

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

**NILCE DA SILVA DOS SANTOS**

**Estudo da Dinâmica de Exocometas nos Sistemas Kepler-90, Kepler-35 e Kepler-38**

Guaratinguetá

2022

**Nilce da Silva dos Santos**

**Estudo da Dinâmica de Exocometas nos Sistemas Kepler-90, Kepler-35 e Kepler-38**

Trabalho de Pós-graduação apresentado ao Conselho de Curso de Pós-graduação em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestrado em Física .

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dra. Silvia Maria Giuliatti Winter

Guaratinguetá  
2022

Santos, Nilce da Silva  
S237e      Estudo da Dinâmica de Exocometas nos Sistemas Kepler-90, Kepler-35 e  
Kepler-38 / Nilce da Silva Santos – Guaratinguetá, 2022.  
99f : il.  
Bibliografia: f. 92-93

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022.  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Silvia Maria Giuliatti Winter

1. Cometas. 2. Sistema solar. 3. Planetas - Exploração. 4. Astronomia.  
I. Título.

CDU 523.64(043)

Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária CRB-8: 9203

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

**NILCE DA SILVA DOS SANTOS**

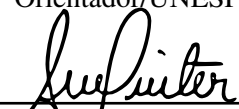
ESTE TRABALHO DE MESTRADO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "MESTRANDO EM FÍSICA "


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Profº Dr. ERNESTO VIEIRA NETO

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
Profª Dra. Sylvia Maria Giuliatti Winter  
Orientador/UNESP-FEG

  
\_\_\_\_\_  
Profº Dr.  
Rafael Ribeiro de Sousa  
UNESP-FEG

  
\_\_\_\_\_  
Profª Dra.  
Maria Helena Moreira Morais  
UNESP-Rio Claro

Novembro , 2022

## **DADOS CURRICULARES**

### **NILCE DA SILVA DOS SANTOS**

**NASCIMENTO** 09/08/1995 - Taubaté / SP

**FILIAÇÃO** Norival Alves dos Santos  
Neuza Maria da Silva

**2014 / 2018** Graduação em Física  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho", Campus de Guaratinguetá

**2019 / 2022** Mestrado em Física  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho", Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho a minha mãe, Neusa Maria.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha amada mãe Neusa Maria por todo amor, apoio, paciência e dedicação que são muito importantes para mim e sem os quais a realização desse trabalho não seria possível. Você é a minha base.

À minha orientadora, Silvia Maria Giuliatti Winter, pela dedicação, incentivo e sugestões que foram de muita importância para tornar esse trabalho possível, mas, além disso, são importantes para o meu crescimento profissional porque me fazem enxergar mais longe. Em especial, gostaria de agradecer toda a paciência.

À minha irmã Júlia, meu padrinho Valdir e meus sobrinhos e prima (também irmãos de coração) Eduardo, Karen, Julio e Carolina, obrigada por sempre estarem presentes.

Aos meus grandes amigos Heron e Tiago, por todo carinho, incentivo e pelos momentos de descontração em que tornaram as coisas mais leves.

Ao meu grande amigo Douglas William, obrigada por sempre estar presente e me ouvir. Você é muito importante.

Ao Daniel Gaslac, por toda ajuda e paciência.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo número 2016/24561-0.

*“Então é hora de recomeçar tudo outra vez, sem ilusão e sem pressa, mas com a teimosia do inseto  
que busca um caminho no terremoto.”  
(Carlos Drummond de Andrade)*

## RESUMO

A descoberta de planetas fora do Sistema Solar tem motivado estudos de sistemas extrassolares, principalmente na busca de planetas do tipo Terra que sustentam condições de habitabilidade. Neste trabalho investigamos a possibilidade do transporte de água e matéria de importância astrobiológica para planetas dos sistemas Kepler-90 e os binários Kepler-35 e Kepler-38 através de exocometas hipotéticos, considerando esses corpos subprodutos da formação planetária. Os exocometas considerados são altamente excêntricos e consideramos exclusivamente a influência gravitacional dos planetas e das estrelas hospedeiras sobre o movimento orbital desses corpos. O sistema Kepler-90 é semelhante ao nosso Sistema Solar sendo composto por oito planetas, sendo os mais internos do tipo Terra e os mais externos, planetas gigantes gasosos. Os planetas externos perturbaram os exocometas causando alterações em suas órbitas e alguns exocometas colidiram com os planetas internos. Nos sistemas binários, os planetas maiores estão localizados internamente ao planeta do tipo Terra, não causando considerável perturbação aos exocometas. No caso dos sistemas binários não houve nenhuma colisão com os planetas. No sistema Kepler-90 detectamos que vários planetas sofrem colisões com exocometas, mesmo os planetas pequenos (do tipo Terra). Existe a possibilidade de transporte de água vindo dos exocometas para quase todos os planetas pertencentes a esse sistema. No entanto, para o caso dos sistemas binários estudados, o transporte de água para o planeta localizado na zona habitável deve ser através de um método alternativo pois não foram verificadas colisões entre exocometas e os planetas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Exocometas. Colisões. Sistemas binários.

## **ABSTRACT**

The discovery of exoplanets has motivated studies of extrasolar systems, mainly in the search for Earth-like planets that support habitability conditions. In this work we investigate the possibility of transporting water and matter of astrobiological importance to planets in the Kepler-90 system and the Kepler-35 and Kepler-38 binaries through hypothetical exocomets, considering these bodies as by-products of planetary formation. The considered exocomets are highly eccentric and we exclusively consider the gravitational influence of the planets and host stars on the orbital motion of these bodies. The Kepler-90 system is similar to our Solar System, being composed of eight planets, the innermost being Earth-like and the outermost being gas giants planets. The outer planets disturbed the exocomets causing changes in their orbits and some comets collided with the inner planets. In binary systems, the major planets are located internally to the Earth-type planet, not causing considerable disturbance to exocomets. In the case of binary systems there was no collision with the planets. In the Kepler-90 system we have detected that several planets suffer collisions with exocomets, even small planets (Earth type). There is the possibility of transport of water from exocomets to almost all planets belonging to this system. However, in the case of the binary systems studied, the transport of water to the planet located in the habitable zone must be through an alternative method, as there were no collisions between exocomets and planets.

**KEYWORDS:** Exocomets. Collisions. Binary systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. . . . .	21
Figura 2	Diagrama de semi-eixo maior em função da excentricidade, cada ponto representa os valores de semi-eixo maior e excentricidade de um cometa ou asteroide. As linhas tracejadas representam alguns valores particulares dos parâmetros de Tisserand, pelos quais fornecem uma classificação para cometas. . . . .	23
Figura 3	Cometas em nosso Sistema Solar. Em (a), os pontos vermelhos representam os cometas classificados como ECs (Com $T_J > 2$ ) e os pontos azuis representam os cometas classificados como NICs (com $T_J < 2$ ). Em (b), os pontos vermelhos representam os cometas classificados como JFCs ( $P < 20$ anos) e os pontos azuis representam os cometas classificados como HTC's ( $P > 20$ anos e $a > 10$ mil u.a). As linhas finas indicam a divisão entre JFCs e HTC's no Painel (a) (que representa o marco de período de 20 anos, no Painel (b) a linha representa a divisão entre ECs e NICs (que representa o marco de Tisserand igual a 2) e a região representada pela cor cinza é uma área que as órbitas dos corpos não atingem. . . . .	25
Figura 4	Número de colisões de partículas com cada planeta do sistema 47UMa. As colisões são separadas pelas excentricidades iniciais das partículas. . . . .	29
Figura 5	Histograma do número de colisões de exocometas com os planetas do sistema HD141399. As barras em roxo representam as colisões com o planeta b, em verde com o planeta c, em azul com o planeta d e em amarelo com o planeta e. O gráfico superior mostra o número de colisões para as excentricidades iniciais dos exocometas. O gráfico inferior mostra o número de colisões para as inclinações iniciais dos exocometas. . . . .	30
Figura 6	Imagem artística do telescópio espacial Kepler. . . . .	32
Figura 7	Curva da variação do brilho de uma estrela ocasionada pela passagem de um planeta. . . . .	32
Figura 8	Última imagem do campo de visão do telescópio espacial Kepler. . . . .	33
Figura 9	Comparação entre os raios orbitais dos planetas internos do Sistema Solar (lado direito) e de Kepler-90 (lado esquerdo): em ambos os sistemas, os planetas mais internos são terrestres e os planetas mais externos são gigantes gasosos. O planeta mais externo de K90 possui raio orbital próximo ao raio orbital do planeta Terra no Sistema Solar. No canto inferior esquerdo são representadas as órbitas dos planetas mais internos de Kepler-90. . . . .	35
Figura 10	Comparação dos tamanhos dos planetas dos sistemas Kepler-90 (cima) e Sistema Solar (baixo). Nos dois sistemas, os planetas mais internos são menores e do tipo Terra e os planetas mais externos são gigantes. As distâncias estão fora de escala. . . . .	36

Figura 11	Planetas sobreviventes ao final de $10^4 T_h$ . O primeiro gráfico representa a análise para o intervalo de excentricidade de 0 a $10^{-3}$ ; o segundo gráfico é referente ao intervalo de excentricidade de $10^{-3}$ a $10^{-2}$ ; e o último, de $10^{-2}$ a $10^{-1}$ . . . . .	38
Figura 12	Raio do pericentro e excentricidade dos exocometas considerados no sistema com condições iniciais descritas na Tabela 2. Cada ponto representa dezenove exocometas com diferentes inclinações. Observamos que a maioria dos exocometas atingem a região planetária que se estende até 1 u.a. . . . .	40
Figura 13	Número de exocometas que colidiram com cada planeta do sistema K90 quando a excentricidade dos planetas são consideradas iguais a zero. . . . .	42
Figura 14	Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas quando as excentricidades dos cometas são iguais a zero. . . . .	43
Figura 15	Número de exocometas que colidiram com cada planeta dadas as inclinações iniciais quando $e$ dos planetas é igual a zero. Cada cor de barra representa a colisão com um planeta e a identificação é descrita na legenda do gráfico. . . . .	44
Figura 16	Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade das partículas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são igual a zero. Os pontos roxos e azuis representam, respectivamente, os elementos orbitais iniciais e finais das partículas sobreviventes. Os pontos pretos representam os planetas. . . . .	45
Figura 17	Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos de integração quando as excentricidades dos planetas são iguais a zero. Os pontos roxos e azuis representam, respectivamente, os elementos orbitais iniciais e finais dos exocometas. Os pontos pretos representam os planetas. . . . .	46
Figura 18	Raio do pericentro dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos de integração. Os pontos azuis representam os exocometas e os pontos pretos representam os planetas. . . . .	47
Figura 19	Variação do raio orbital de um exocometa ejetado com valores iniciais de $a = 5$ u.a., $e = 0.865$ e $I = 130^\circ$ . A curva em azul ilustra a evolução temporal de $r$ do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas. . . . .	48
Figura 20	Variação do raio orbital de um exocometa que colidiu com valores iniciais $a = 5.2$ u.a., $e = 0.855$ e $I = 90^\circ$ . A colisão ocorreu com o planeta h em aproximadamente 153 mil anos de interação. A curva em azul representa a evolução temporal de $r$ da partícula e as curvas em preto representam os planetas. . . . .	49
Figura 21	Evolução temporal do semi-eixo maior de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais $a = 5$ u.a., $e = 0.850$ e $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a evolução temporal de $a$ do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas. . . . .	50

Figura 22	Evolução temporal da excentricidade de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais $a = 5$ u.a., $e = 0.850$ e $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a variação de $e$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	50
Figura 23	Evolução temporal da inclinação de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais $a = 5$ u.a., $e = 0.850$ e $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a variação de $I$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	51
Figura 24	Evolução temporal do raio orbital $r$ de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais $a = 5$ u.a., $e = 0.850$ e $I = 160^\circ$ . A curva em azul ilustra a variação de $r$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	51
Figura 25	Evolução temporal das excentricidades dos planetas no sistema K90 quando $e$ inicial é igual a zero. Cada cor representa um planeta como indicado na legenda.	52
Figura 26	Evolução temporal do semi-eixo maior dos planetas. Cada cor representa um planeta como indicado na legenda.	53
Figura 27	Evolução temporal do semi-eixo maior do planeta K90 g ao longo de 500 mil anos de integração.	53
Figura 28	Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 quando a excentricidade dos planetas são consideradas iguais a 0.001.	54
Figura 29	Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais de cada exocometa. As excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.001.	55
Figura 30	Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas. Cada cor de barra representa um planeta e a identificação é descrita na legenda do gráfico.	56
Figura 31	Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando a excentricidade dos planetas é igual a 0.001. Os pontos roxos e vermelhos representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos representam os planetas.	57
Figura 32	Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando a excentricidade dos planetas é igual a 0.001. Os pontos roxos e vermelhos representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos representam os planetas.	57
Figura 33	Evolução temporal do raio orbital de um exocometa ejetado durante a simulação numérica. A curva em vermelha ilustra a variação de $r$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	58

Figura 34	Evolução temporal do raio orbital de um exocometa que colidiu com o planeta h durante a simulação numérica. A curva em vermelha ilustra a variação de $r$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	59
Figura 35	Evolução temporal do semi-eixo maior de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica quando as excentricidades dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de $a$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	60
Figura 36	Evolução temporal da excentricidade de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica quando as excentricidades dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de $e$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	60
Figura 37	Evolução temporal da inclinação de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica quando a excentricidade dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de $I$ do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.	61
Figura 38	Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 quando as excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.01.	62
Figura 39	Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais. As excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.01.	63
Figura 40	Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas. As cores das barras representam o número de colisões com cada planeta do sistema e a identificação é descrita na legenda do gráfico.	64
Figura 41	Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são iguais a 0.01. Os pontos pretos e verdes representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos maiores representam os planetas.	65
Figura 42	Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são iguais a 0.01. Os pontos pretos e verdes representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos maiores representam os planetas.	66
Figura 43	Esquema de um sistema binário do tipo P. A estrela primária, secundária e o planeta orbitam em torno do centro de massa do sistema representado pelo ponto CoM.	68
Figura 44	Planetas formados nos sistemas CB para o disco planetesimal com $x = 1.5$ . A região sombreada indica a ZH e a escala de cor a direita indica a massa dos planetas formados.	70

Figura 45	Planetas formados nos sistemas CB para o disco planetesimal com $x = 2.5$ . A região sombreada indica a ZH e a escala de cor a direita indica a massa dos planetas formados.	71
Figura 46	Raio do pericentro e excentricidade dos exocometas considerados nos sistemas binários Kepler-35 e Kepler-38.	74
Figura 47	Trânsito das estrelas do sistema K35. Os gráficos b, c e e indicam trânsitos da estrela primária e o gráfico d indica trânsito da estrela secundária. O planeta do sistema é identificado através da não periodicidade em que os trânsitos acontecem.	75
Figura 48	Limites da zona habitável do sistema Kepler-35. A região da ZH conservativa é representada por verde escuro, e ZH extensa é representada por verde claro. Os pontos pretos representam as estrelas do sistema.	76
Figura 49	Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas sobreviventes na primeira etapa da análise de K35, após 500 mil anos de integração. As partículas são representadas por pontos vermelhos e os planetas são representados pelos pontos amarelos.	77
Figura 50	Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas sobreviventes na segunda etapa de integração, após 500 mil anos de integração. Os exocometas são representados por pontos vermelhos e os planetas são representados pelos pontos amarelos.	78
Figura 51	Evolução temporal do raio orbital de um exocometa que sobreviveu no sistema Kepler-35 durante 500 mil anos de integração. A curva em vermelho representa a partícula e as curvas em preto representam os planetas.	79
Figura 52	Evolução orbital do raio de um exocometa que foi ejetado do sistema Kepler-35 em aproximadamente 494 mil anos de integração. A curva em vermelho representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.	80
Figura 53	Evolução orbital do raio de um exocometa que foi ejetado do sistema Kepler-35 em aproximadamente 352 mil anos na segunda parte da integração. A curva em vermelho representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.	81
Figura 54	Limites da ZH do sistema K38. A região verde escura é a ZH conservativa e a região delimitada por verde claro demonstra a ZH larga.	83
Figura 55	Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema K38 após 500 mil anos de integração. Os pontos pretos representam os exocometas e os pontos amarelos representam os planetas.	84
Figura 56	Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema K38 após a segunda integração numérica. Os pontos pretos representam os exocometas e os pontos amarelos representam os planetas.	85
Figura 57	Evolução temporal do raio orbital de um exocometa sobrevivente no sistema na primeira etapa da integração. A curva em azul representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.	86

Figura 58	Evolução temporal do raio orbital de um exocometeta ejetado do sistema na segunda etapa da integração. A curva em azul representa o exocometeta e as curvas em preto representam os planetas.	87
Figura 59	Evolução temporal do raio orbital de um exocometeta sobrevivente no sistema na segunda etapa de integração. A curva em azul representa o exocometeta e as curvas em preto representam os planetas.	88
Figura 60	Sistema com CM em um ponto fora do corpo da estrela e o movimento orbital da estrela causa deslocamento no espectro de absorção do hidrogênio.	95
Figura 61	Efeito Doppler no espectro de absorção do hidrogênio.	96
Figura 62	Curva de luz obtida à partir do trânsito do planeta CoRoT-1b.	97
Figura 63	Imagem do sistema HR 8799.	98
Figura 64	Curva de luz obtida através do método de microlentes gravitacionais em uma observação realizada em 2003. A curva em azul ffoi obtida pelo projeto MOA e a curva em vermelho, pelo projeto OGLE.	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Semi-eixo maior, excentricidade e massa dos planetas no sistema K90	36
Tabela 2 – Condições iniciais dos exocometas considerados no sistema.	39
Tabela 3 – Condições iniciais	73
Tabela 4 – Parâmetros das estrelas do sistema K35	74
Tabela 5 – Parâmetros dos planetas no sistema K35	75
Tabela 6 – Zona Habitável: K35	76
Tabela 7 – Parâmetros das estrelas hospedeiras de K38	81
Tabela 8 – Parâmetros dos planetas do sistema K38	82
Tabela 9 – Limites da ZH do sistema K38	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

UNESP	Universidade Estadual Paulista
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
CM	Centro de Massa

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Semi-eixo maior
$e$	Excentricidade
$G$	Constante Gravitacional
$I$	Inclinação
$M$	Anomalia Média
$M_J$	Massa de Júpiter
$M_{Sol}$	Massa do Sol
$M_T$	Massa da Terra
$R_J$	Raio de Júpiter
$R_T$	Raio da Terra
$T_h$	Período orbital do planeta h
$\omega$	Argumento do pericentro
$\Omega$	Longitude do nodo ascendente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	OS COMETAS	20
1.2	CLASSIFICAÇÃO DINÂMICA DE COMETAS NO SISTEMA SOLAR	21
1.3	TRANSPORTE DE ÁGUA	26
1.4	COMETAS EM SISTEMAS EXTRASSOLARES: EXOCOMETAS	26
1.5	MODELO DE DVORAK ET AL. (2020)	27
1.6	MISSÃO KEPLER	31
<b>2</b>	<b>KEPLER-90</b>	<b>34</b>
2.1	SOBRE O SISTEMA KEPLER-90	34
2.2	EXCENTRICIDADES DOS PLANETAS	37
2.3	CONDIÇÕES INICIAIS	39
2.4	EXCENTRICIDADE ZERO	41
2.5	EXCENTRICIDADE $10^{-3}$	54
2.6	EXCENTRICIDADE $10^{-2}$	61
2.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DO SISTEMA KEPLER-90	66
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE COLISÕES DE EXOCOMETAS NOS SISTEMAS BINÁRIOS</b>	
	<b>KEPLER-35 E KEPLER-38</b>	<b>68</b>
3.1	FORMAÇÃO DE PLANETAS TERRESTRES NOS SISTEMAS KEPLER-35 E KEPLER-38	69
3.2	ZONA HABITÁVEL DE SISTEMAS BINÁRIOS	72
3.3	CONDIÇÕES INICIAIS	73
3.4	KEPLER-35	74
3.5	KEPLER-38	81
3.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DOS SISTEMAS KEPLER-35 E KEPLER-38	88
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO DE EXOPLANETAS</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE B – MÉTODOS DE DETECÇÃO DE EXOPLANETAS</b>	<b>95</b>
B.1	EFEITO DOPLER OU VELOCIDADE RADIAL	95
B.2	MÉTODO DE TRÂNSITO	96
B.3	IMAGEAMENTO DIRETO	97
B.4	MICROLENTE GRAVITACIONAIS	98

# 1 INTRODUÇÃO

Os cometas são corpos de fundamental importância em nosso Sistema Solar, pois contêm informações da nebulosa solar primitiva. Além disso, podem ser responsáveis pelo transporte de água e substâncias de importância astrobiológica para planetas terrestres, sendo essa uma das hipóteses para a existência de água na Terra discutida em estudos da área.

Neste trabalho estudamos a dinâmica de exocometas nos sistemas extrassolares Kepler-90 (K90), Kepler-35 (K35) e Kepler-38 (K38), sendo K35 e K38 sistemas binários, ou seja, possuem duas estrelas ligadas gravitacionalmente.

O interesse por K90 se deve às semelhanças existentes com o nosso Sistema Solar, pois o sistema tem oito planetas confirmados e é hierárquico, ou seja, os planetas menores possuem órbitas mais internas e os planetas mais externos são planetas gigantes gasosos (Cabrera et al., 2014). Os binários Kepler-35 e Kepler-38 possuem um planeta confirmado em cada sistema. Ainda, há possibilidade de formação de um planeta do tipo Terra na zona habitável (ZH) de cada sistema, região na qual pode existir água no estado líquido, como foi mostrado por Barbosa et al. (2020).

Os cometas hipotéticos (exocometas), segundo Dvorak et al. (2020), são considerados subprodutos da formação planetária e podem transportar água e matéria de importância astrobiológica ao colidirem com planetas. Assim, o principal objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de colisões entre planetas e exocometas e com quais planetas há maior probabilidade de colisão nos sistemas K90, K35 e K38.

Neste capítulo, são descritas as características dos cometas na Seção 1.1, a classificação dinâmica desses corpos (Seção 1.2), a possibilidade de transporte de água por colisões de cometas com os planetas (Seção 1.3); evidências da existência de exocometas (Seção 1.4) e uma breve descrição do trabalho realizado por Dvorak et al. (2020) e os principais resultados obtidos pelos autores (Seção 1.5). No capítulo 2, são apresentadas a descrição do sistema Kepler-90, as condições iniciais das partículas consideradas e os resultados obtidos para o sistema. No Capítulo 3, descrevemos os sistemas Kepler-35 e Kepler-38, as condições iniciais dos exocometas hipotéticos considerados e os resultados das análises. Por fim, no Capítulo 4, são descritas as conclusões gerais obtidas dos três sistemas estudados e futuros trabalhos.

