 2011] Fressin, F., Torres, G., Rowe, J. F., Charbonneau, D., Rogers, L. A., Ballard, S., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Bryson, S. T., Buchhave, L. a., Ciardi, D. R., Désert, J.-M., Dressing, C. D., Fabrycky, D. C., Ford, E. B., Gautier III, T. N., Henze, C. E., Holman, M. J., Howard, A. W., Howell, S. B., Jenkins, J. M., Koch, D. G., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Marcy, G. W., Quinn, S. N., Ragozzine, D., Sasselov, D. D., Seager, S., Barclay, T., Mullally, F., Seader, S. E., Still, M., Twicken, J. D., Thompson, S. E., and Uddin, K. (2011). Two Earth-sized planets orbiting Kepler-20. *Nature*, 482:195–198.
- [Jones et al., 2001] Jones, B., Sleep, P., and Chambers, J. (2001). The stability of the orbits of terrestrial planets in the habitable zones of known exoplanetary systems. *Astronomy & Astrophysics*, 366(1):254–262.

- [Kopparapu et al., 2014] Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., SchottelKotte, J., Kasting, J. F., Domagal-Goldman, S., and Eymet, V. (2014). Habitable zones around main-sequence stars: dependence on planetary mass. *The Astrophysical Journal Letters*, 787(2):L29.
- [Lissauer et al., 2013] Lissauer, J. J., Jontof-Hutter, D., Rowe, J. F., Fabrycky, D. C., Lopez, E. D., Agol, E., Marcy, G. W., Deck, K. M., Fischer, D. A., Fortney, J. J., Howell, S. B., Isaacson, H., Jenkins, J. M., Kolbl, R., Sasselov, D., Short, D. R., and Welsh, W. F. (2013). All Six Planets Known To Orbit Kepler-11 Have Low Densities. *The Astrophysical Journal*, 770(2):131.
- [Lynn10 et al., 2011] Lynn10, M. P., Schawinski11, K., Schwamb12, M. E., Simpson, R., and Arfon, M. (2011). Planet hunters vii. discovery of a new low-mass, low-density planet (ph3 c) orbiting kepler-289 with mass measurements of two additional planets (ph3 b and d).
- [Marcy et al., 2014] Marcy, G. W., Isaacson, H., Howard, A. W., Rowe, J. F., Jenkins, J. M., Bryson, S. T., Latham, D. W., Howell, S. B., Gautier III, T. N., Batalha, N. M., et al. (2014). Masses, radii, and orbits of small kepler planets: The transition from gaseous to rocky planets based in part on observations obtained at the w m keck observatory, which is operated by the university of california and the california institute of technology. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 210(2):20.
- [Ofir et al., 2014] Ofir, A., Dreizler, S., Zechmeister, M., and Husser, T.-O. (2014). An independent planet search in the kepler dataset-ii. an extremely low-density super-earth mass planet around kepler-87. *Astronomy & Astrophysics*, 561:A103.
- [Oliveira Filho and Saraiva, 2004] Oliveira Filho, K. d. S. and Saraiva, M. d. F. O. (2004). *Astronomia e astrofísica. São Paulo: Editora Livraria da Física.*
- [Rivera and Haghighipour, 2007] Rivera, E. and Haghighipour, N. (2007). On the stability of test particles in extrasolar multiple planet systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374(2):599–613.
- [Sanchis-Ojeda et al., 2012] Sanchis-Ojeda, R., Fabrycky, D. C., Winn, J. N., Barclay, T., Clarke, B. D., Ford, E. B., Fortney, J. J., Geary, J. C., Holman, M. J., Howard, A. W., et al. (2012). Alignment of the stellar spin with the orbits of a three-planet system. *Nature*, 487(7408):449–453.
- [Sinukoff et al., 2015] Sinukoff, E., Howard, A. W., Petigura, E. A., Schlieder, J. E., Crossfield, I. J., Ciardi, D. R., Fulton, B. J., Isaacson, H., Aller, K. M., Baranec, C., et al. (2015). Ten multi-planet systems from k2 campaigns 1 & 2 and the masses of two hot super-earths. *arXiv preprint arXiv:1511.09213*.

- [Torres et al., 2010] Torres, G., Fressin, F., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Brown, T. M., Bryson, S. T., Buchhave, L. A., Charbonneau, D., Ciardi, D. R., Dunham, E. W., Fabrycky, D. C., Ford, E. B., Gautier, T. N., Gilliland, R. L., Holman, M. J., Howell, S. B., Isaacson, H., Jenkins, J. M., Koch, D. G., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Marcy, G. W., Monet, D. G., Prsa, A., Ragozzine, D., Rowe, J. F., Sasselov, D. D., Steffen, J. H., and Welsh, W. F. (2010). Modeling Kepler transit light curves as false positives: Rejection of blend scenarios for Kepler-9, and validation of Kepler-9d, a super-Earth-size planet in a multiple system.
- [Underwood et al., 2003] Underwood, D. R., Jones, B. W., and Sleep, P. N. (2003). The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *International Journal of Astrobiology*, 2(04):289–299.
- [Weiss and Marcy, 2014] Weiss, L. M. and Marcy, G. W. (2014). The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 earth radii. *The Astrophysical Journal Letters*, 783(1):L6.