## 1.1 OS COMETAS

Os cometas são corpos que fazem parte do nosso Sistema Solar e são compostos principalmente por gelo. Cochran et al. (2015), após um Workshop Internacional que ocorreu sobre cometas na França em 2014, publicaram um artigo cujo título é "The Composition of Comets", no qual são discutidas as propriedades físicas e químicas dos cometas e os dados da missão Rosetta, que visitou o cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. De acordo com os autores, os cometas são subprodutos da formação planetária, isto é, são os corpos que não acretaram <sup>1</sup> para formar os planetas na região da nebulosa

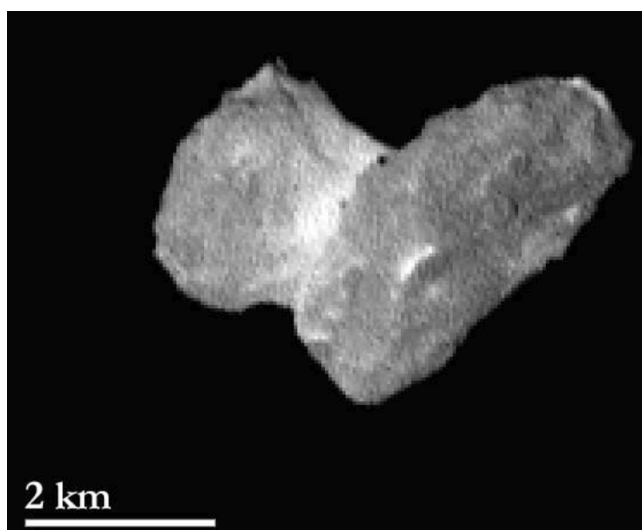
<sup>1</sup> Palavra derivada da língua inglesa e representa o termo "accretion".

solar além da linha de gelo, onde as temperaturas são suficientemente baixas para a condensação do gelo. Esses corpos foram dinamicamente ejetados e suas principais fontes são a Nuvem de Oort (Oort, 1950) ou a região além da órbita de Netuno. Considerando as características dinâmicas dos cometas como o período orbital e o parâmetro de Tisserand (parâmetro e características que serão apresentados na próxima seção), esses corpos são classificados em famílias.

Os cometas possuem como característica marcante a existência de uma cauda quando se aproximam do Sol e essa estrutura aparece porque, devido à alta temperatura, o gelo que compõe uma parte desses corpos pode sublimar e formar as características caudas dos cometas. Além da cauda, o cometa pode apresentar um coma, que é uma estrutura nebulosa que observamos em torno do núcleo dos cometas e que são formadas principalmente por gelo.

A **Figura 1** mostra o núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko obtido pela sonda espacial Rosetta da Agência Espacial Europeia em contribuição com a Nasa. A imagem foi obtida em julho de 2014.

Figura 1 – Núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.



Fonte: NASA (2022)

O interesse de estudo de cometas neste trabalho se deve à possibilidade de transporte de água desses corpos para planetas terrestres por meio de colisões, visto que são objetos predominantemente compostos por gelo. Ao estender a análise da dinâmica desses corpos em sistemas extrassolares e considerando os cometas como objetos remanescentes da formação planetária, consideramos a entrega de água por esses corpos para planetas na zona habitável, ou seja, região capaz de conter água no estado líquido, em sistemas extrassolares.

## 1.2 CLASSIFICAÇÃO DINÂMICA DE COMETAS NO SISTEMA SOLAR

Os cometas no Sistema Solar são classificados em categorias seguindo alguns parâmetros orbitais. De acordo com Weissman et al. (2002), os cometas são tradicionalmente classificados em LP e SP, cujos nomes significam, respectivamente, da sigla em inglês, cometas de longo período e cometas de curto período. Segundo os autores, essa classificação é baseada no valor do período orbital dos

cometas, ou seja, se o período orbital,  $P$ , é maior do que 200 anos, os cometas são classificados como de longo período. Se o período orbital é menor do que 200 anos, são cometas de curto período.

Além do período orbital, são observadas distinções nos valores das inclinações dos dois grupos de cometas. Os cometas classificados como LP não possuem um valor preferencial de inclinação, isto é, os valores das inclinações são aleatórios. Para os cometas de curto período, as inclinações se aproximam do valor médio de  $35^\circ$ .

De acordo com Vokrouhlický et al. (2019), os cometas de longo período têm origem na Nuvem de Oort e os cometas de curto período, segundo, por exemplo, Levison e Duncan (1997), têm origem no disco disperso e Cinturão de Kuiper que é uma região além da órbita de Netuno que contém asteroides e cometas.

Os cometas de curto período ainda podem ser classificados em dois subgrupos denominados cometas da família de Júpiter (JFC, da sigla em inglês) e cometas do tipo Halley (HTC, da sigla em inglês). No trabalho de Nesvorný et al. (2017), os autores falam que essa subclassificação é dada, tradicionalmente, pelo período orbital dos corpos. Assim, cometas com períodos orbitais menores que 20 anos são classificados como JFC e cometas com períodos orbitais entre 20 e 200 anos são classificados como HTC.

Entretanto, segundo Weissman et al. (2002), a classificação dinâmica de acordo com o parâmetro de Tisserand, que foi sugerida originalmente por Carusi e Valsecchi em 1987 é uma classificação dinâmica mais formal para cometas de curto período. Esse parâmetro, de acordo com os autores, é uma aproximação da constante de Jacobi, que permite verificar se um cometa é o mesmo observado antes e depois de uma aproximação com Júpiter no Sistema Solar. Para Nesvorný et al. (2017), essa classificação é melhor porque a variação do parâmetro de Tisserand ao longo do tempo é menor quando comparada à variação do período orbital dos cometas.

A Equação 1 é a expressão matemática para obter o parâmetro de Tisserand ( $T$ ) dos cometas em relação a Júpiter, sendo  $a_J$  o semi-eixo maior do planeta Júpiter e  $a$ ,  $e$  e  $I$  o semi-eixo maior, a excentricidade e a inclinação do cometa, respectivamente.

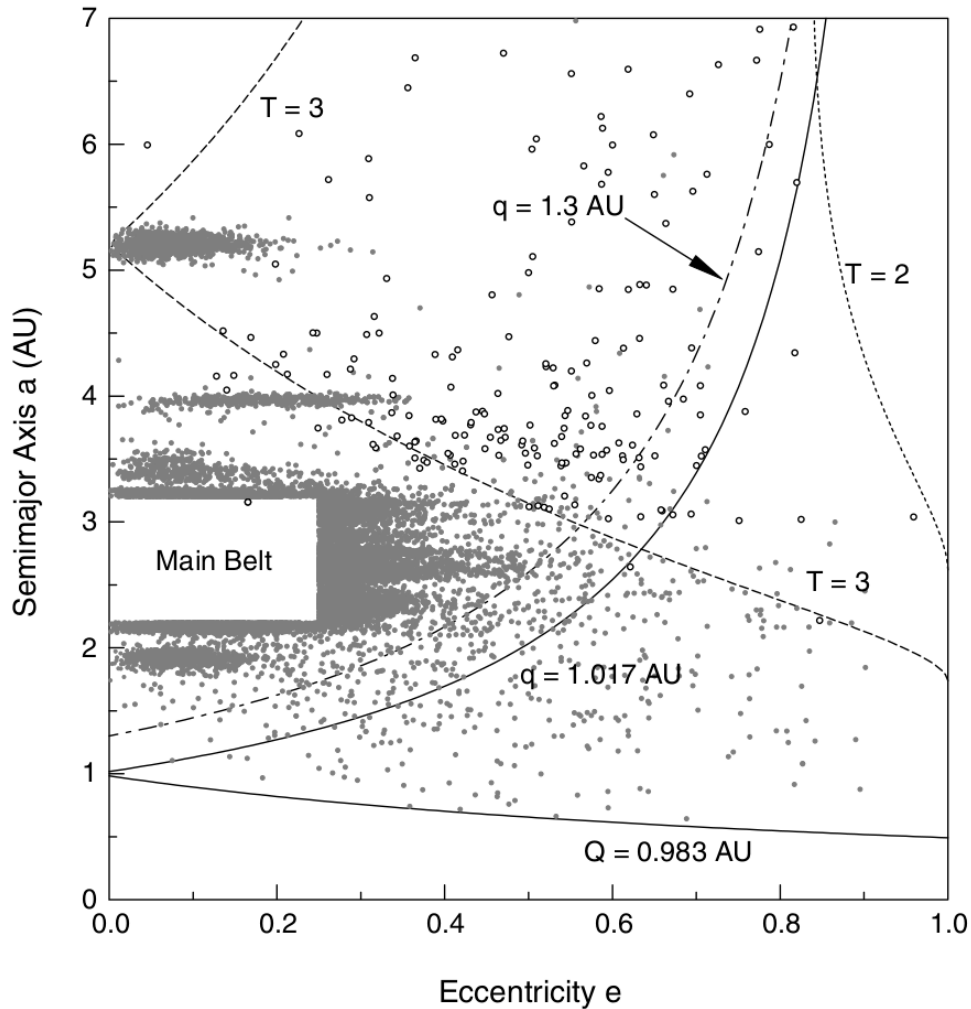
$$T = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{(1 - e^2)\frac{a}{a_J}} \cos I \quad (1)$$

Para Levison e Duncan (1997), o valor de  $T$  permite classificar os cometas de curto período em duas novas categorias: cometas eclípticos (ECs, da sigla em inglês) e cometas quase isotrópicos (NICs, da sigla em inglês). Quando o valor de  $T$  obtido está entre 2 e 3, o cometa é classificado como EC e quando  $T$  é menor do que 2, o cometa é classificado como NIC.

A Figura 2 é um diagrama do semi-eixo maior em função da excentricidade em que cada ponto representa os valores de  $a$  e  $e$  de um cometa ou asteroide. Este diagrama nos fornece uma noção de quantidade de objetos e também é útil para definir a classificação desses corpos segundo o parâmetro de Tisserand (linhas tracejadas). Os asteroides são representados por pontos preenchidos e os cometas por círculos abertos. O gráfico mostra as barreiras representadas por linhas tracejadas para  $T = 2$  e  $T = 3$  permitindo, assim, verificar quais cometas são classificados como ECs ou NICs. É possível observar no diagrama que a maior parte dos asteroides possuem o valor do parâmetro de Tisserand maior que 3. O gráfico ainda representa, por linhas contínuas, valores da distância do periélio que

classificam corpos como próximos da Terra, sendo que  $1.017 < q \leq 1.3$  u.a. define corpos do tipo Amor (Binzel et al., 2018).

Figura 2 – Diagrama de semi-eixo maior em função da excentricidade, cada ponto representa os valores de semi-eixo maior e excentricidade de um cometa ou asteroide. As linhas tracejadas representam alguns valores particulares dos parâmetros de Tisserand, pelos quais fornecem uma classificação para cometas.



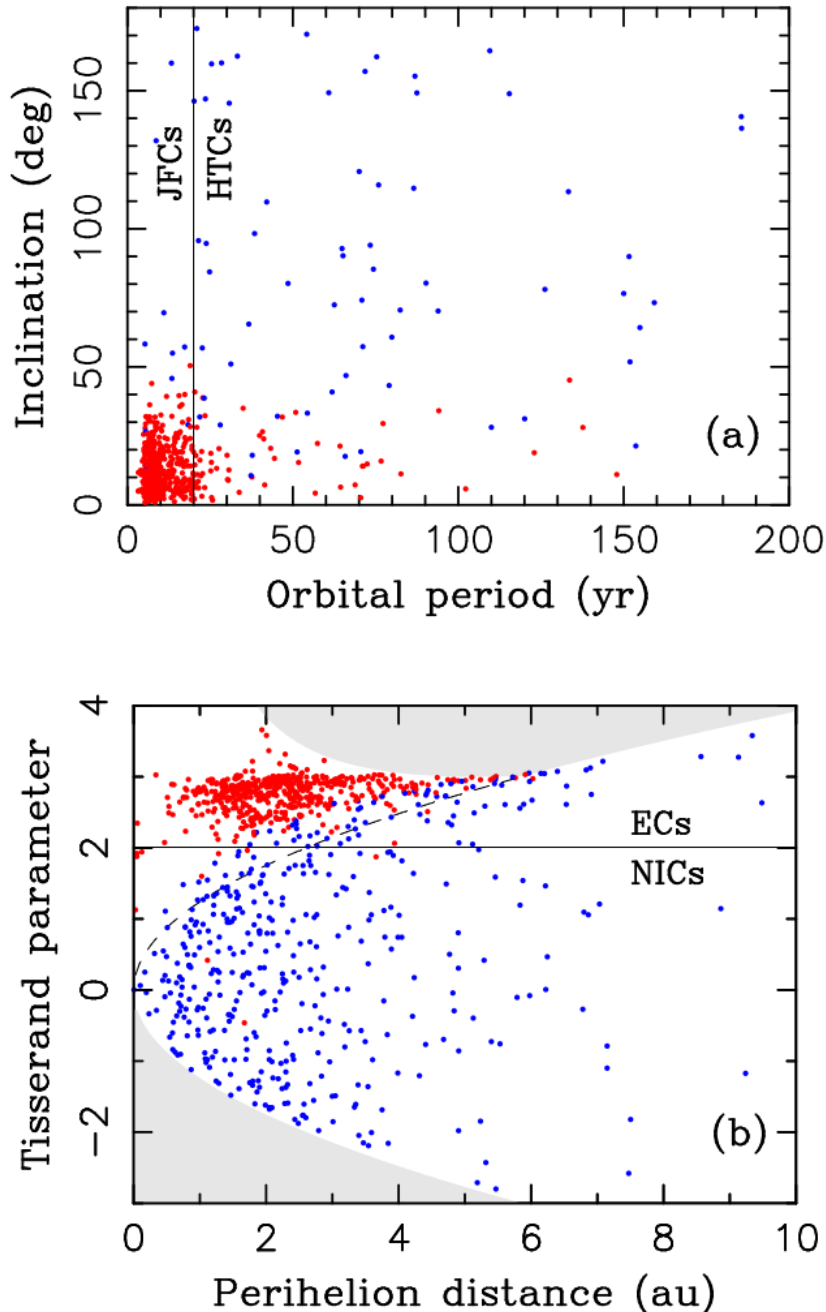
Fonte: Weissman et al. (2002)

Segundo Nesvorný et al. (2017), os diferentes valores de inclinações observados nos cometas sugerem diferentes reservatórios que originam esses corpos e que podem ser o Cinturão de Kuiper, a Nuvem de Oort ou o disco disperso, por exemplo. Em seus trabalhos sobre a dinâmica de cometas de curto período, os autores estudam a formação de reservatórios cometários e a evolução dinâmica de cometas. Nesvorný et al. (2017) concluem que os cometas HTC são uma extensão de cometas de longo período.

Para os SPs, a classificação pode ser dada de duas formas: em relação ao período orbital que os divide em JFCs e HTC, e em relação ao parâmetro de Tisserand para o qual podemos ter cometas do grupo EC ou NIC. De acordo com Nesvorný et al. (2017), a maior parte dos JFCs são também ECs, assim como a maior parte de HTC são NICs.

Na **Figura 3** estão representados dois tipos de classificação de cometas em nosso Sistema Solar. No painel (a), os pontos vermelhos representam os cometas classificados como ECs e os pontos azuis representam os cometas classificados como NICs. A linha contínua em preto caracteriza o limite de classificação entre cometas do tipo JFCs e HTC. Podemos observar que a maioria dos cometas JFC possuem baixas inclinações ( $I$ ) e os cometas do tipo Halley assumem maiores valores de  $I$ . No gráfico b, a classificação ocorre em relação ao parâmetro de Tisserand. Os pontos vermelhos representam os cometas JFCs e os pontos azuis, os cometas HTCs. Através dessa figura, podemos verificar a afirmação dos autores (Nesvorný et al. (2017)) sobre a maioria dos cometas da família de Júpiter serem também cometas eclípticos e o mesmo acontecer para os HTCs, ou seja, a maioria dos cometas do tipo Halley serem também NICs.

Figura 3 – Cometas em nosso Sistema Solar. Em (a), os pontos vermelhos representam os cometas classificados como ECs (Com  $T_J > 2$ ) e os pontos azuis representam os cometas classificados como NICs (com  $T_J < 2$ ). Em (b), os pontos vermelhos representam os cometas classificados como JFCs ( $P < 20$  anos) e os pontos azuis representam os cometas classificados como HTC's ( $P > 20$  anos e  $a > 10$  mil u.a). As linhas finas indicam a divisão entre JFCs e HTC's no Paine (a) (que representa o marco de período de 20 anos, no Paine (b) a linha representa a divisão entre ECs e NICs (que representa o marco de Tisserand igual a 2) e a região representada pela cor cinza é uma área que as órbitas dos corpos não atingem.



Fonte: Nesvorný et al. (2017)

É importante ressaltar que Nesvorný et al. (2017) abordam dois problemas das classificações de cometas aqui estudadas que são a existência de cometas com período orbital menor que 20 anos com altas inclinações, o que não os classificam como JFCs e sobre a existência de cometas com baixas inclinações, mas também com períodos orbitais maiores que 20 anos.

### 1.3 TRANSPORTE DE ÁGUA

Existem estudos que tentam explicar a origem da água no planeta Terra. De acordo com O'Brien et al. (2018), estima-se que a Terra tem uma quantidade mínima de água de aproximadamente  $5 \times 10^{-4} M_T$ , sendo  $M_T$  a massa da Terra, os primeiros sólidos que se condensaram da nuvem molecular Solar e os blocos de construção dos planetas terrestres (os planetesimais), na região com  $a < 1$  u.a., foram formados relativamente secos, assim são estudados possíveis mecanismos de entrega de água para a região interna do Sistema Solar ( $a < 1$  u.a.), região pela qual é supostamente a região de formação dos planetas terrestres.

Uma das hipóteses para a existência da abundância de água em nosso planeta é através do transporte por meio de colisões de cometas com a Terra, tendo em vista a natureza gelada desses corpos que se formaram além da linha do gelo, na região externa do Sistema Solar.

O'Brien et al. (2018) e Alexndr et al. (2018) efetuaram estudos sobre a natureza de asteroides e cometas e a possibilidade de entrega de água por esses corpos. Um ponto colocado em análise pelos autores é a razão D/H (deutério-hidrogênio) encontrada na água em nosso planeta e a encontrada nos cometas. De acordo com Alexandr et al. (2018), a razão D/H dos cometas indicam a região de formação desses corpos, sendo que quanto maior o raio orbital, maior é a razão D/H. Entretanto, essa razão não indica necessariamente a qual família dinâmica os cometas pertencem.

Ainda, segundo O'Brien et al. (2018) e Alexndr et al. (2018), existem diferentes razões de D/H encontradas em diferentes cometas, sendo vasto esse valor. De acordo com O'Brien et al. (2018), por meio de dados da missão Rosetta, a razão encontrada no cometa 67P/Churyumov Gerasimenko é três vezes maior do que a encontrada na Terra, entretanto, o D/H do cometa 47P/Honda é compatível com a do planeta. Outro ponto que os autores questionam é a baixa probabilidade de colisão de cometas com a Terra, sendo que apenas 10% da água existente na Terra poderia ser fornecida por cometas.

Apesar da baixa probabilidade de colisões e dos questionamentos acerca da razão D/H presentes na água, os cometas também são de fundamental importância, pois podem transportar substâncias de importância biológica para o desenvolvimento da vida. Segundo O'Brien et al. (2015), os cometas são as principais fontes de Ar e Xe (argônio e xenônio) da Terra.

### 1.4 COMETAS EM SISTEMAS EXTRASSOLARES: EXOCOMETAS

Existem evidências de atividades de FEBs (da sigla em inglês, "falling evaporating bodies") em sistemas planetários jovens. Os FEBs são corpos que possuem comportamento semelhante aos cometas em nosso Sistema Solar. Welsh e Montgomery (2015) analisam a variação da absorção da linha K de CaII em sistemas extrassolares, sendo que, segundo os autores, essa variação pode ser causada por interrupções no plasma do disco circunstelar devido à evaporação de materiais voláteis de exocometas. Assim, este comportamento físico é associado à presença de FEBs, corpos que também são nomeados pelos autores como exocometas.

De acordo com os autores citados acima, os estudos existentes indicam que a presença de um disco circunstelar de poeira e pequenos corpos como asteroides e cometas fazem parte do processo de formação planetária, sendo que a presença de poeira e pequenos corpos são associados às primeiras

etapas do processo de formação planetária e ainda, a possibilidade de ruptura de corpos gelados devido à ação da força gravitacional e a consequente liberação de material volátil observadas em cometas são características marcantes das primeiras etapas da formação planetária. Deste modo, para identificar linhas de absorção no estudo, Welsh e Montgomery (2015) buscaram analisar sistemas estelares mais jovens, com idade inferior a cinquenta milhões de anos.

Foi identificada a atividade de FEBs em 16 sistemas estudados. Welsh e Montgomery (2015) argumentam que a identificação da atividade de FEBs está relacionada com o ângulo e o tempo de observação do disco circunstelar, e a idade do sistema não parece ser um fator de relevância na identificação. Os autores concluem que características como velocidade rotacional do disco circunstelar do sistema e a idade do sistema não caracterizam a existência ou não de atividade de FEBs.

Assim, tendo como base os estudos existentes que indicam que asteroides e cometas são corpos resultantes do processo de formação de sistemas planetários e as evidências da atividade de FEBs (exocometas) em sistemas extrassolares, como mostrado no estudo de Welsh e Montgomery (2015), no presente trabalho realizamos a análise dinâmica de exocometas em sistemas extrassolares Kepler (aqui os exocometas são considerados hipotéticos porque até o momento em que o trabalho é escrito não há identificação da presença desses corpos nos sistemas analisados). O trabalho teve como inspiração o estudo de Dvorak et al. (2020), no qual é analisado o movimento de exocometas hipotéticos e colisões desses corpos com planetas nos sistemas 47 UMa, HD10180 e HD141399. Uma breve descrição do trabalho de Dvorak et al. (2020) é feita na próxima seção.

## 1.5 MODELO DE DVORAK ET AL. (2020)

O tema dessa dissertação foi estimulado pelo trabalho realizado por Dvorak et al. (2020), intitulado "On the Dynamics of Comets in Extrasolar Planetary Systems". Uma breve descrição da análise e resultados obtidos pelos autores é realizada nessa seção.

Os principais objetivos desse trabalho são analisar a dinâmica de exocometas hipotéticos em sistemas extrassolares e a porcentagem de colisões desses corpos com os planetas dos sistemas, considerando a possibilidade de transporte de água através dessas colisões. Os autores analisaram os sistemas estelares HD10180, 47UMa e HD141399. O tempo de integração para a análise é de um milhão de anos e os três sistemas planetários possuem estrelas hospedeiras com massas próximas à do Sol. Esses valores são, respectivamente, para os sistemas HD10180, 47UMa e HD141399,  $1.06 M_{Sol}$ ,  $1.03 M_{Sol}$  e  $1.07 M_{Sol}$ , sendo  $M_{Sol}$  a massa do Sol.

Os cometas não foram verificados nos sistemas estudados pelos autores através de observação direta ou por algum meio de detecção. Entretanto, esses corpos são considerados subprodutos das formações planetárias e, desta forma, assume-se que os sistemas planetários possuem cometas.

Foi considerado um conjunto de partículas, os exocometas hipotéticos, com as mesmas condições iniciais para os três sistemas: o semi-eixo maior varia entre 80 u.a e 200 u.a.; a excentricidade entre 0.915 e 0.99; e a inclinação entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Esse conjunto de exocometas é um análogo da nossa Nuvem de Oort, a qual não possui uma direção preferencial de movimento e os cometas possuem altas excentricidades.

De acordo com os autores, as partículas estão suficientemente longe do planeta mais externo de cada sistema, entretanto não é necessário para considerar a influência de forças como maré galáctica ou a perturbação devido a passagem de uma estrela próxima ao sistema sobre o movimento orbital desses corpos. Ainda, mesmo que para os três sistemas analisados sejam considerados exocometas com as mesmas condições iniciais, Dvorak et al. (2020) argumentam que as diferentes configurações e massas planetárias dos sistemas HD10180, 47Uma e HD141399 resultam em diferentes dinâmicas dos exocometas.

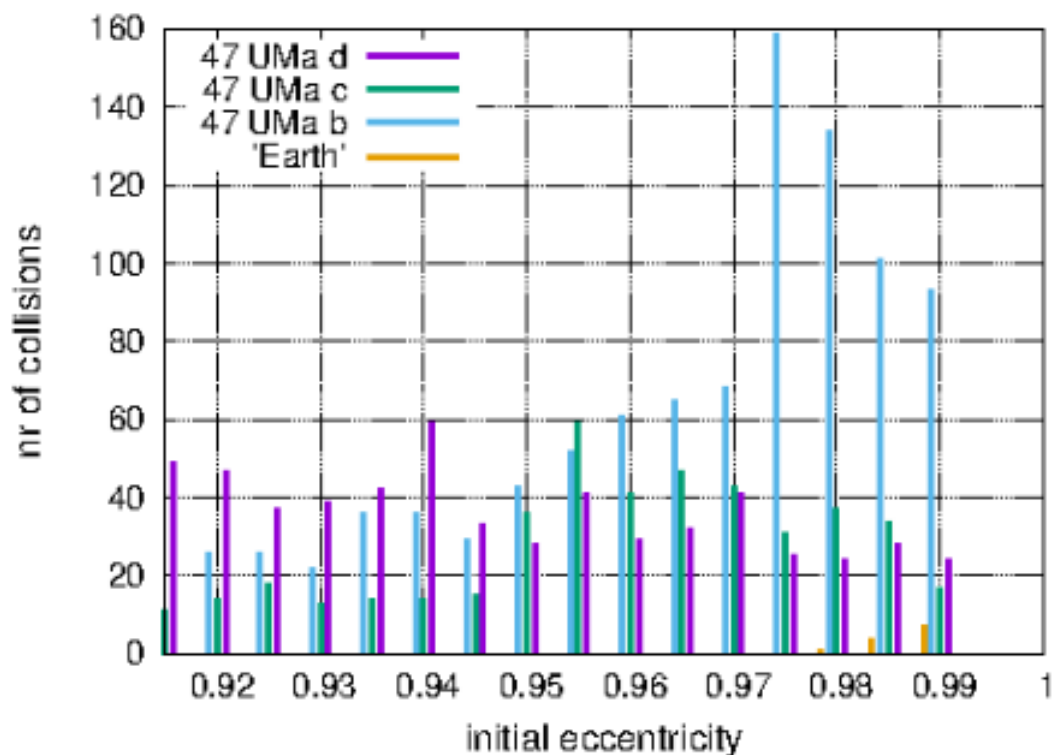
O sistema HD10180 pode possuir até nove planetas em sua estrutura, entretanto, nas análises, os autores consideraram quatro planetas do sistema (HD10180 e, HD10180 f, HD10180 g e HD10180 h), os quais possuem massas semelhantes a de Netuno e o planeta mais externo (HD10180 h) tem semi-eixo maior igual a 3.40 u.a. O sistema 47 UMa possui três planetas em sua estrutura (47 UMa b, 47 UMa c e 47 UMa d), sendo que o planeta mais interno é o mais massivo com massa aproximadamente duas vezes e meia a massa de Júpiter. O planeta mais externo, 47 UMa d, tem semi-eixo maior igual a 11.6 u.a. Para este sistema, além dos planetas confirmados, os autores consideraram um planeta hipotético com massa terrestre na zona habitável para realizar a análise de colisões de cometas e transporte de água. Foram feitas simulações numéricas com o planeta localizado em 1.0 u.a., 1.25 u.a. e 1.584 u.a., sendo que para último caso o planeta está em ressonância 3:2 com 47 UMa b. Por fim, foi analisado o sistema HD141399. Esse sistema possui quatro planetas que, respectivamente, do mais interno para o mais externo, são HD141399 b, HD141399 c, HD141399 d e HD141399 e, sendo que HD141399 e possui semieixo maior igual a 5 u.a.

Para os três sistemas analisados, Dvorak et al. (2020) observaram um comportamento padrão no qual os exocometas que possuem as maiores excentricidades são os corpos capazes de atingirem as regiões dos planetas mais internos de cada sistema. Essa aproximação pode fazer com que as partículas troquem momento angular com os planetas e sejam capturadas. Os autores consideram capturas quando os exocometas assumem, depois de um tempo, a excentricidade e o semi-eixo maior inferiores a, respectivamente, 0.7 e 10 u.a.

Além das capturas, as partículas de uma forma geral podem ser ejetadas dos sistemas ou colidirem com os planetas. Dvorak et al. (2020) relatam que ocorrem poucas colisões, sendo a maioria delas com os planetas mais externos do sistemas, mesmo esses não sendo necessariamente os planetas mais massivos como acontece, por exemplo, com 47 UMa, em que 47 UMa b possui massa igual a  $2.53M_J$  ( $M_J$  é definido como a massa de Júpiter), e o planeta mais externo, 47 UMa d tem massa igual a  $1.64M_J$ .

A **Figura 4** é um histograma que mostra o número de colisões das partículas com os planetas do sistema 47UMa. Os números de colisões são representados de acordo com as excentricidades iniciais das partículas e cada cor no gráfico representa colisões com um planeta: as barras em roxo mostram os números de colisões com o planeta d, em verde com o planeta c, em azul com o planeta b e em amarelo com o planeta hipotético do tipo Terra.

Figura 4 – Número de colisões de partículas com cada planeta do sistema 47UMa. As colisões são separadas pelas excentricidades iniciais das partículas.

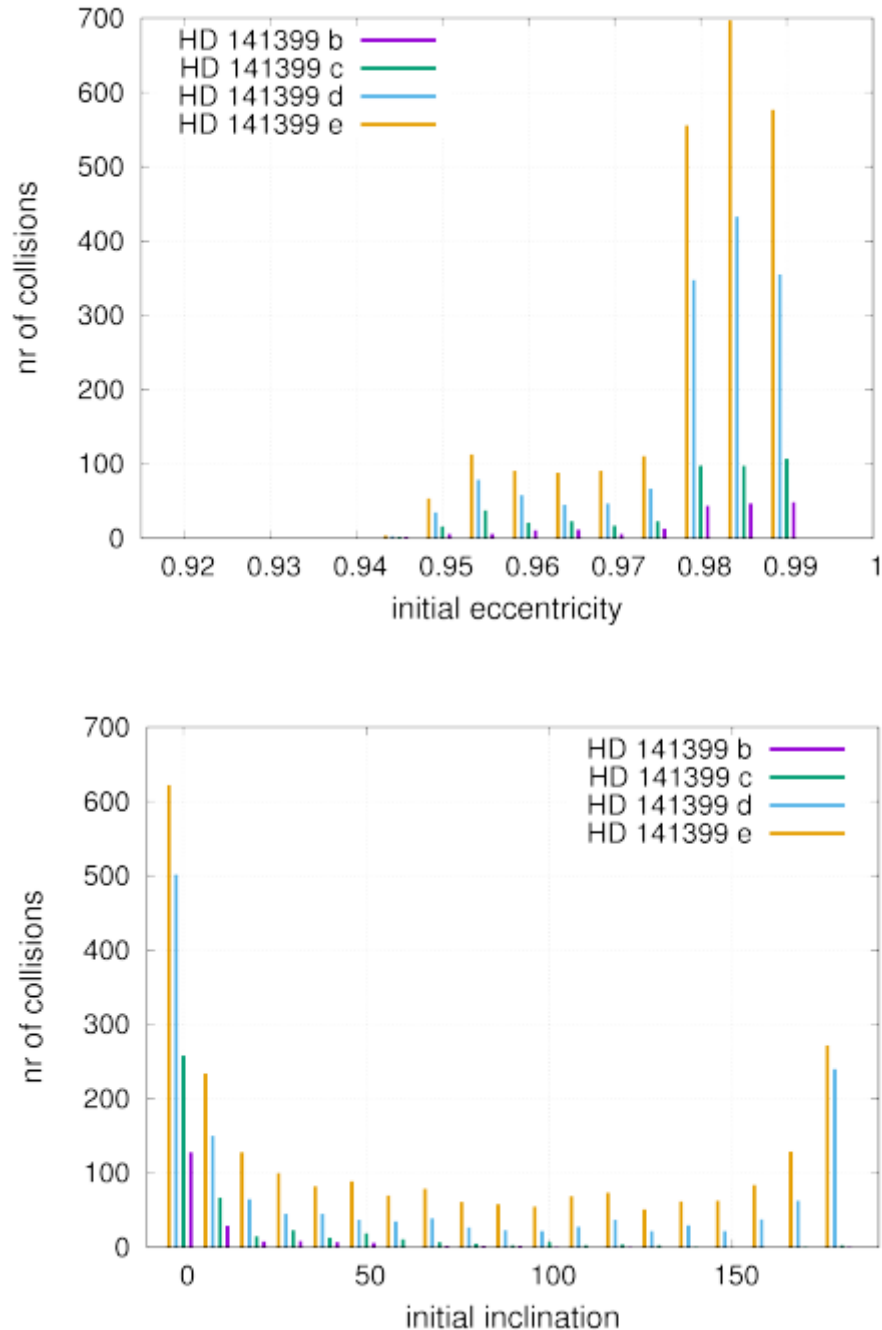


Fonte: Dvorak et. al (2020)

Dvorak et al. (2020) mostram que é necessário buscar por um outro mecanismo para o transporte de água para o planeta hipotético do tipo Terra quando localizado em 1.584 u.a., a posição de ressonância com o planeta b, pois a ressonância protege o planeta de colisões.

Os gráficos representados na [Figura 5](#) mostram os números de colisões de exocometas com cada planeta do sistema HD141399 através de diferentes cores. HD141399 b é representado por barras roxas, HD141399 c por barras verdes, HD141399 d por barras azuis e HD141399 e por barras amarelas. O histograma superior mostra o número de colisões dadas as excentricidades iniciais dos exocometas e o histograma inferior mostra o número de colisões para as inclinações iniciais dos exocometas.

Figura 5 – Histograma do número de colisões de exocometas com os planetas do sistema HD141399. As barras em roxo representam as colisões com o planeta b, em verde com o planeta c, em azul com o planeta d e em amarelo com o planeta e. O gráfico superior mostra o número de colisões para as excentricidades iniciais dos exocometas. O gráfico inferior mostra o número de colisões para as inclinações iniciais dos exocometas.



Fonte: Dvorak et al. (2020)

Os autores ainda discutem sobre capturas nos sistemas, sendo definidas quando o semi-eixo maior e a excentricidade das partículas são  $a \leq 10$  u.a. e  $e \leq 0.7$ . As capturas ocorrem quando os exocometas trocam momento angular com os planetas e desta forma mudam suas órbitas sendo capazes de sobreviver no sistema por um longo tempo. Verifica-se que a maioria dos exocometas capturados possuem menores valores de inclinações.

Os autores concluem que os planetas mais externos sofrem mais colisões com os exocometas, pois, devido às altas excentricidades, esse corpos são capazes de atingir essa região do sistema. Os autores também observam que mais colisões e capturas ocorrem quando as partículas possuem baixos valores de inclinação, próximos ao plano da eclíptica. No sistema HD10180, Dvorak et al. (2020) concluíram que os planetas do tipo Júpiter agem sobre os exocometas da mesma forma que o gigantes gasosos em nosso sistema, ou seja, perturbam os exocometas de modo que não ocorrem muitas colisões com os planetas mais internos.

Assim, baseando-nos no trabalho de Dvorak et al. (2020), estudamos a dinâmica de exocometas nos sistemas Kepler-90, Kepler-35 e Kepler-38. Os principais objetivos são analisar a probabilidade de colisões desses corpos ("exocometas hipotéticos") e a dinâmica nos sistemas extrassolares para diferentes condições iniciais.

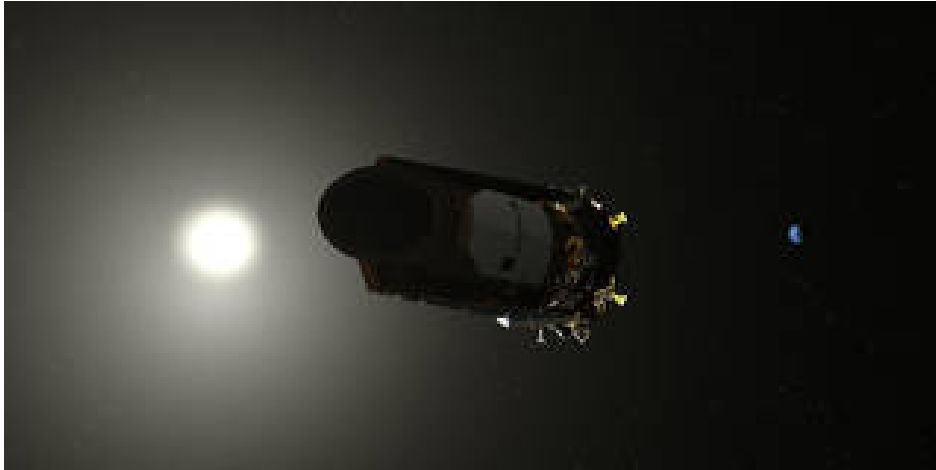
## 1.6 MISSÃO KEPLER

Os sistemas alvos de estudo no presente trabalho foram descobertos pela missão espacial Kepler. Nesta seção, fazemos uma descrição da missão e sua importância.

A missão Kepler tem como propósito detectar a diversidade de sistemas extrassolares em uma pequena região de nossa galáxia e tem como principal investigador Willian Borucki. Essa missão foi pensada e idealizada durante décadas e começou a ser desenvolvida em 2002 como uma missão Discovery.

A missão Kepler teve como principal objetivo encontrar planetas em sistemas extrassolares em nossa galáxia observando o maior número possível de estrelas, com foco na região das constelações Cygnus e Lyra porque estão fora do plano da eclíptica e assim não têm interferência do Sol. Em especial, houve interesse na busca de planetas do tipo Terra, rochosos, localizados na zona habitável desses sistemas e assim capazes de suportar água no estado líquido, condição necessária para a existência de vida da forma que a conhecemos. Além da busca por planetas, de acordo com a Nasa, a missão também tem como objetivo determinar características orbitais e físicas dos planetas como o tamanho das órbitas, período orbital, massa e densidade. A **Figura 6** é uma imagem artística da sonda espacial Kepler. A sonda possui aproximadamente uma tonelada e foi lançada em 2009 em Cabo Canaveral, nos Estados Unidos.

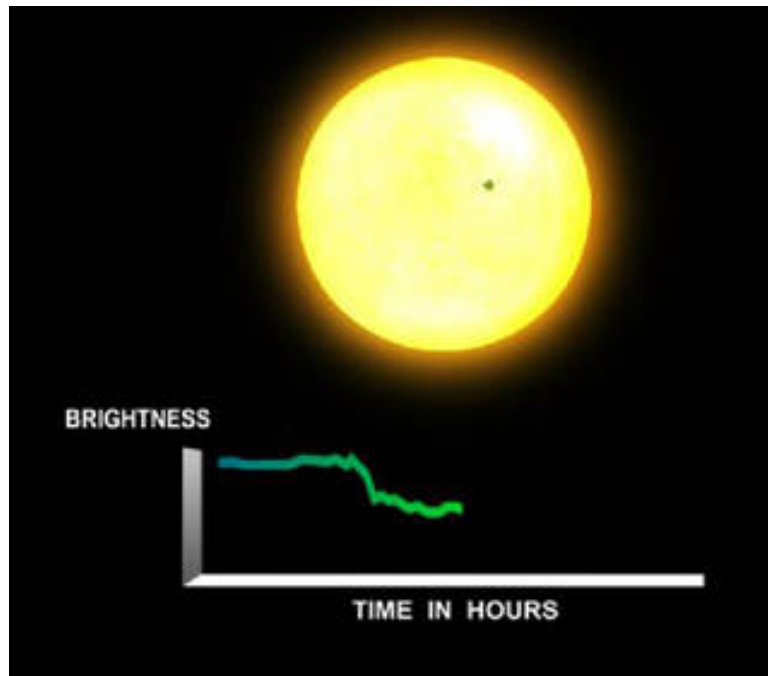
Figura 6 – Imagem artística do telescópio espacial Kepler.



Fonte: NASA/Ames/Dan Rutter (2022)

A sonda detecta os planetas através do método de trânsito, ou seja, o planeta passa na frente de sua estrela hospedeira e ocasiona variação em seu brilho que pode ser observada através de uma curva de luz. Essa variação permite determinar parâmetros orbitais e físicos dos planetas e é detectada através de um fotômetro de 95 centímetros de abertura que capta a intensidade do brilho das estrelas. A [Figura 7](#) ilustra graficamente a variação no brilho de uma estrela devido a passagem do planeta. O método de trânsito assim como outros métodos de detecção de exoplanetas são detalhados no Apêndice B.

Figura 7 – Curva da variação do brilho de uma estrela ocasionada pela passagem de um planeta.

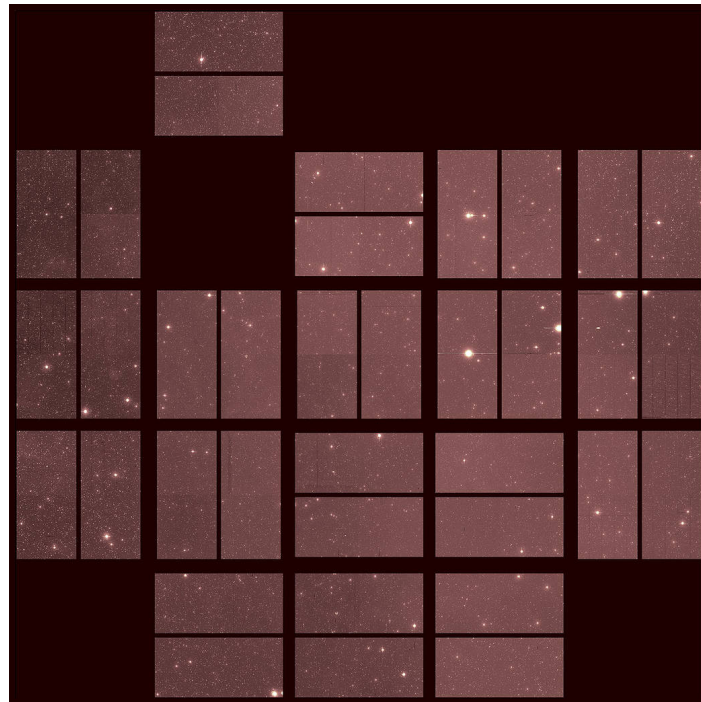


Fonte: NASA Ames (2022)

De acordo com a NASA, até o momento, 3245 planetas foram descobertos pela missão Kepler. Em 2015, um planeta de relevância para o objetivo da missão foi descoberto: Kepler-452b. Esse planeta é rochoso, um pouco maior que a Terra e está localizado na ZH de seu sistema. A missão foi oficialmente

encerrada em 30 de outubro de 2018 e a [Figura 8](#) mostra a última imagem do campo de visão obtido pela sonda.

Figura 8 – Última imagem do campo de visão do telescópio espacial Kepler.



Fonte: NASA (2022)

Neste trabalho, estudamos os sistemas Kepler-90 e os binários Kepler-35 e Kepler-38 que foram descobertos pela missão espacial Kepler e são descritos nas seções posteriores, assim como as análises da dinâmica dos exocometas considerados nesses sistemas. K90, K35 e K38 são descritos, respectivamente, nos Capítulos 2 e 3.

## 2 KEPLER-90

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre o sistema Kepler-90 e suas principais características. São descritas as condições iniciais dos exocometas hipotéticos sob influência gravitacional da estrela e dos planetas e os resultados da análise dinâmica desses corpos no sistema para três grupos de simulações numéricas que diferem pelo valor das excentricidades consideradas para os planetas.

### 2.1 SOBRE O SISTEMA KEPLER-90

Kepler-90 (K90) é um sistema multiplanetário que possui oito planetas confirmados (Kepler-90 b, c, d, e, f, g, h, i) orbitando a estrela hospedeira que, segundo Cabrera et al. (2014), está localizado há uma distância de aproximadamente 780 pc (parsec) do Sistema Solar. Essa distância é equivalente a 2542.8 anos-luz ou  $1.609 \times 10^8$  u.a. Junto com Trappist-1, que possui sete planetas confirmados de acordo com a Nasa Exoplanet Archive, esses são os sistemas com os maiores números de planetas confirmados que foram observados até o momento.

O interesse e escolha do sistema K90 para a realização deste trabalho deve-se às semelhanças que possui com o nosso Sistema Solar em relação ao número de planetas, configuração dos planetas e parâmetros físicos da estrela. A diferença mais significativa entre K90 e o Sistema Solar é a dimensão das órbitas dos planetas porque Kepler-90 é classificado como um sistema compacto (STIPs) e o planeta mais externo, K90 h, possuiu raio orbital de aproximadamente 1 u.a. De acordo com Contrera e Boley (2018), a maioria dos sistemas descobertos pela missão Kepler possuem essa característica e são conhecidos como STIPs, da sigla em inglês que significa Sistemas com Planetas Internos bem Compactos. O planeta mais externo do Sistema Solar, Netuno, tem raio orbital de aproximadamente 30 u.a. (Murray e Dermott, 1999).

K90 é um sistema de estrela única, KOI-351, que tem massa igual a  $1.2M_{Sol}$ , raio  $1.2R_{Sol}$  e temperatura efetiva de 6080 K (dados disponíveis no site exoplanet.eu). Assim como o Sistema Solar, K90 é hierárquico, ou seja, os planetas mais internos são menos massivos e os planetas mais externos são planetas gigantes gasosos.

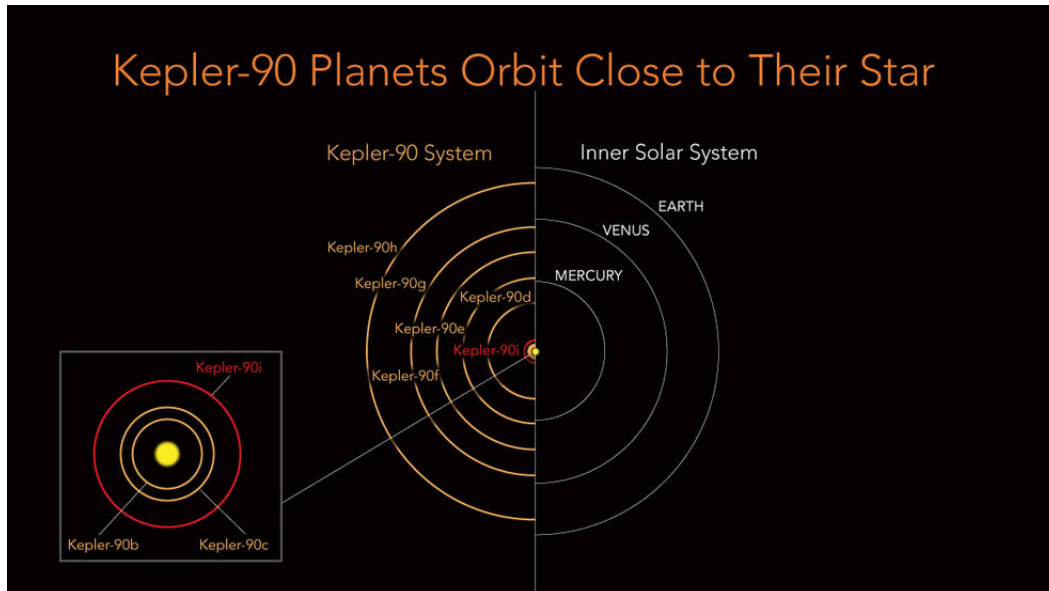
A missão Kepler detectou três planetas no sistema e Cabrera et al. (2014), através do método de variação do tempo de trânsito (TTVs), detectaram mais quatro planetas. A variação do tempo de trânsito ocorre devido à interação gravitacional entre os planetas e permite determinar parâmetros físicos e orbitais<sup>1</sup>. Shallue e Vanderburg (2018), descobriram a presença do oitavo planeta, i, entre as órbitas dos planetas c e d.

Os planetas b, c, e i são do tipo Terra e segundo Shallue e Vanderburg (2018), possuem valores de raios que os permitem considerá-los como planetas rochosos. Os planetas d, e, f são super-Terras; e g e h são planetas gigantes gasosos. A **Figura 9** é uma imagem artística que compara as órbitas dos planetas dos sistemas Kepler-90 (lado esquerdo) e dos planetas internos do Sistema Solar (lado direito). Observamos que o raio orbital do planeta mais externo (K90 g) tem aproximadamente o

<sup>1</sup> Os métodos de detecção de planetas são explicados no Apêndice B

mesmo raio orbital do planeta Terra, ou seja, todos os planetas de K90 têm órbitas dentro de um raio de aproximadamente 1 u.a.

Figura 9 – Comparação entre os raios orbitais dos planetas internos do Sistema Solar (lado direito) e de Kepler-90 (lado esquerdo): em ambos os sistemas, os planetas mais internos são terrestres e os planetas mais externos são gigantes gasosos. O planeta mais externo de K90 possui raio orbital próximo ao raio orbital do planeta Terra no Sistema Solar. No canto inferior esquerdo são representadas as órbitas dos planetas mais internos de Kepler-90.

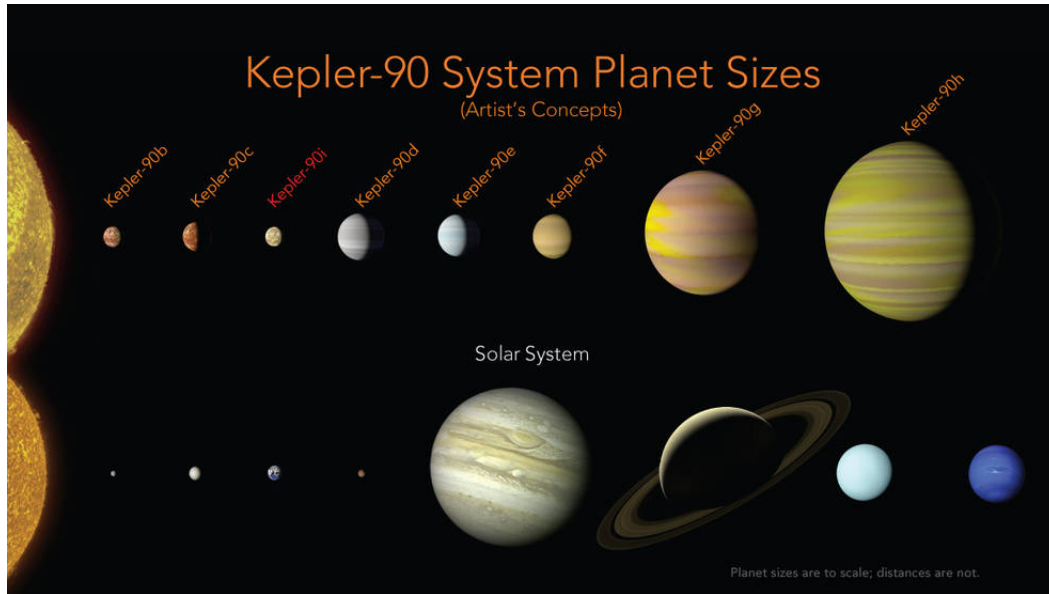


Fonte: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel (2022)

Na [Figura 10](#) é apresentada uma comparação dos tamanhos dos planetas dos sistemas Kepler-90 e do Sistema Solar que estão representados em escala <sup>2</sup>. Em ambos os sistemas, os planetas mais internos são menores e do tipo Terra e os planetas mais externos são gigantes.

<sup>2</sup> **Observação:** as distâncias dos planetas estão fora de escala.

Figura 10 – Comparação dos tamanhos dos planetas dos sistemas Kepler-90 (cima) e Sistema Solar (baixo). Nos dois sistemas, os planetas mais internos são menores e do tipo Terra e os planetas mais externos são gigantes. As distâncias estão fora de escala.



Fonte: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel (2022)

Os parâmetros físicos e orbitais dos planetas de K90 utilizados nas simulações numéricas neste trabalho foram obtidas e apresentados por Contreras e Boyle (2018) e os autores calcularam a massa através da relação raio-massa. A massa do planeta *i* foi obtida por Shallue e Vanderburg (2018). O semi-eixo maior, em unidades astronômicas, inclinação e as massa comparadas à massa da Terra de cada planeta são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Semi-eixo maior, excentricidade e massa dos planetas no sistema K90

Planeta	Semi-eixo maior (u.a.)	Inclinação (°)	Massa ( $M_{Terra}$ )
b	0.076	0.28	2.4
c	0.088	0.00	1.7
i	0.203	0.48	2.05
d	0.307	0.03	7.9
e	0.424	0.11	6.9
f	0.520	0.09	8.1
g	0.736	0.12	69.1
h	0.996	0.08	297.9

Fonte: Contreras e Boyle (2018); Shallue e Vanderburg (2018))

É importante ressaltar que há uma divergência nos valores das massas dos planetas *g* e *h* obtidas pelos diversos autores que estudaram o sistema. Liang, Robnik e Seljak (2021) falam que os melhores valores a serem considerados para as massas dos gigantes gasosos são iguais a, respectivamente,  $15 M_{Terra}$  e  $203 M_{Terra}$ . Os autores ainda discutem sobre a possibilidade do planeta *g* ser um super-puff. Os planetas considerados super-puff possuem grandes dimensões e um valor de massa relativamente baixo, assim a densidade dos corpos é pequena. No caso de K90 *g*, Liang, Robnik e Seljak (2021) estimam uma densidade aparente igual a  $0.15 g/cm^3$ , entretanto, o planeta está localizado em uma distância orbital da estrela maior do que normalmente se localizam os super-puffs. Deste modo, os

autores consideram a possibilidade de existência de anéis planetários como uma explicação alternativa para as dimensões observadas do planeta.

A zona habitável do sistema K90 é um anel circunstelar que localiza-se entre, aproximadamente, 0.8 u.a. e 1.8 u.a. e abrange a região dos planetas g e h. Esses extremos interno e externo da ZH foram obtidos através do site interativo <http://astro.twam.info/hz/>, que permite obter as zonas habitáveis conservativa e extensa de sistemas estelares através de métodos matemáticos de diferentes autores e que são calculados de acordo com as informações sobre os valores da massa, temperatura e luminosidade da estrela apresentados pelo usuário.

O sistema Kepler-90 possui uma dinâmica complexa. Contreras et al. (2014) relata a existência de RMM (ressonância de movimento médio) entre os planetas internos, b e c, sendo RMM 4:5; e RMM 5:8 entre os planetas gigantes gasosos g e h. Os autores também verificam que para que o sistema seja estável, as excentricidades dos planetas g e h devem ser, respectivamente, menores que 0.025 e 0.095.

O principal objetivo desta parte do trabalho sobre K90 é analisar as colisões dos exocometas hipotéticos com os planetas do sistema. As semelhanças de Kepler-90 com o Sistema Solar e a presença de planetas rochosos foram os fatores levados em consideração na escolha do sistema para a análise realizada. O estudo foi dividido em três partes sendo cada uma referente a um valor de excentricidade dos planetas do sistema, que não são descritos na literatura. Na seção seguinte é apresentado um estudo sobre a estabilidade do sistema K90 para diferentes valores de excentricidades dos planetas realizado por Gaslac (2021) e a explicação dos valores escolhidos para o atual trabalho. Na Seção 2.3 são discutidas as condições iniciais dos exocometas considerados. Nas Seções 2.4, 2.5 e 2.6 apresentamos os três conjuntos de simulações numéricas analisados e na Seção 2.7 são descritas as principais considerações e resultados do estudo do sistema Kepler-90.

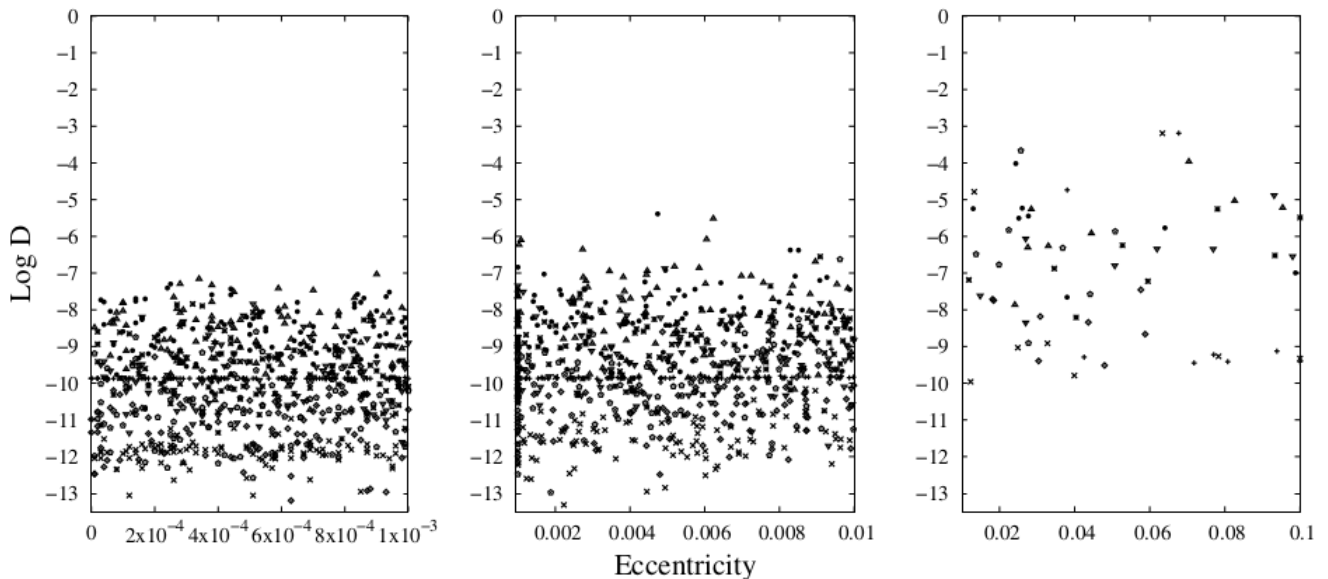
## 2.2 EXCENTRICIDADES DOS PLANETAS

Considerando que não há a descrição das excentricidades dos planetas do sistema K90 na literatura, Gaslac (2021) realizou um estudo da estabilidade dos planetas através da técnica do mapa de difusão para diferentes intervalos de valores das excentricidades. Nessa técnica, é realizada uma análise das frequências dos planetas tendo como base o semi-eixo maior e a anomalia média iniciais. Assim, de acordo com Gaslac (2021), é possível obter as frequências principais através de  $z'_j(t) = a(t)e^{i\lambda(t)}$ , sendo  $z'_j$  é uma variável dinâmica que permite calcular as frequências principais,  $a(t)$  é a amplitude relacionada ao semi-eixo maior e  $\lambda(t)$  é a anomalia média. As frequências são obtidas nos intervalos de 0 a  $T$  e de  $T$  a  $2T$ , sendo  $2T$  o tempo total de integração numérica. Através das frequências é possível obter a difusão, no estudo e nos gráficos, dados em  $\log D$  e o valor desse parâmetro permite dizer se o planeta é ou não estável. Segundo o autor, quando  $\log D$  é próximo de zero, a órbita do planeta é instável, e quando o valor do parâmetro é menor que  $-3$  a órbita é estável. Gaslac (2021) considera a instabilidade quando ocorre cruzamento de órbita de planetas ou colisões entre eles, ou ainda quando um planeta é ejetado do sistema.

No trabalho de Gaslac (2021), o autor realizou a análise da estabilidade dos sistemas K90 para três intervalos de excentricidades: de 0 a  $10^{-3}$ , de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  e de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  com um conjunto de 100 simulações para cada intervalo de excentricidade. A excentricidade, anomalia média, longitude

do nodo ascendente e argumento do pericentro foram obtidos aleatoriamente para cada planeta em cada simulação e o tempo total de integração é de  $10^4 T_h$ , sendo  $T_h$  o período orbital do planeta  $h$ . A **Figura 11** mostra os planetas sobreviventes ao final das simulações, respectivamente, para os intervalos de excentricidades de zero a  $10^{-3}$ , de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  e de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$ . Os valores das massas dos planetas utilizados são os obtidos por Contreras e Boley (2018) e Shallue e Vanderburg (2018). Gaslac (2021) ressalta a importância da massa dos planetas para a estabilidade do sistema.

Figura 11 – Planetas sobreviventes ao final de  $10^4 T_h$ . O primeiro gráfico representa a análise para o intervalo de excentricidade de 0 a  $10^{-3}$ ; o segundo gráfico é referente ao intervalo de excentricidade de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$ ; e o último, de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$ .



Fonte: Gaslac (2021)

Ao final das simulações, para o primeiro intervalo de excentricidade analisado, de acordo com Gaslac (2021), 100% dos planetas sobreviveram com  $\log D$  entre  $-13$  e  $-7$ . Para o segundo intervalo de excentricidade, 99% dos planetas sobreviveram ao final da análise com  $\log D$  entre  $-13$  e  $-5.5$  e para o último intervalo de excentricidade apenas 6% dos planetas sobrevivem. Deste modo, de acordo com o autor, para os dois primeiros intervalos de excentricidade analisados os planetas são estáveis. Ainda vale ressaltar que esses valores de excentricidades para os planetas  $g$  e  $h$  condizem com os valores determinados por Cabrera et al. (2014), os quais concluem que para o sistema Kepler-90 ser estável, as excentricidades de  $g$  e  $h$  devem ser menores que, respectivamente, 0.095 e 0.025.

Para a análise da dinâmica dos exocometas no sistema K90, assumimos diferentes valores das excentricidades analisados por Gaslac (2021) para os quais as órbitas dos planetas são estáveis. A principal diferença é que aqui fixamos um valor de excentricidade para todos os planetas em cada conjunto de simulação feita. Escolhemos os extremos dos intervalos analisados por Gaslac (2021), ou seja,  $e = 0$ ,  $e = 0.001$  e  $e = 0.01$ .

Na próxima seção são descritas as condições iniciais dos exocometas utilizados nas simulações numéricas para os três valores de excentricidades assumidos para os planetas. As condições iniciais são as mesmas para os três casos analisados. Em seguida, são descritos os resultados para cada conjunto de simulação, respectivamente, para  $e = 0$ ,  $e = 0.001$  e  $e = 0.01$ .

### 2.3 CONDIÇÕES INICIAIS

Os principais objetivos desta dissertação são: i) analisar o número de colisões de um conjunto de exocometas hipotéticos com os planetas do sistema Kepler-90 e ii) analisar a dinâmica desses corpos considerados. Deste modo assumimos um conjunto de exocometas sob influência gravitacional dos planetas e estrela do sistema.

A escolha das condições iniciais foram feitas com base nos valores analisados por Dvorak et al. (2020). Na Tabela 2 são apresentados os valores iniciais e finais dos elementos orbitais  $a$ ,  $e$  e  $I$  dos exocometas considerados no sistema K90 e suas variações.

Tabela 2 – Condições iniciais dos exocometas considerados no sistema.

Elemento orbital	Valor Inicial	Valor Final	Variação
$a$ (u.a.)	5	7	0.005
$e$	0.85	0.95	0.005
$I(^{\circ})$	0	180	10

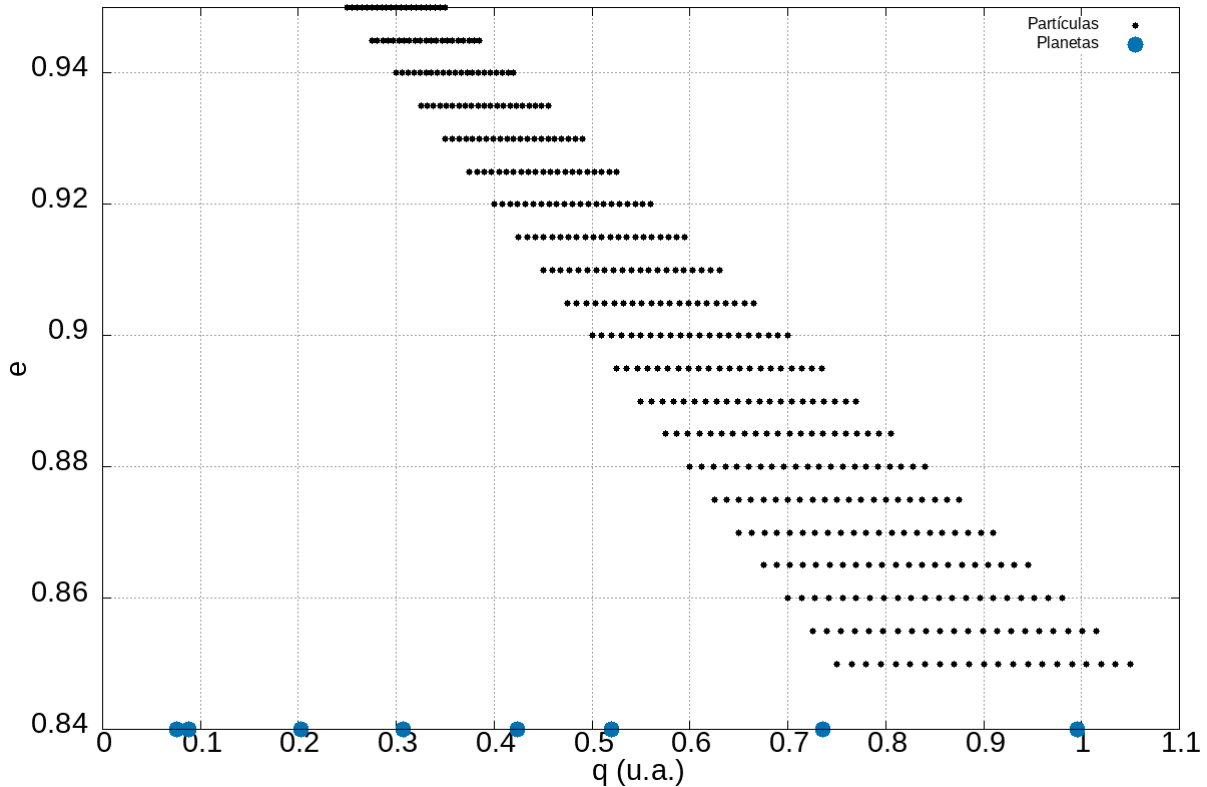
Fonte: Produzido pela autora.

Com os valores dos elementos orbitais considerados foi criada uma grade de exocometas, isto é, para cada combinação de semi-eixo maior e excentricidade, temos dezenove corpos que representam todos os valores de inclinações. Todas combinações resultam em um total de 8379 exocometas.

As inclinações são escolhidas desta forma por comparação com a configuração da nuvem de Oort do nosso Sistema Solar em que os cometas provenientes dessa região vêm de diferentes direções, comportamento aqui obtido pela variação de inclinação de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$ . As altas excentricidades permitem que os exocometas alcancem a região mais interna do sistema porque o raio do pericentro da maioria desses corpos está na região planetária. Por fim, a região escolhida para a localização dos exocometas (que têm semi-eixos maiores que variam de 5 a 7 u.a.) é aproximadamente proporcional a esses valores no sistema 47 UMa analisado por Dvorak et al. (2020) e descrito no Capítulo 1.

Com os valores de semi-eixo maior e excentricidade escolhidos, podemos calcular o raio do pericentro,  $q$ , dos exocometas no sistema pela expressão  $q = a(1 - e)$ . O exocometa com menor valor de  $a$  e maior excentricidade, valores que são, respectivamente, 5 u.a. e 0.95 são os que mais se aproximam do sistema (com menor valor de  $q$ ) e atingem um raio orbital de 0.25 u.a. que é a região entre os planetas b e c como é possível observar na Figura 12. Nesse gráfico são mostrados os valores do raio do pericentro ( $q$ ) dos exocometas considerados, sendo que cada ponto preto representa dezenove exocometas, pois as inclinações não estão sendo consideradas. Os pontos azuis representam os planetas. É importante ressaltar que na Figura 12, o raio do pericentro dos planetas são fielmente representados, entretanto os valores das excentricidades não correspondem aos valores reais considerados e que são 0, 0.001 e 0.01.

Figura 12 – Raio do pericentro e excentricidade dos exocometas considerados no sistema com condições iniciais descritas na Tabela 2. Cada ponto representa dezenove exocometas com diferentes inclinações. Observamos que a maioria dos exocometas atingem a região planetária que se estende até 1 u.a.



Fonte: Produzido pela autora.

Os elementos orbitais anomalia média,  $M$ ; longitude do nodo ascendente,  $\Omega$ ; e argumento do pericentro,  $\omega$ , foram obtidos aleatoriamente para cada exocometa considerado acima e variam entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ .

Os diferentes valores para os elementos orbitais de cada exocometa permite a análise de diferentes configurações desses corpos hipotéticos no sistema. Quando os exocometas atingem o raio orbital igual ou superior a 30 u.a., são ejetados do sistema e não são mais consideradas nas simulações numéricas. Consideramos ejeções quando os exocometas hipotéticos saem do domínio de análise (30 u.a.) e não por assumirem órbitas hiperbólicas.

O tempo total de integração para os três casos de excentricidades considerados é de 500 mil anos.

Os períodos orbitais ( $T$ ) dos exocometas hipotéticos com menor e maior semi-eixo maior são, respectivamente, 10.2 anos e 16.9 anos e foram calculados através da Terceira Lei de Kepler apresentada na Equação 1.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} a^3 \quad (1)$$

$T$  é o período orbital e  $\mu$  é definido pela expressão  $\mu = G(M + m)$ , sendo  $G$  a constante gravitacional ( $G = 6.672 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ ),  $M$  e  $m$  são, respectivamente, as massas do corpo central e do exocometas. Os exocometas possuem massas desprezíveis, portanto  $\mu \approx GM$ .

No tempo total de integração, os exocometas mais próximas dos planetas evoluem aproximadamente 49000 vezes e os mais afastadas, aproximadamente 31000 vezes em torno do sistema planetário. Consideramos esses valores suficiente para a análise da dinâmica orbital desses corpos considerados. O período orbital e o número de evoluções dos exocometas foram calculados considerando dois corpos no sistema: a estrela hospedeira e o exocometa que possui massa desprezível, ou seja, não consideramos os planetas no cálculo de  $T$ .

Assim como no estudo de Dvorak et al. (2020), aqui consideramos os exocometas com massa desprezível sob influência exclusiva dos planetas e da estrela hospedeira do sistema Kepler-90. Foram feitos três conjuntos de simulações numéricas, o primeiro para a excentricidade dos planetas igual a zero, o segundo para  $e = 0.001$  e o terceiro para  $e = 0.01$ , valores para os quais K90 é estável como mostrado por Gaslac (2021) e descrito na Seção 2.2. Para os três casos, os exocometas possuem as mesmas condições iniciais aqui descritas e os parâmetros físicos e orbitais dos planetas utilizados são os descritos na Tabela I para manter a coerência com o trabalho de Gaslac (2021), pois foram os valores também utilizados pelo autor.

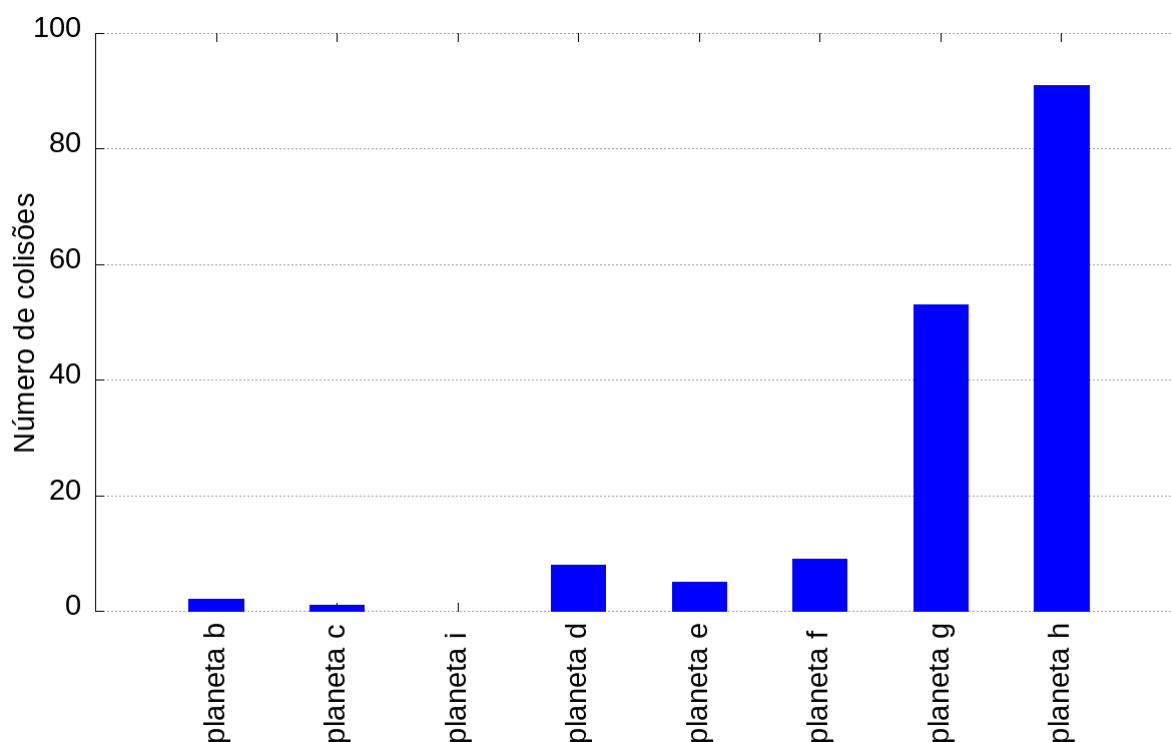
Para a realização das simulações numéricas, utilizamos o programa Mercury (Chambers, 1999), com o integrador Bulirsch-Stoer. Nas Seções 2.4, 2.5 e 2.6 são mostrados os resultados obtidos para os três casos de excentricidades analisados.

## 2.4 EXCENTRICIDADE ZERO

O primeiro conjunto de exocometas analisados com as condições iniciais descritas na seção anterior estão sob influência gravitacional dos planetas e da estrela hospedeira do sistema K90. As excentricidades de todos os planetas assumidas nessa primeira etapa são  $e = 0.000$ , para a qual o sistema é estável como mostrado por Gaslac (2021) e os parâmetros orbitais e físicos são descritos na Tabela II.

Inicialmente analisamos o número de colisões de exocometas com os planetas do sistema. Na Figura 13 temos a representação do histograma do número de exocometas que colidiram com cada planeta do sistema. Há um total de 169 colisões para o primeiro caso de excentricidade analisado. O planeta i não sofre nenhuma colisão. O número de exocometas que colidem com os planetas b, c, d, e, f, g e h são, respectivamente, 2, 1, 8, 5, 9, 53 e 91. Observamos que a maioria das colisões ocorrem com os planetas gigantes gasosos que são mais externos, principalmente com K90 h. Este resultado é esperado porque a interação gravitacional das partículas com g e h é maior, sendo que, além das colisões, esses corpos podem interagir com os exocometas de modo que ocorra ejeção ou troca de momento angular que pode resultar no aprisionamento dessas partículas no sistema como mencionado por Dvorak et al. (2020). Ainda, na Figura 12, observamos que a distribuição dos raios do pericentro da maioria dos exocometas está localizados na região dos planetas K90 g e K90 h e essa característica pode contribuir para que ocorram mais colisões com os dois planetas mais externos. O número de exocometas que colidem com os planetas equivale a aproximadamente 2.17% do total considerado.

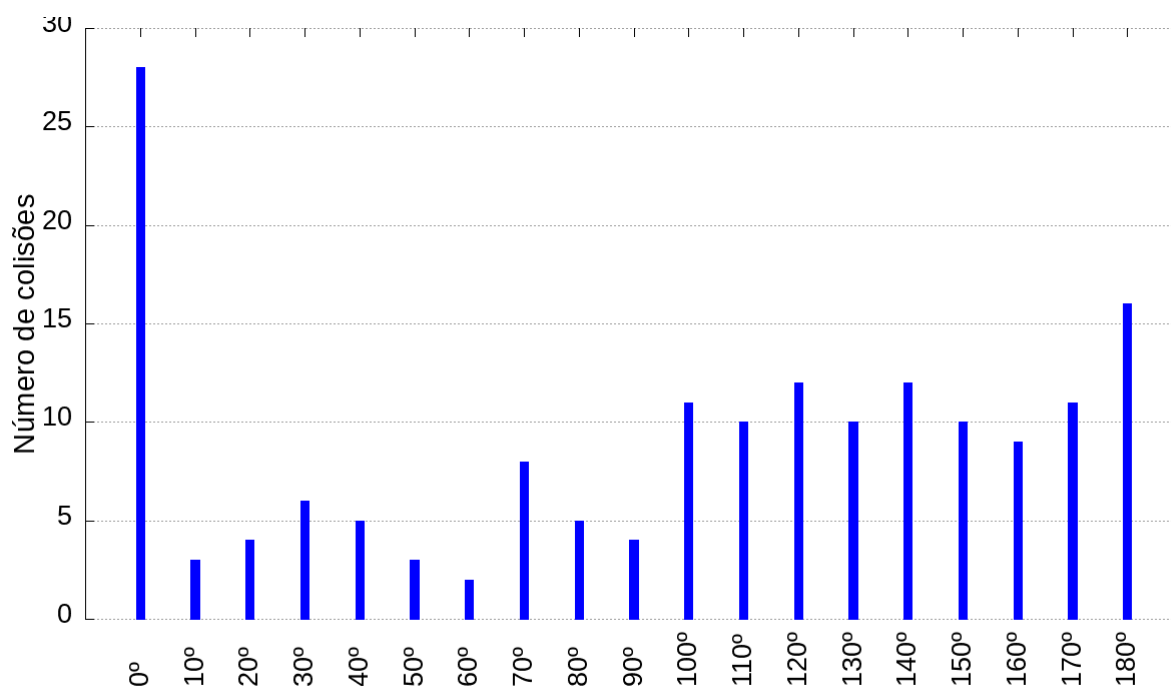
Figura 13 – Número de exocometas que colidiram com cada planeta do sistema K90 quando a excentricidade dos planetas são consideradas iguais a zero.



Fonte: Produzido pela autora.

Também analisamos o número de colisões que ocorreram considerando as inclinações iniciais dos exocometas (Figura 14). Exocometas com todos os valores iniciais de inclinações colidiram e o menor número de colisões ocorreu para esses corpos inicialmente com  $I = 60^\circ$ . Os maiores números de colisões ocorreram para exocometas com inclinações iniciais iguais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$  e isso ocorre porque se aproximam dos planetas aproximadamente no mesmo plano orbital, pois as inclinações dos planetas são inferiores a  $1^\circ$ . Esse resultado é semelhante ao obtido por Dvorak et al. (2020), para o qual os corpos que mais colidem são os exocometas que possuem inclinações iniciais próximas ao plano da eclíptica.

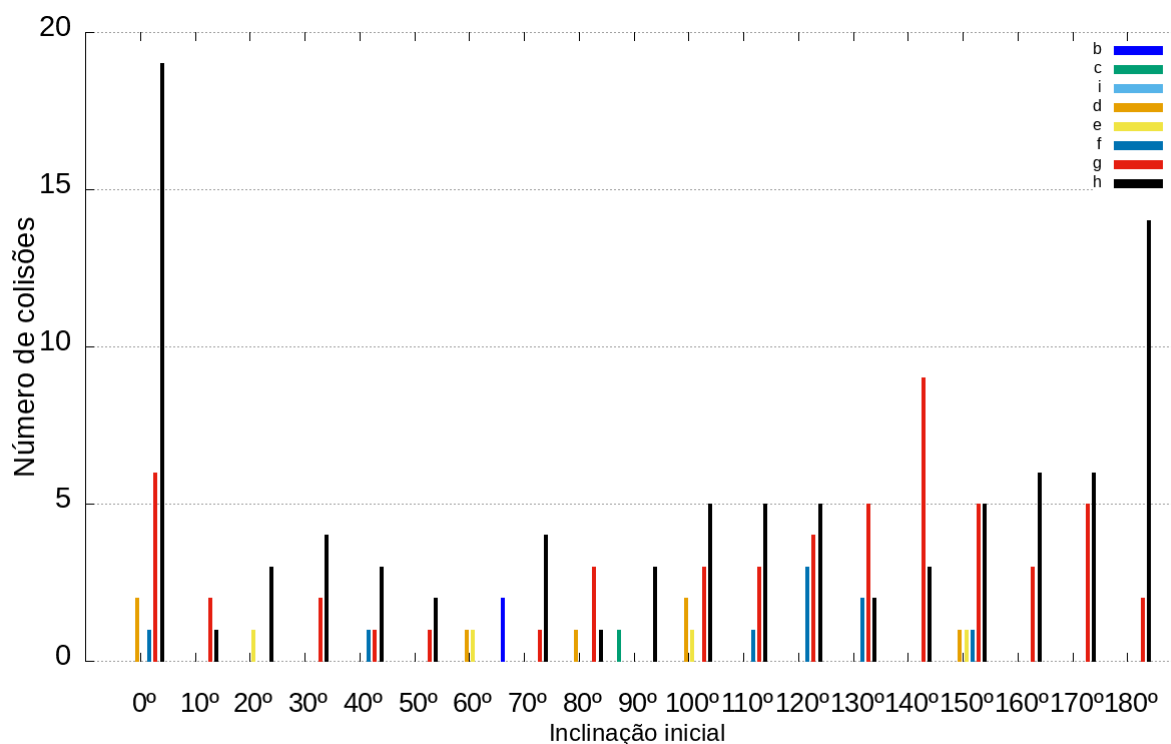
Figura 14 – Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas quando as excentricidades dos cometas são iguais a zero.



Fonte: Produzido pela autora.

O histograma representado na [Figura 15](#) também mostra o número de colisões para cada inclinação inicial dos exocometas, entretanto aqui consideramos as colisões para cada planeta do sistema que são representados por barras de diferentes cores e a identificação é descrita na legenda do gráfico. Observamos que os exocometas que colidem com o planeta h, o qual que sofre mais colisões, possuem inclinações iniciais iguais a 0° e 180°. O planeta g sofre mais colisões de exocometas com inclinações iniciais iguais a 140°.

Figura 15 – Número de exocometas que colidiram com cada planeta dadas as inclinações iniciais quando  $e$  dos planetas é igual a zero. Cada cor de barra representa a colisão com um planeta e a identificação é descrita na legenda do gráfico.



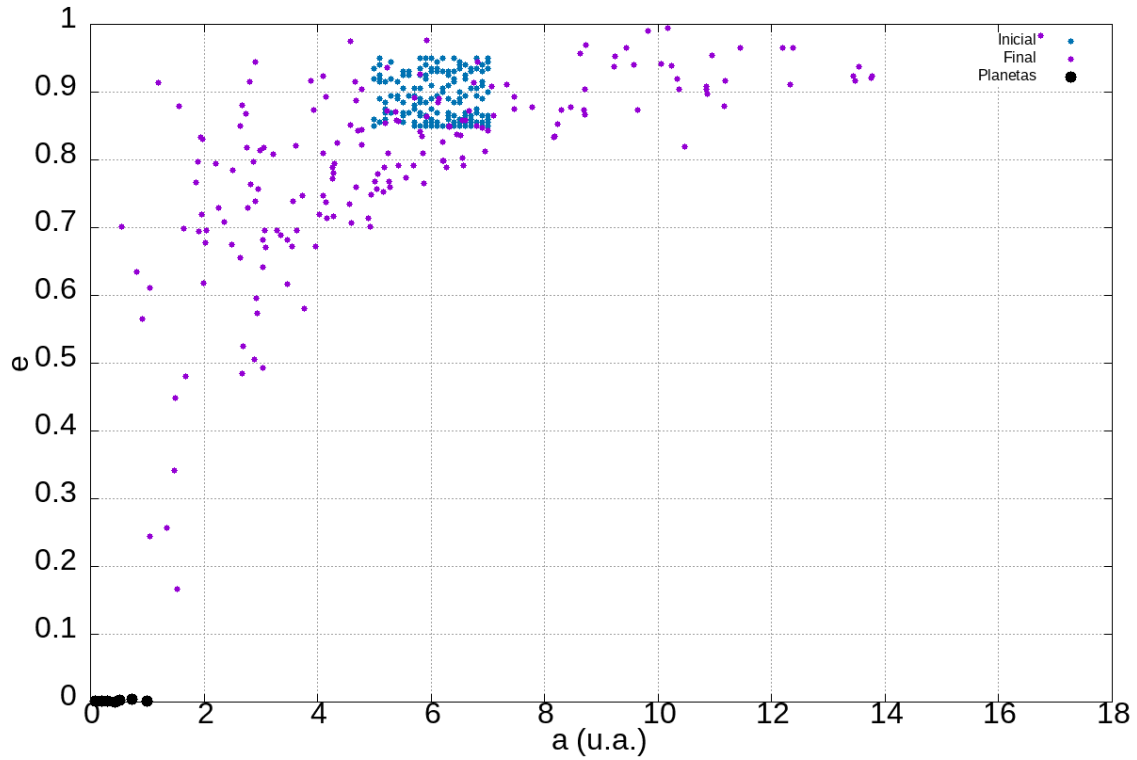
Fonte: Produzido pela autora.

A maioria dos exocometas foram ejetadas ao longo da integração numérica. Entretanto, alguns sobreviveram ao final de 500 mil anos de integração. Há um total de 182 exocometas sobreviventes, que corresponde a aproximadamente 2% do total analisado.

As [Figura 16](#) e [Figura 17](#) mostram os elementos orbitais dos exocometas sobreviventes ao final da integração. Em ambos os gráficos, são representadas os valores iniciais e finais dos semi-eixo maior, excentricidade e inclinação dos exocometas, respectivamente, por pontos azuis e roxos. Os pontos pretos representam os planetas.

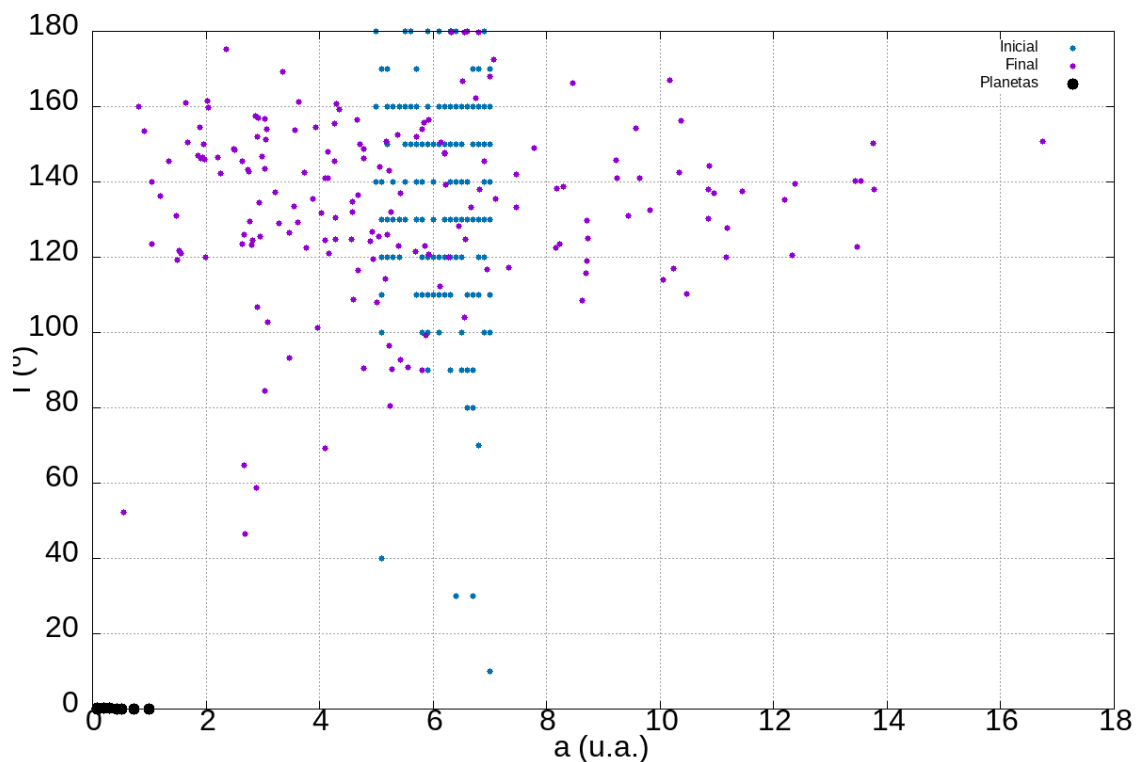
O semi-eixo maior dos exocometas sobreviventes estão entre 0.5 e 13.7 u.a., sendo que alguns desses corpos sobrevivem próximo à região planetária. É importante notar que alguns exocometas diminuem consideravelmente a excentricidade e atingem valores próximos a 0.2 ([Figura 16](#)). Podemos considerar esses corpos como capturados pelo sistema segundo a abordagem de Dvorak et al. (2020), em que os autores considera capturas quando  $e$  é inferior a 0.7 e  $a < 10$  u.a. As inclinações da maioria das partículas sobreviventes mantêm valores próximos ao inicial ([Figura 17](#)).

Figura 16 – Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade das partículas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são igual a zero. Os pontos roxos e azuis representam, respectivamente, os elementos orbitais iniciais e finais das partículas sobreviventes. Os pontos pretos representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

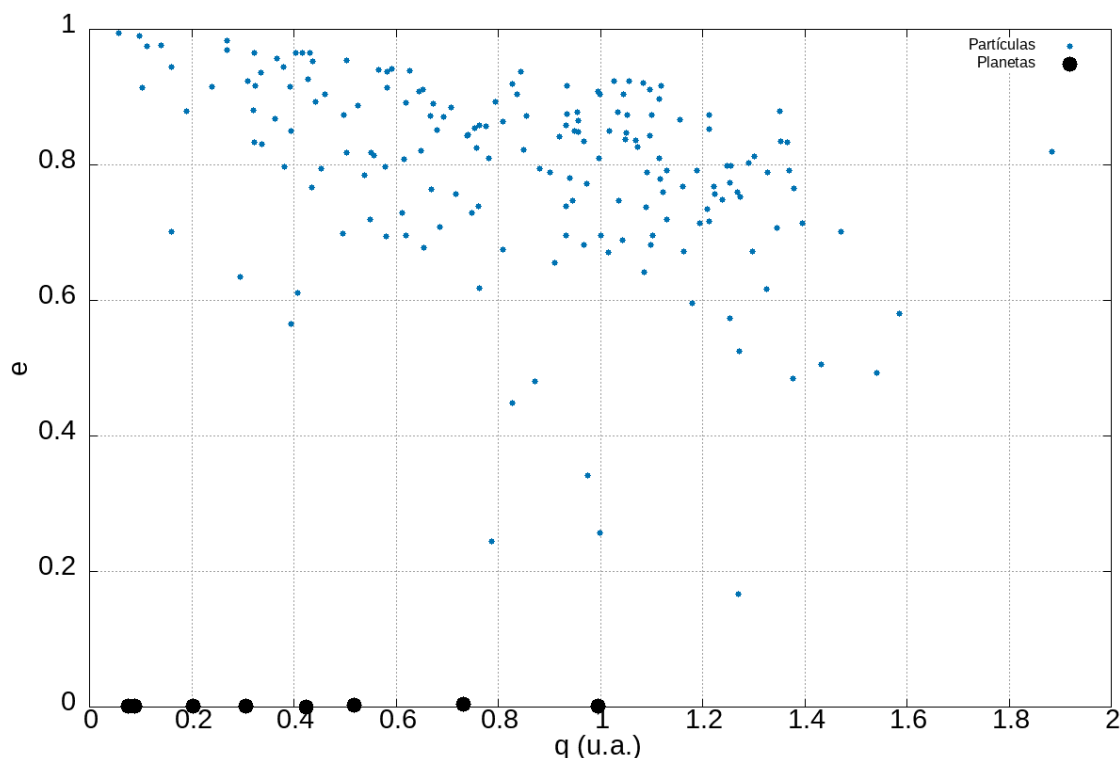
Figura 17 – Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos de integração quando as excentricidades dos planetas são iguais a zero. Os pontos roxos e azuis representam, respectivamente, os elementos orbitais iniciais e finais dos exocometas. Os pontos pretos representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

A [Figura 18](#) mostra o raio do pericentro dos exocometas que sobreviveram no sistema e são representadas por pontos azuis. A maioria dos exocometas que sobrevivem têm  $q$  na região planetária, ou seja, com o raio do pericentro inferior a 1 u.a.

Figura 18 – Raio do pericentro dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos de integração. Os pontos azuis representam os exocometas e os pontos pretos representam os planetas.

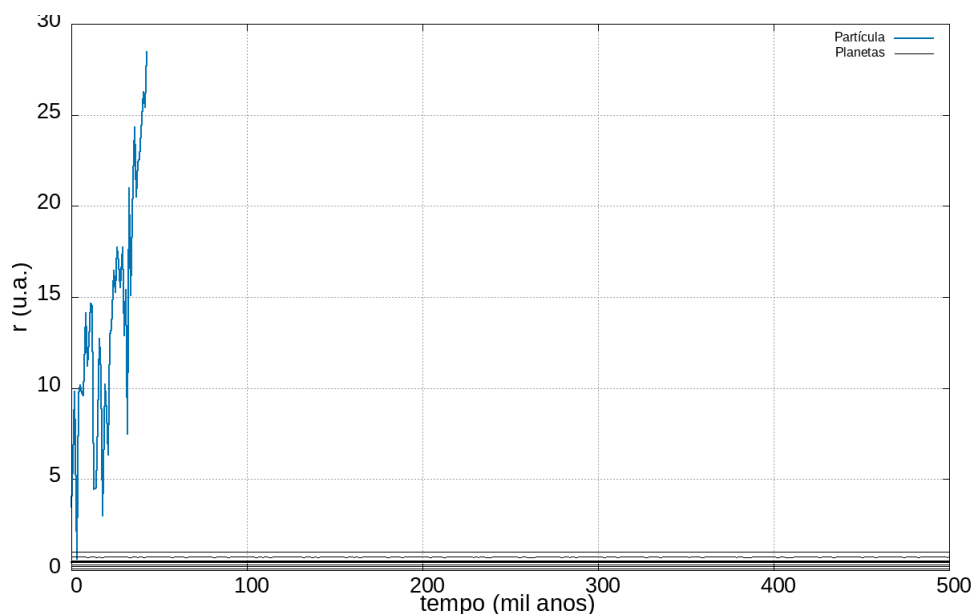


Fonte: Produzido pela autora.

Os gráficos a seguir mostram a evolução temporal dos elementos orbitais  $a$ ,  $e$  e  $I$  e raio orbital,  $r$ , de três exocometas no sistema. Consideramos a análise de um corpo que colidiu com um planeta, um que foi ejetado e um que sobreviveu até o final da simulação numérica.

A evolução do raio orbital do exocometa ejetado é mostrado na [Figura 19](#) e esse corpo tem o semi-eixo maior, excentricidade e inclinação iniciais iguais a, respectivamente, 5 u.a., 0.865 e  $130^\circ$ . A curva azul mostra a evolução do raio orbital do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas. Observamos que o raio orbital do exocometa varia ao longo do tempo e no início da integração atinge a região planetária, mas não colide devido às diferenças de inclinações entre os planos orbitais do exocometa e dos planetas. Esse valor cresce ao longo do tempo até ser ejetado do sistema em 44 mil anos de integração e completando, aproximadamente, 4300 voltas em torno do sistema planetário quando calculamos o período orbital. Não é possível observar o momento exato da ejeção no gráfico quando o exocometa atinge o raio orbital de 30 u.a. Isso ocorre devido o intervalo de tempo assumido para os dados das órbitas dos corpos do sistema serem computados e que, para esse caso, ocorreu até 43 mil anos.

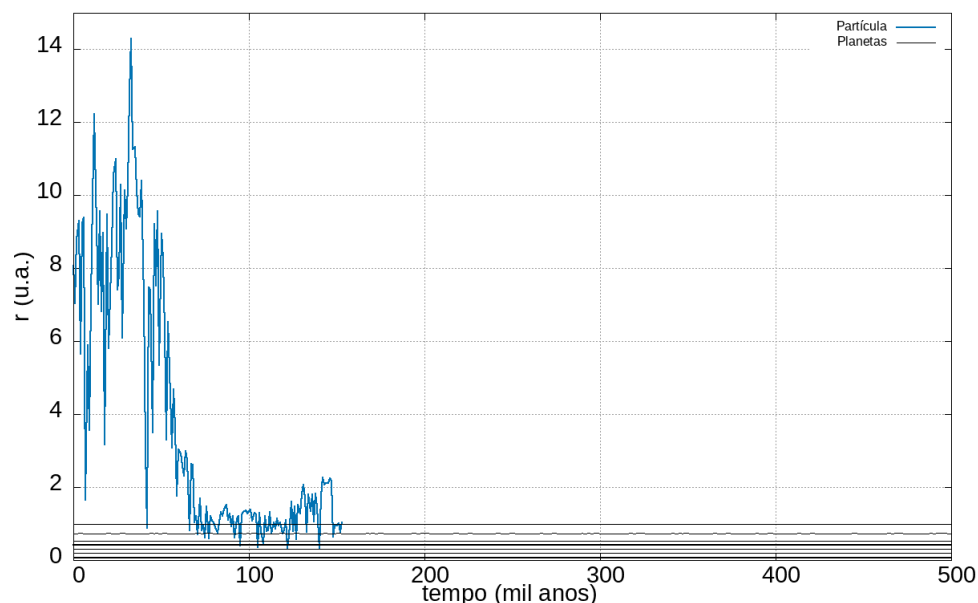
Figura 19 – Variação do raio orbital de um exocometas ejetado com valores iniciais de  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.865$  e  $I = 130^\circ$ . A curva em azul ilustra a evolução temporal de  $r$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

A [Figura 20](#) mostra a evolução temporal do raio orbital de um exocometas que colidiu, sendo representado pela curva azul e as curvas em preto representam os planetas. O exocometas possui os valores iniciais  $a = 5.2$  u.a.,  $e = 0.855$  e  $I = 90^\circ$  e o período orbital é de 10.8 anos. A colisão ocorreu com o planeta h em aproximadamente 153 mil anos. Durante o tempo em que sobrevive no sistema, o exocometas orbita aproximadamente 46300 vezes e  $r$  sofre grandes variações ao longo do tempo, atingindo um valor próximo a 15 u.a. e depois diminui até atingir a região planetária.

Figura 20 – Variação do raio orbital de um exocometas que colidiu com valores iniciais  $a = 5.2$  u.a.,  $e = 0.855$  e  $I = 90^\circ$ . A colisão ocorreu com o planeta h em aproximadamente 153 mil anos de interação. A curva em azul representa a evolução temporal de  $r$  da partícula e as curvas em preto representam os planetas.

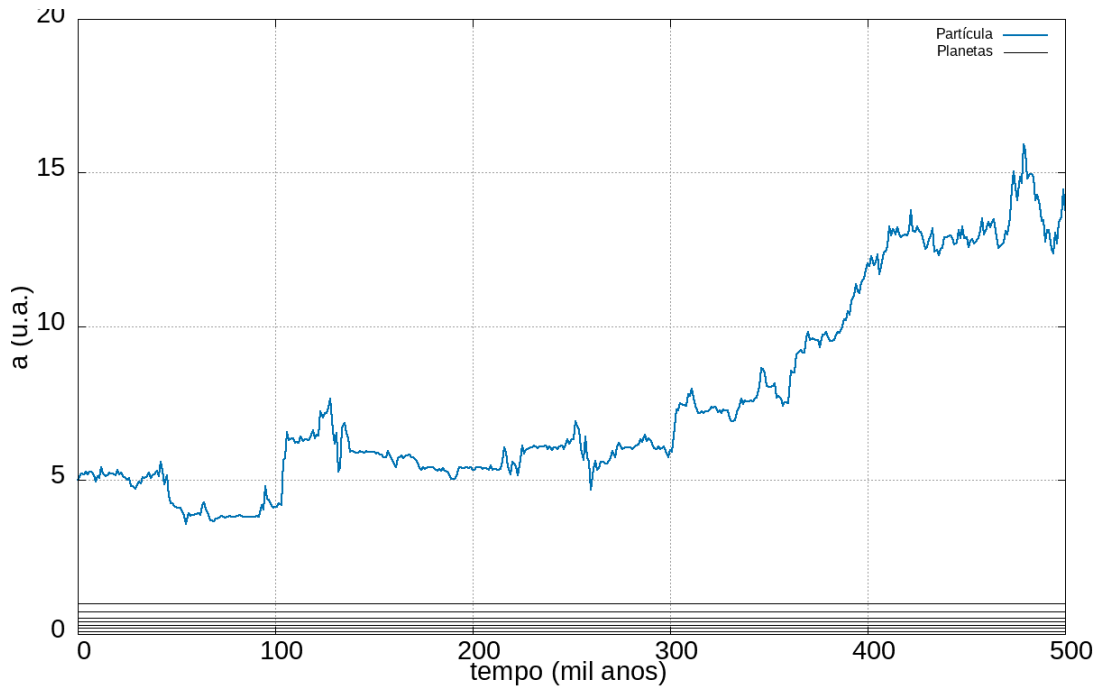


Fonte: Produzido pela autora.

Por fim, temos a análise de um exocometas sobrevivente no sistema quando a excentricidade dos planetas são consideradas iguais a zero. O exocometas têm os elementos orbitais iniciais iguais a  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.850$ ,  $I = 160^\circ$ . Consideramos os gráficos das evoluções temporais do semi-eixo maior, excentricidade, inclinação e raio orbital que são representados, respectivamente, por [Figura 21](#), [Figura 22](#), [Figura 23](#) e [Figura 24](#). Em todos os gráficos, a curva do exocometas é representada em azul e os planetas são representados por preto.

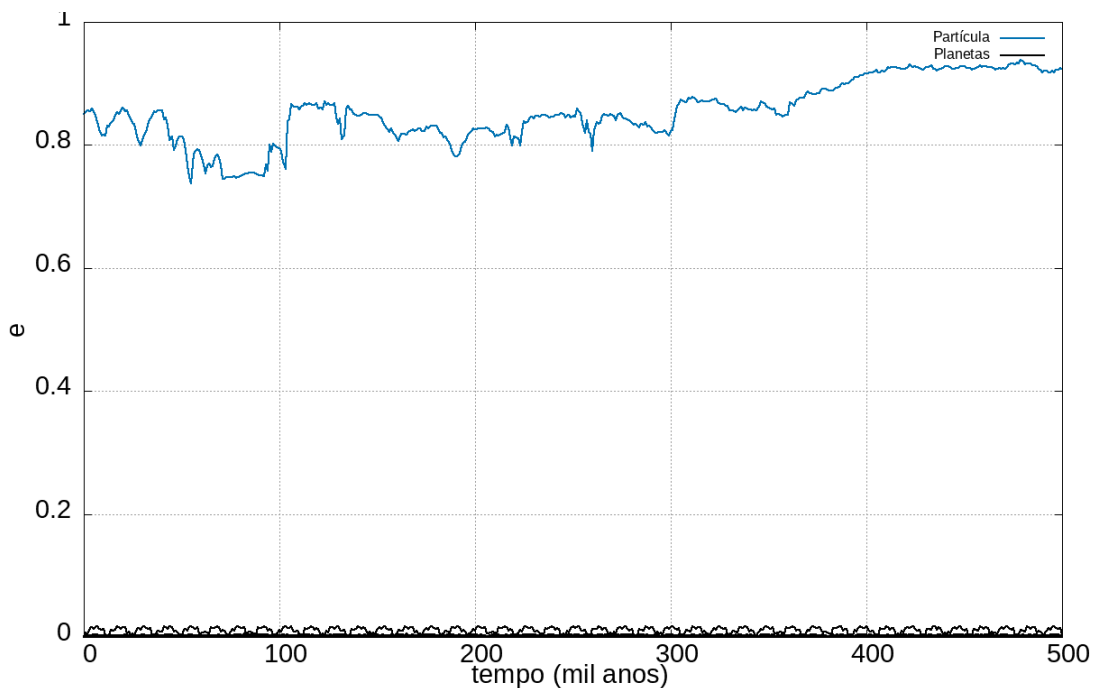
Observamos variações ao longo do tempo em todos os elementos orbitais analisados. O semi-eixo maior e a excentricidade variam e tendem a aumentar os valores durante os 500 mil anos de simulação numérica considerados, sendo que  $a$  alcança valores próximos a 15 u.a. O raio orbital varia mais significativamente quando comparado aos outros elementos e assim como ocorre com a excentricidade e o semi-eixo maior, o valor tende a aumentar com o tempo e atinge valores próximos a distância de ejeção, que definimos ser 30 u.a.

Figura 21 – Evolução temporal do semi-eixo maior de um exocometas sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.850$  e  $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a evolução temporal de  $a$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.



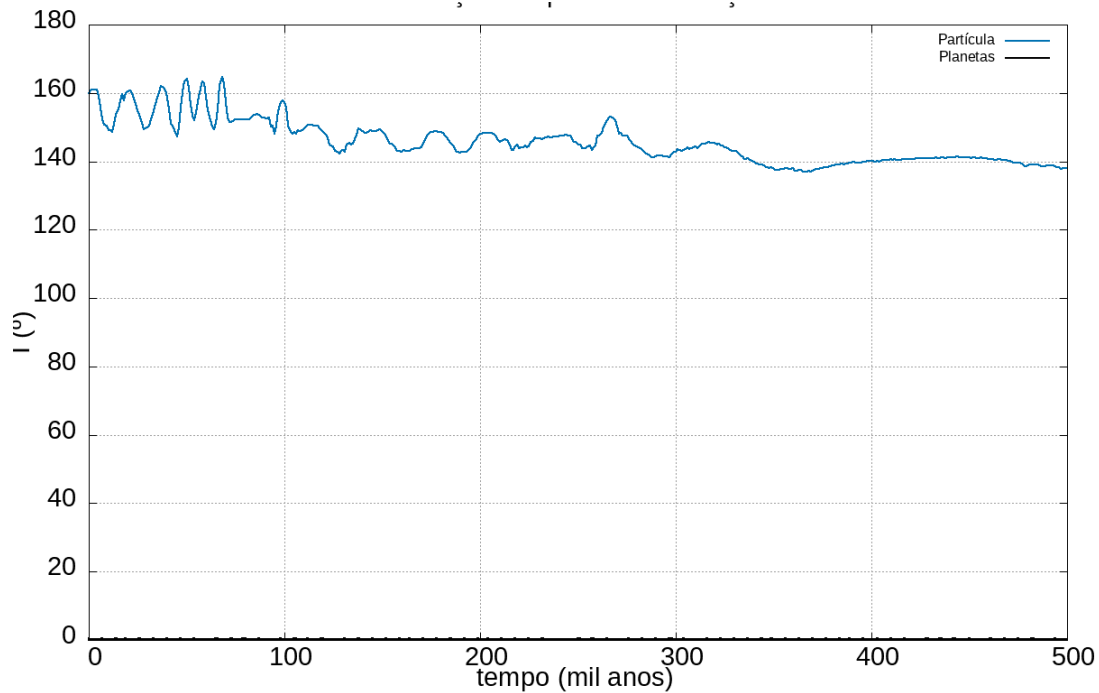
Fonte: Produzido pela autora.

Figura 22 – Evolução temporal da excentricidade de um exocometas sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.850$  e  $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a variação de  $e$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.



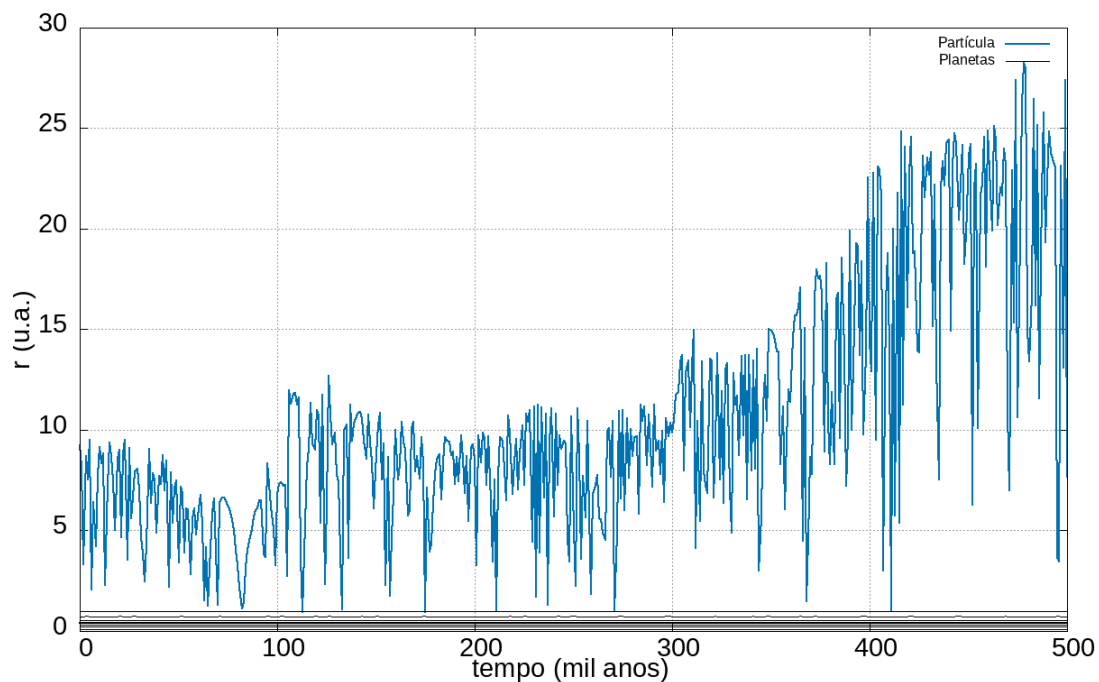
Fonte: Produzido pela autora.

Figura 23 – Evolução temporal da inclinação de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.850$  e  $I = 160^\circ$ . A curva em azul representa a variação de  $I$  do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

Figura 24 – Evolução temporal do raio orbital  $r$  de um exocometa sobrevivente até o final da simulação numérica com elementos orbitais iniciais  $a = 5$  u.a.,  $e = 0.850$  e  $I = 160^\circ$ . A curva em azul ilustra a variação de  $r$  do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.



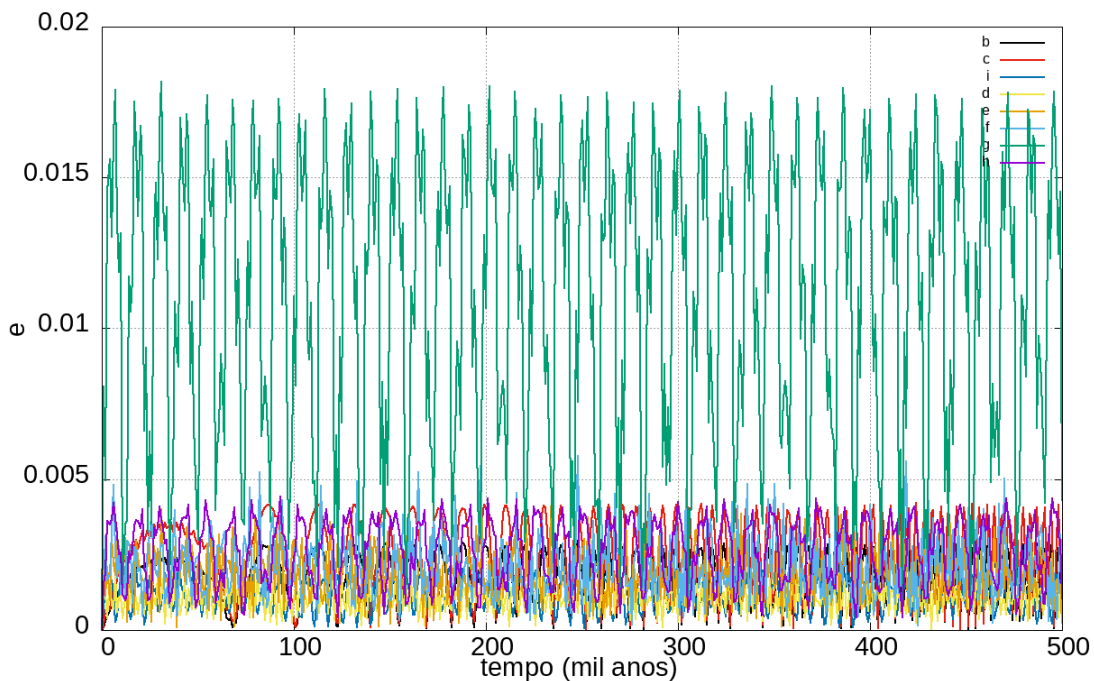
Fonte: Produzido pela autora.

Na Figura 22, fica evidente que ocorre uma oscilação na excentricidade de um dos planetas do

sistema. Investigamos essa oscilação através da imagem ampliada dos intervalos de oscilação dos planetas e mostrada na [Figura 25](#). Observamos que as excentricidades de todos os planetas do sistema K90 sofrem oscilações ao longo do tempo quando a excentricidade inicial é zero e notamos que a maior amplitude de oscilação ocorre para o planeta gigante gasoso g representado pela curva em verde. O valor mínimo para a excentricidade desse planeta é zero e o valor máximo é de  $e = 0.018$ . O planeta mais externo h atinge o valor máximo  $e = 0.04$ . A maior amplitude de oscilação do planeta g ocorre devido à perturbação gravitacional do planeta h que é suficientemente grande e está próximo.

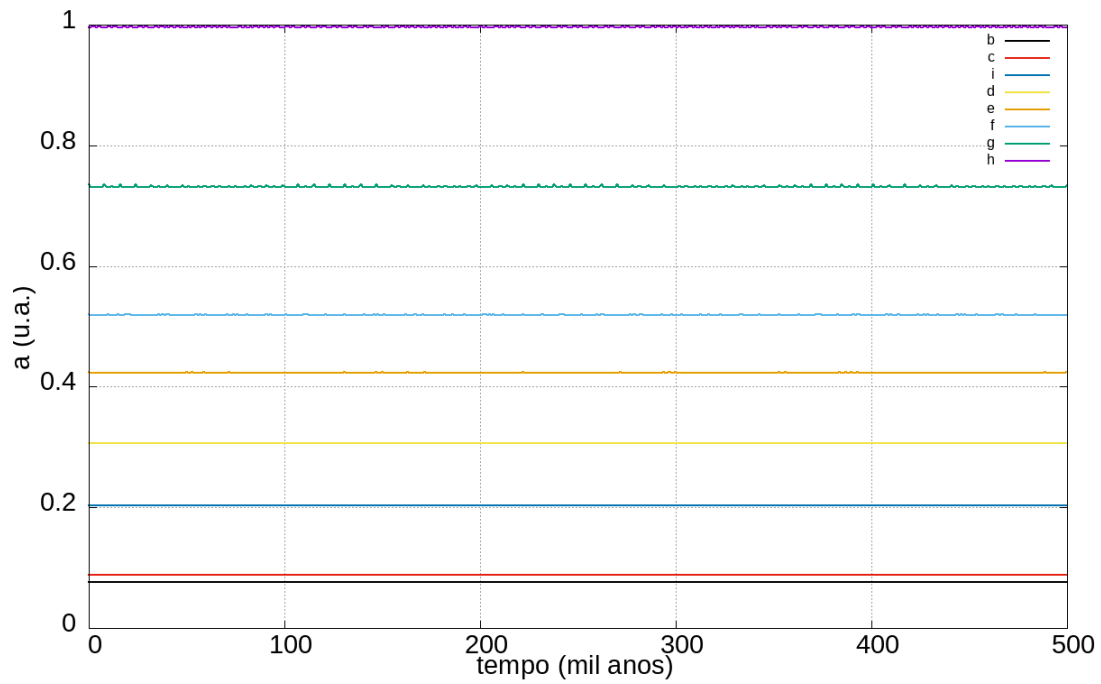
A [Figura 26](#) mostra as variações do semi-eixo maior dos planetas e na [Figura 27](#) temos uma ampliação da variação do planeta g, o qual possui a variação da excentricidade mais evidente. Os valores de  $a$  varia entre 0.730 u.a e 0.736 u.a., sendo a amplitude máxima de 0.006. Então, para os planetas ocorre oscilações nos valores de  $a$ , entretanto são pequenas.

Figura 25 – Evolução temporal das excentricidades dos planetas no sistema K90 quando  $e$  inicial é igual a zero. Cada cor representa um planeta como indicado na legenda.



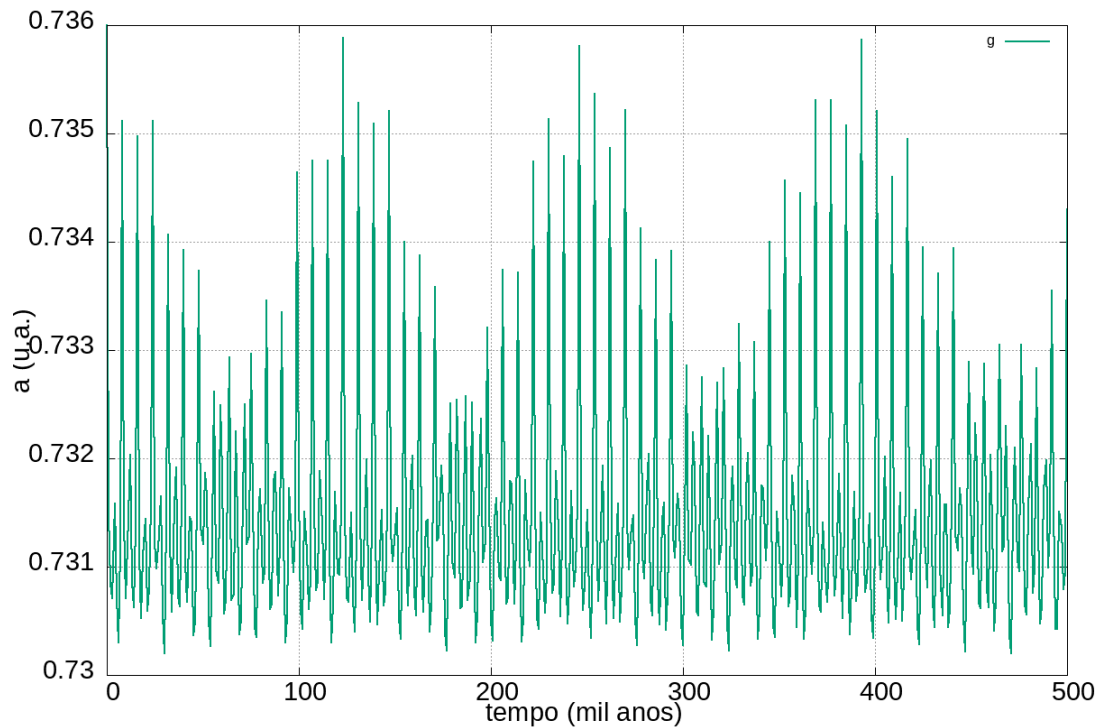
Fonte: Produzido pela autora.

Figura 26 – Evolução temporal do semi-eixo maior dos planetas. Cada cor representa um planeta como indicado na legenda.



Fonte: Produzido pela autora.

Figura 27 – Evolução temporal do semi-eixo maior do planeta K90 g ao longo de 500 mil anos de integração.



Fonte: Produzido pela autora.

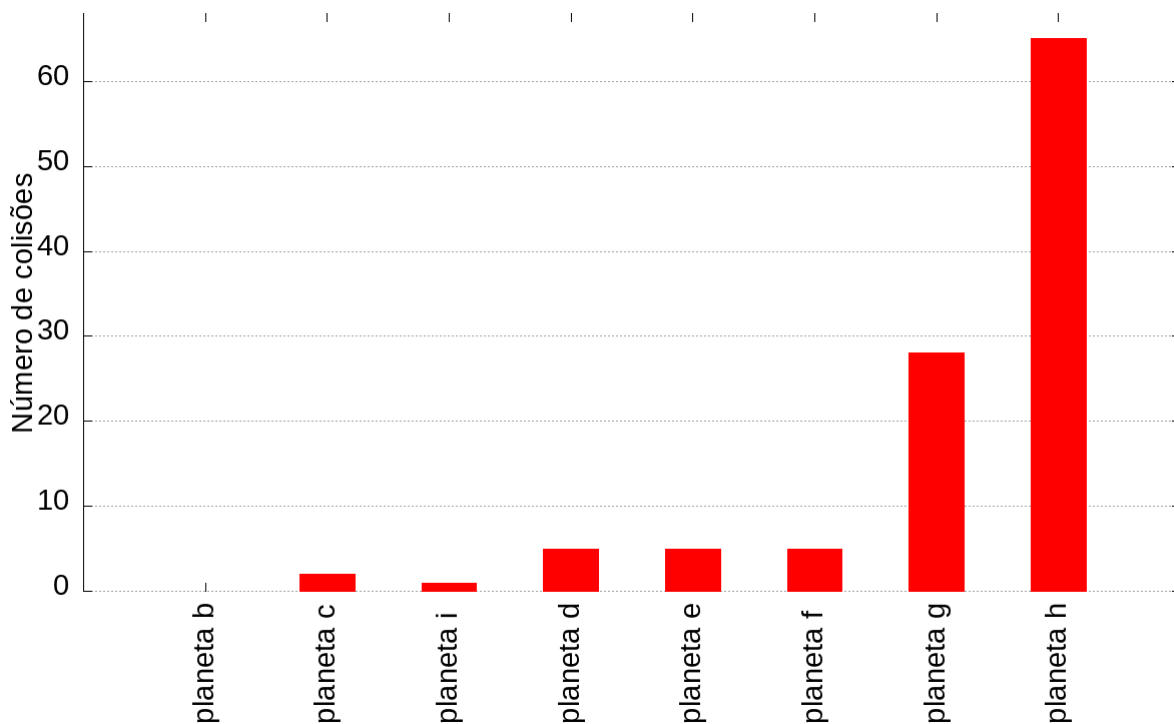
## 2.5 EXCENTRICIDADE $10^{-3}$

Nesta seção, são apresentados os resultados da dinâmica dos exocometas considerados no sistema Kepler-90 para o segundo caso de excentricidade,  $e = 0.001$ . A análise aqui realizada é semelhante ao caso anterior, ou seja, consideramos um conjunto de exocometas com as condições iniciais descritas na Seção 2.3 sob influência gravitacional exclusivamente dos planetas e da estrela hospedeira.

Assim como no caso anterior, inicialmente, analisamos o número de exocometas que colidiram com os planetas do sistema. Na [Figura 28](#) é apresentado o histograma do número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90. Observamos que, com excessão do planeta b, todos os outros planetas sofrem colisões. Assim como ocorre para o caso de excentricidade zero, os planetas mais externos e gigantes gasosos, em especial o planeta h, sofrem o maior número de colisões.

Para o segundo caso de excentricidade há um total de 111 colisões, sendo que 65 delas ocorreram com o planeta h, assim como no caso anterior. O número de colisões equivale a 1.32% do total de exocometas considerados.

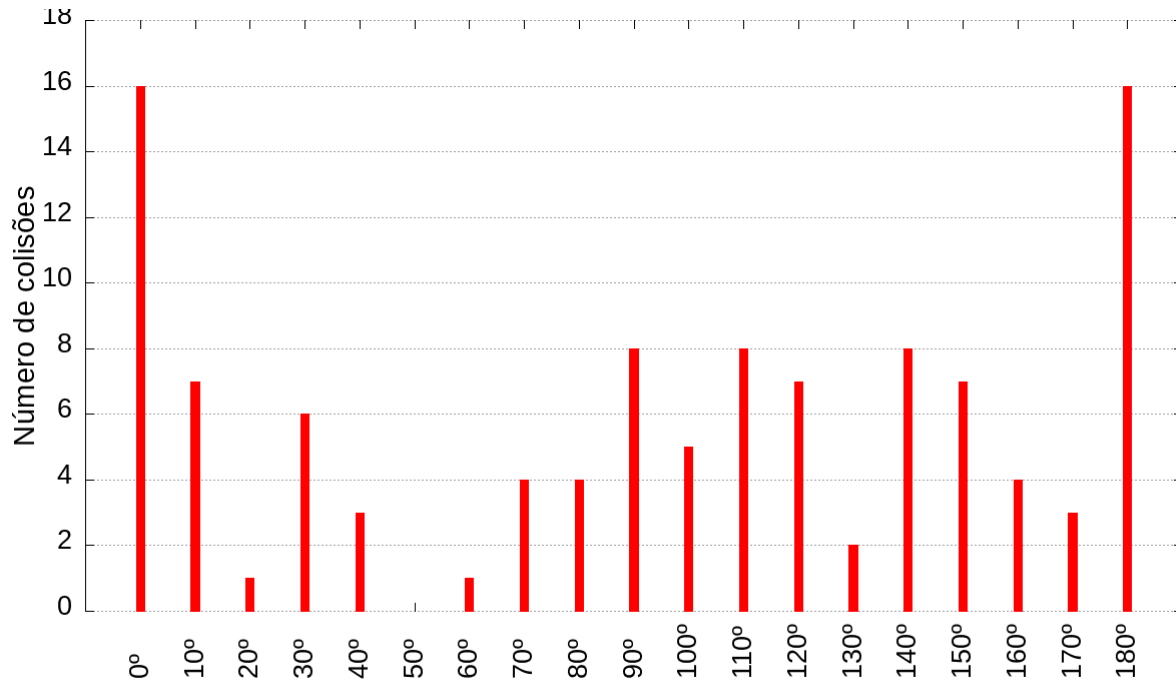
Figura 28 – Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 quando a excentricidade dos planetas são consideradas iguais a 0.001.



Fonte: Produzido pela autora.

O número de colisões para cada valor inicial de inclinação dos exocometas são mostrados no histograma representado na [Figura 29](#). Exocometas com inclinações iniciais iguais  $50^\circ$  não colidem. Os maiores números de colisões ocorrem para  $I$  igual a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Esperamos esse resultado porque esses corpos possuem o plano orbital próximo ao dos planetas, mas também ocorrem colisões para todos os outros valores de inclinações.

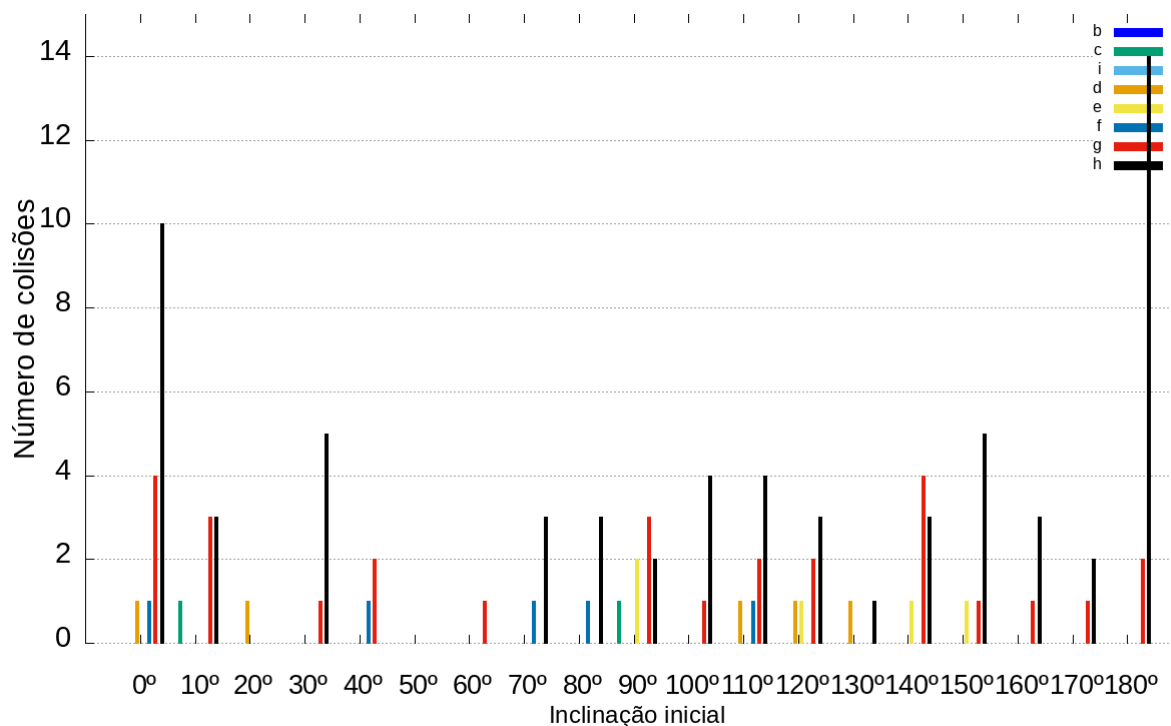
Figura 29 – Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais de cada exocometa. As excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.001.



Fonte: Produzido pela autora.

O histograma representado na [Figura 30](#) mostra o número de exocometas que colidem com cada planeta do sistema K90 para cada inclinação inicial consideradas. Assim como ocorre no caso em que as excentricidades dos planetas são iguais a zero, aqui, a maioria das colisões que ocorrem com o planeta mais externo h (representado pelas barras pretas) são ocasionadas por exocometas que possuem inclinações iniciais iguais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

Figura 30 – Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas. Cada cor de barra representa um planeta e a identificação é descrita na legenda do gráfico.



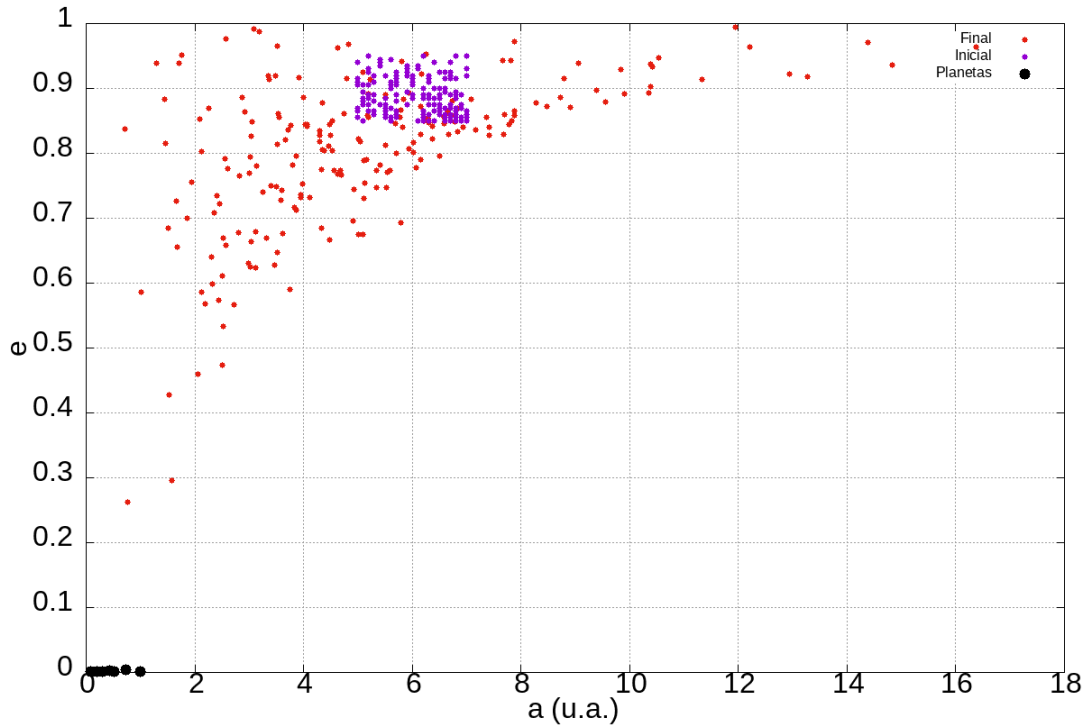
Fonte: Produzido pela autora.

Como ocorre para o primeiro caso analisado, aqui, a maior parte dos exocometas são ejetados do sistema. Há 204 exocometas no sistema ao final de 500 mil anos de integração, este total equivale a 2.43% do total de exocometas considerados no sistema no tempo inicial.

As [Figura 31](#) e [Figura 32](#), mostram a excentricidade e inclinação dos exocometas sobreviventes em função do semi-eixo maior, respectivamente. Nos dois casos, temos a representação dos elementos orbitais iniciais e finais dos exocometas que sobreviveram, sendo as condições iniciais representadas por pontos roxos, e as finais por pontos vermelhos. Em ambos os gráficos, os planetas são representados por pontos pretos.

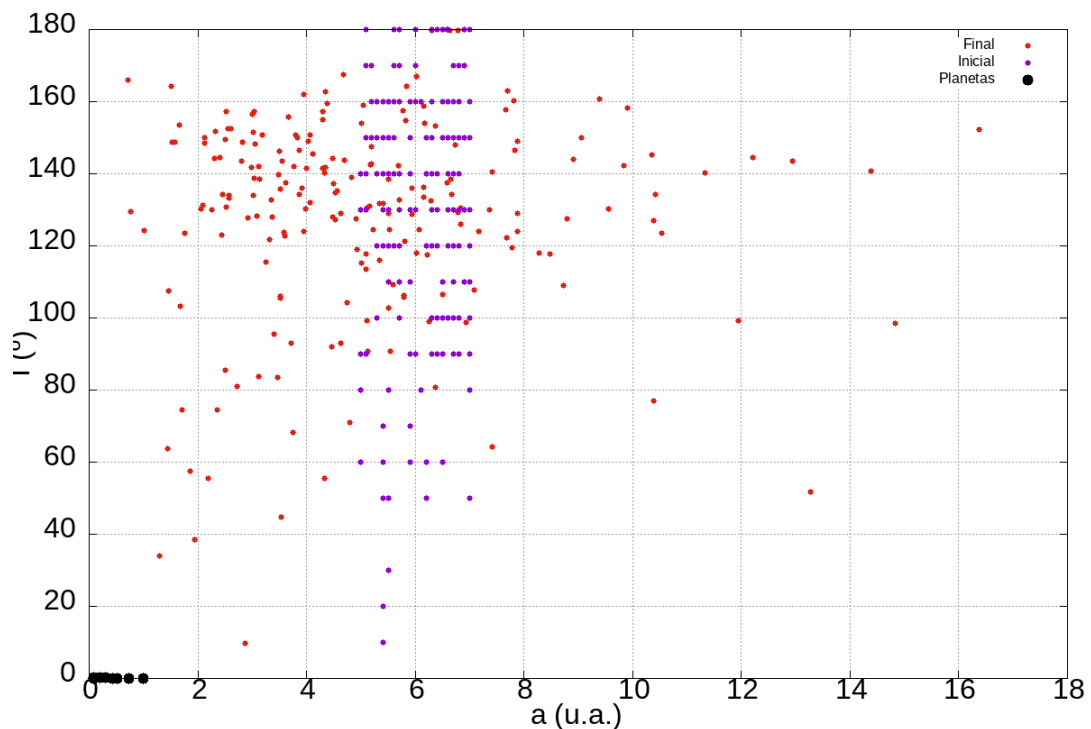
Observamos que alguns exocometas sobreviventes tendem a diminuir o valor do semi-eixo maior e atingem a região próxima aos planetas mais externos e todos os exocometas sobreviventes possuem  $a$  inferior a 15 u.a. As excentricidades de alguns exocometas também diminuem consideravelmente quando comparamos com os seus valores iniciais e assumem um  $e$  inferior a 0.7, condição que Dvorak et al. (2019) considera para captura. Em relação às inclinações, os exocometas mantêm  $I$  próximos ao valor inicial, mas quase não há exocometas sobreviventes com inclinações iguais a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Assim como no caso anterior, esse resultado é esperado para os exocometas que não colidiram, visto que a chance desses corpos com inclinações próximas às dos planetas colidirem são maiores.

Figura 31 – Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade dos excometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando a excentricidade dos planetas é igual a 0.001. Os pontos roxos e vermelhos representam, respectivamente, os elementos orbitais dos excometas no início e no final da integração e os pontos pretos representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

Figura 32 – Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos excometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando a excentricidade dos planetas é igual a 0.001. Os pontos roxos e vermelhos representam, respectivamente, os elementos orbitais dos excometas no início e no final da integração e os pontos pretos representam os planetas.

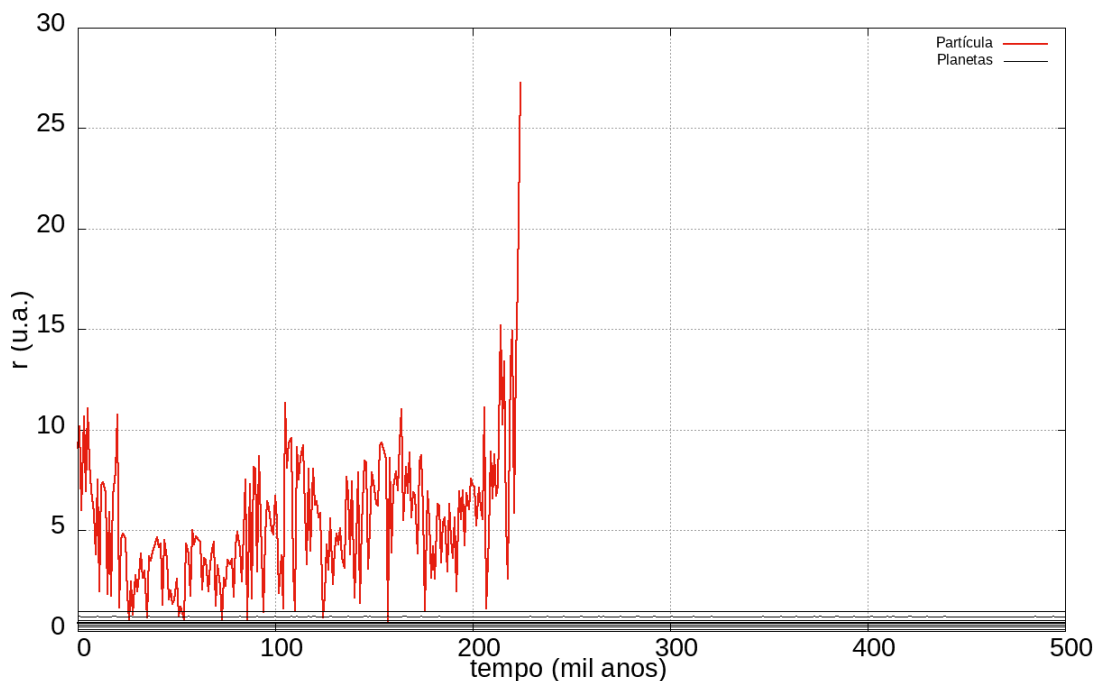


Fonte: Produzido pela autora.

Assim como feito no caso anterior, aqui mostramos a evolução de elementos e raio orbitais de exocometas que colidiram, foram ejetadas e sobreviveram até o final da simulação numérica.

A [Figura 33](#) mostra a evolução temporal do raio orbital de um exocometa ejetado e o semi-eixo maior, excentricidade e inclinação iniciais são, respectivamente, 5 u.a., 0.855 e  $90^\circ$ . A ejeção ocorreu em 229 mil anos de integração e observamos o comportamento do raio orbital tender para 30 u.a. que é a distância de ejeção e neste tempo, o exocometa evolui aproximadamente 22450 vezes em torno do sistema. Na [Figura 33](#), o exocometa é representada pela curva em vermelho e os planetas pelas curvas em preto.

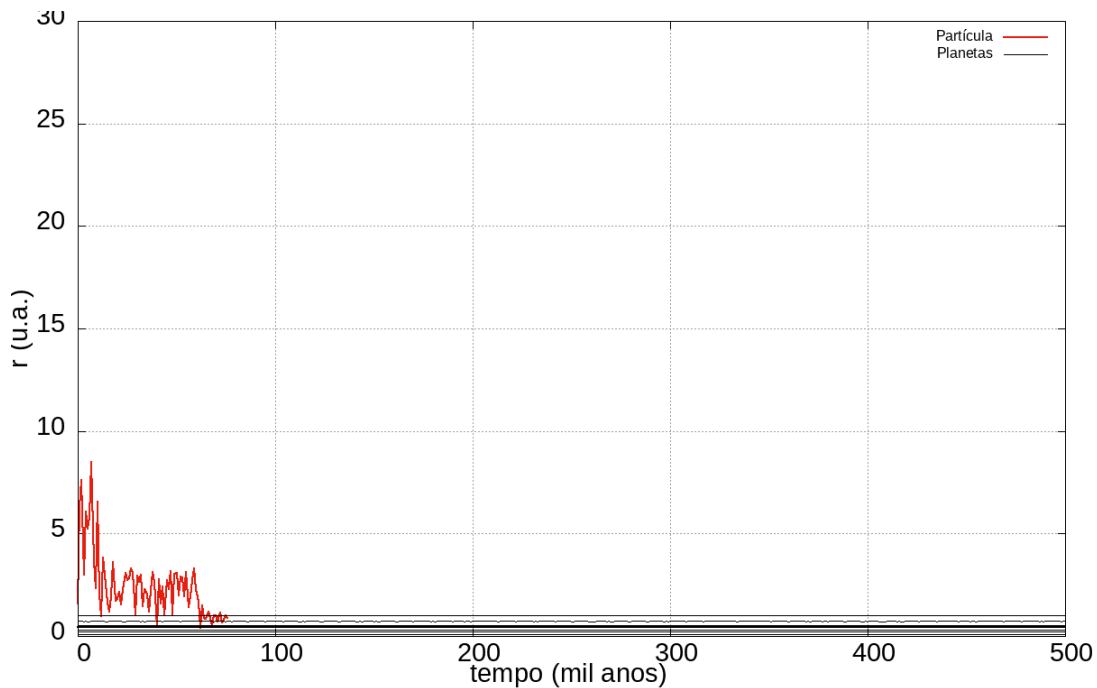
Figura 33 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometa ejetado durante a simulação numérica. A curva em vermelha ilustra a variação de  $r$  do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

A [Figura 34](#) mostra a evolução do raio orbital de um exocometa que colidiu com o planeta d e que têm os valores iniciais  $a = 5.1$  u.a.,  $e = 0.875$  e  $I = 90^\circ$ . Há oscilação do raio orbital do exocometa durante todo o tempo que ela sobrevive no sistema antes da colisão com o planeta h em aproximadamente 76700 anos de integração. Antes da colisão, a sua órbita também cruza as órbitas dos planetas mais externos.

Figura 34 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometa que colidiu com o planeta h durante a simulação numérica. A curva em vermelha ilustra a variação de  $r$  do exocometa, e as curvas em preto representam os planetas.

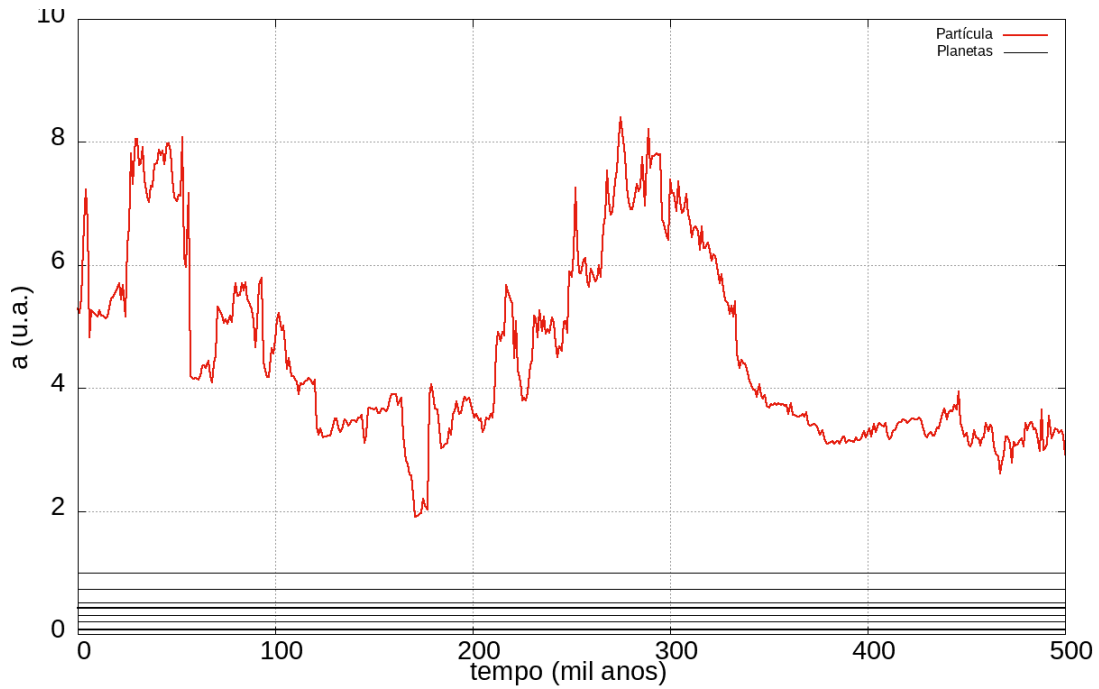


Fonte: Produzido pela autora.

A evolução temporal do semi-eixo maior, excentricidade e inclinação de um exocometa que sobreviveu durante toda a integração são mostrados, respectivamente, na [Figura 35](#), [Figura 36](#) e [Figura 37](#). As curvas em vermelho representam os elementos orbitais do exocometa e as curvas em preto representam os planetas. O exocometa analisado tem o semi-eixo maior, excentricidade e inclinação iniciais, respectivamente, 5.3 u.a., 0.920 e  $120^\circ$ . Observamos oscilações dos três elementos orbitais analisados. O semi-eixo maior atinge um valor máximo de aproximadamente 8 u.a. e mínimo de 2 u.a. A excentricidade oscila, mas sempre com valor superior a 0.8. A inclinação inicial é  $120^\circ$ , mas é capaz de atingir um valor próximo a  $180^\circ$ .

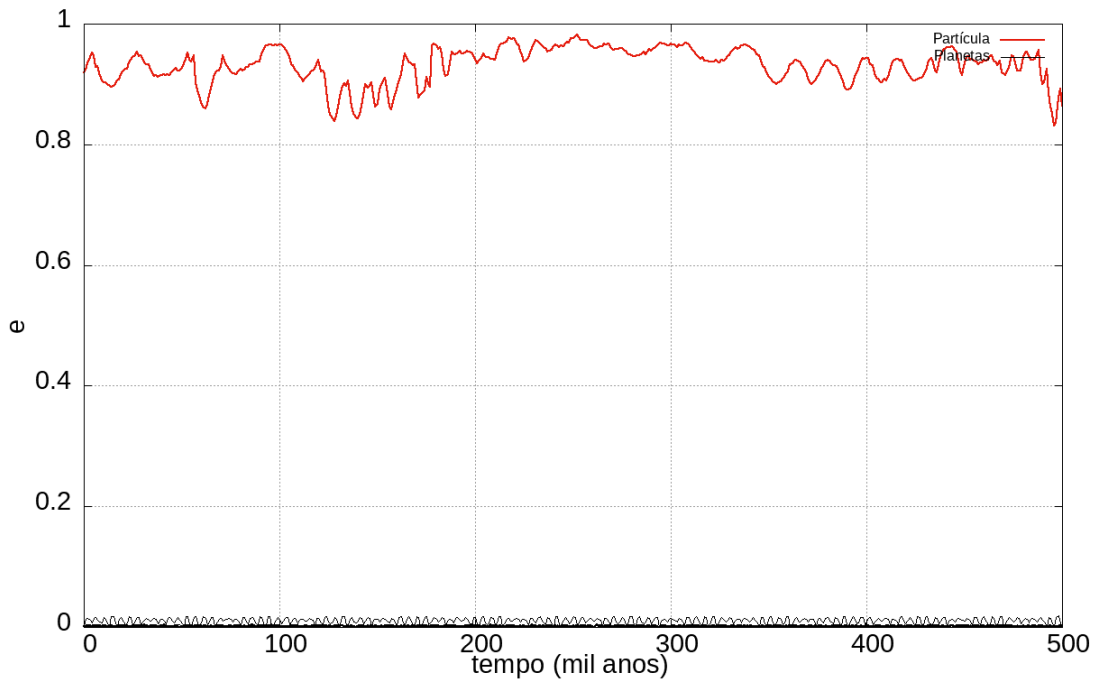
No gráfico da excentricidade ([Figura 36](#)), observamos variações das excentricidades dos planetas do sistema também e essa análise foi realizada na seção anterior.

Figura 35 – Evolução temporal do semi-eixo maior de um exocometas sobrevivente até o final da simulação numérica quando as excentricidades dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de  $a$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.



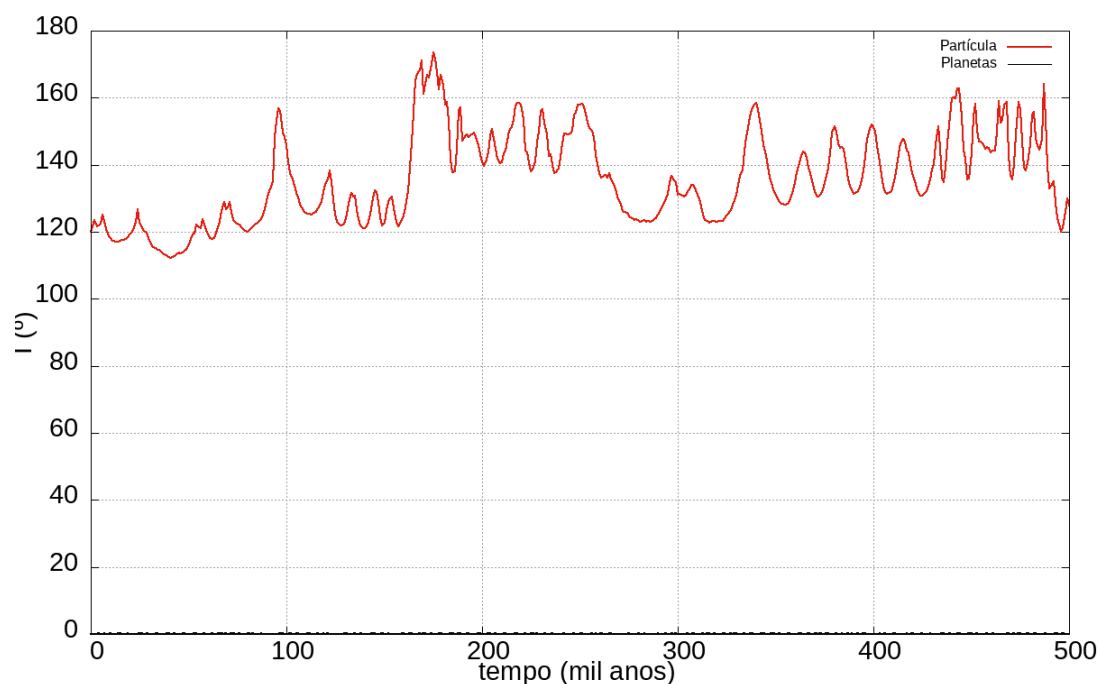
Fonte: Produzido pela autora.

Figura 36 – Evolução temporal da excentricidade de um exocometas sobrevivente até o final da simulação numérica quando as excentricidades dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de  $e$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

Figura 37 – Evolução temporal da inclinação de um exocometas sobrevivente até o final da simulação numérica quando a excentricidade dos planetas é 0.001. A curva em vermelho ilustra a variação de  $I$  do exocometas, e as curvas em preto representam os planetas.

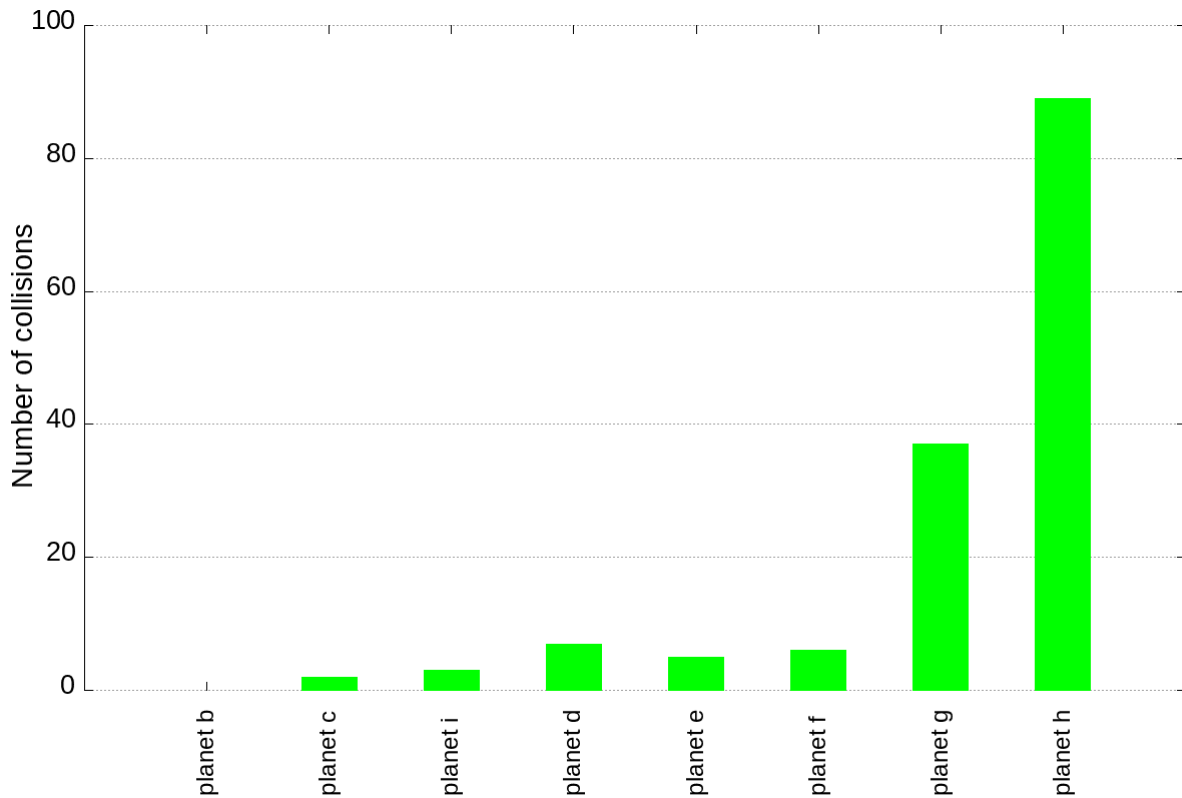


Fonte: Produzido pela autora.

## 2.6 EXCENTRICIDADE $10^{-2}$

No último caso do sistema K90 analisado, consideramos as excentricidades dos planetas iguais à  $e = 0.01$ . Esse é o terceiro extremo dos intervalos de excentricidades analisados por Gaslac (2021) para o qual o sistema Kepler-90 é estável. A [Figura 38](#) representa o histograma do número de exocometas que colidiram com os planetas do sistema. Há um total de 149 colisões e esse número equivale a 1.78% do total de exocometas analisados. No histograma observamos que a maior parte das colisões ocorrem com os planetas gigantes gasosos K90 g e K90 h e esse resultado é semelhante ao que acontece com os outros dois casos de excentricidades analisados.

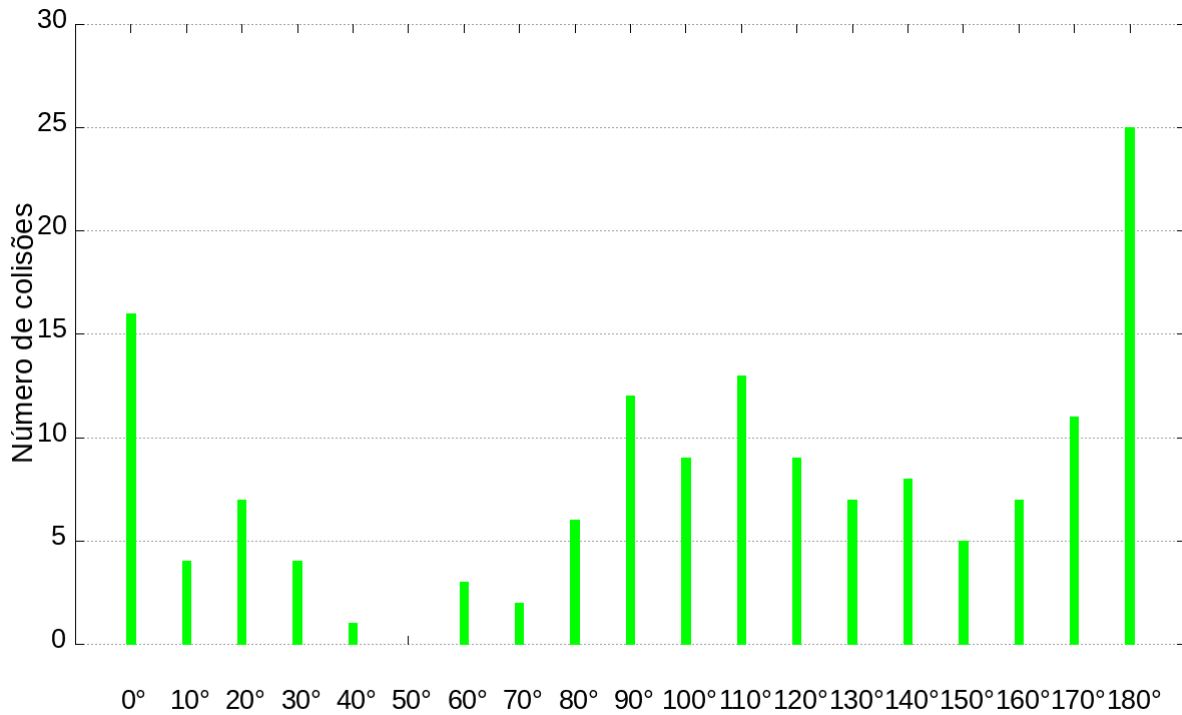
Figura 38 – Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 quando as excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.01.



Fonte: Produzido pela autora.

Analizamos também o número de exocometas que colidiram para cada valor inicial de inclinação desses corpo e esse resultado é mostrado na [Figura 39](#). Observamos que os exocometas inicialmente com  $I = 50^\circ$  não colidem e para todos os outros valores de  $I$  ocorrem colisões, sendo a maior parte delas para exocometas com inclinações iniciais iguais a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Esse resultado é semelhante aos casos analisados anteriormente e é esperado porque esses exocometas possuem os valores de  $I$  iniciais próximos aos dos planetas que são inferiores a  $1^\circ$ .

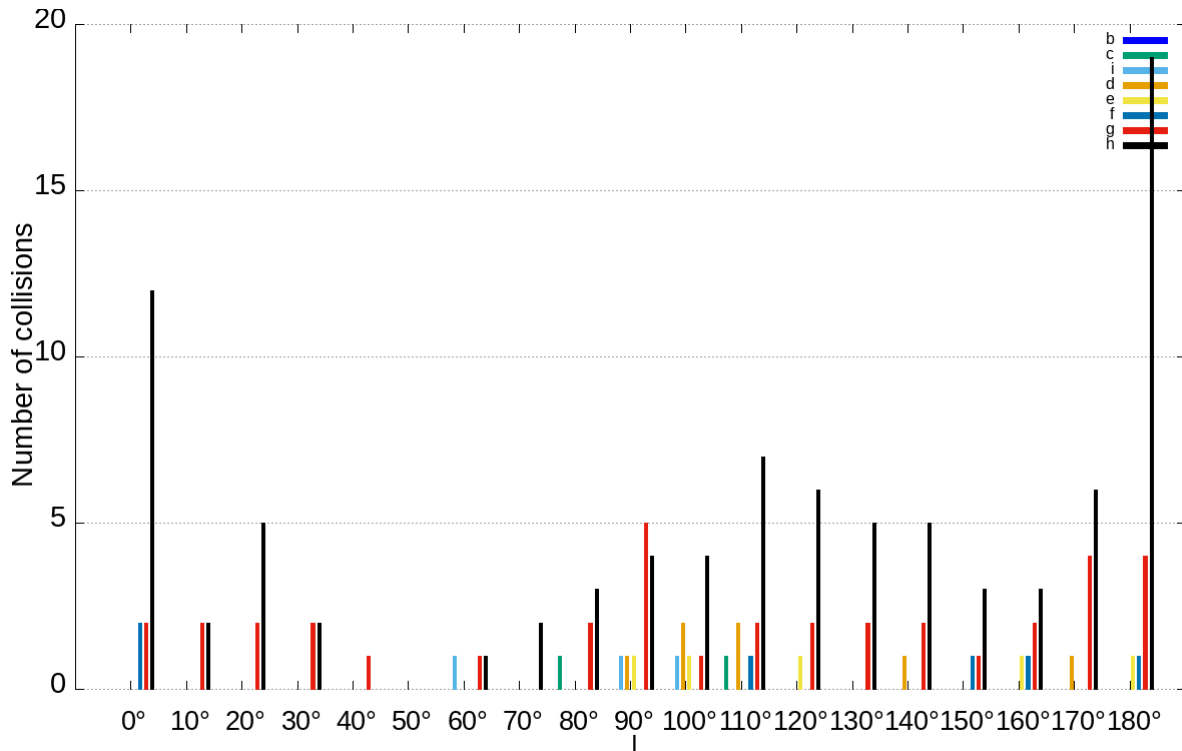
Figura 39 – Número de colisões de exocometas com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais. As excentricidades dos planetas são consideradas iguais a 0.01.



Fonte: Produzido pela autora.

O último histograma é representado pela [Figura 40](#) e mostra o número de exocometas que colidiram com cada planeta para cada inclinação inicial. Como indicado na legenda do gráfico, cada cor representa o número de colisões com cada planeta do sistema. Observamos que o planeta h, representado pela cor preta, é o que mais sofre colisões como foi indicado no primeiro histograma e a maioria das colisões que esse planeta sofre ocorreu por exocometas que inicialmente tinham inclinações iguais a 0° ou 180°. Esse resultado é semelhante aos dois casos anteriores analisados e também esperado porque esses exocometas possuem órbitas com inclinações próximas às dos planetas. Ainda o planeta K90 h é o que mais sofre colisões para todos os outros valores iniciais de inclinações.

Figura 40 – Número de colisões com cada planeta do sistema Kepler-90 dadas as inclinações iniciais dos exocometas. As cores das barras representam o número de colisões com cada planeta do sistema e a identificação é descrita na legenda do gráfico.

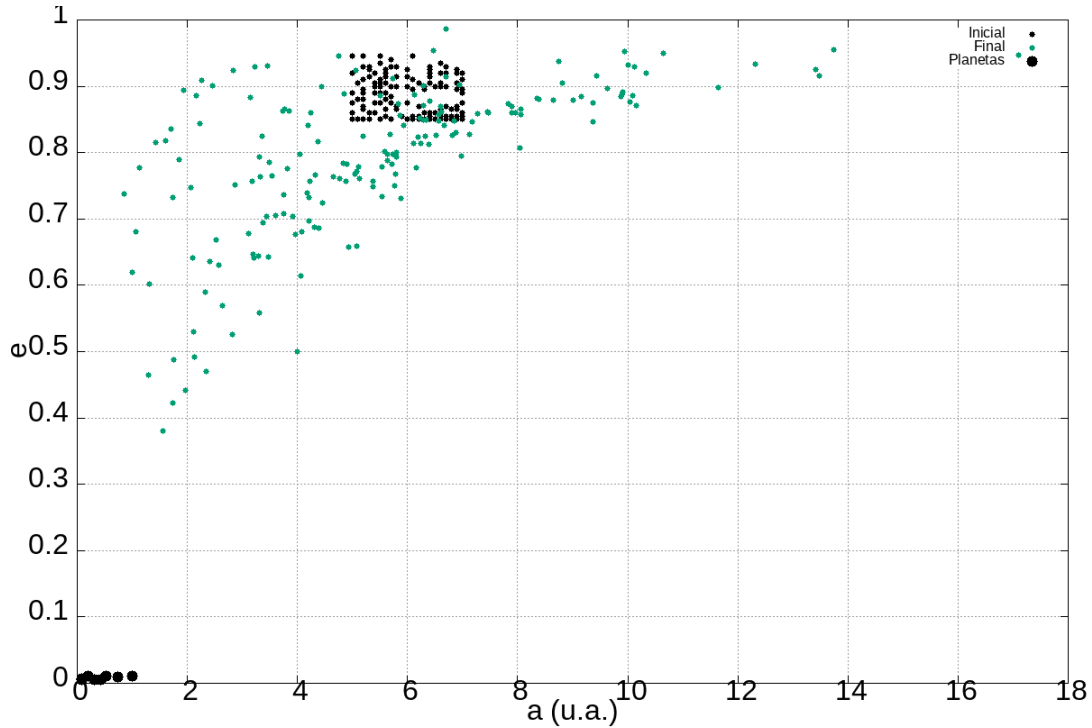


Fonte: Produzido pela autora.

Os elementos orbitais dos exocometas que sobreviveram ao longo dos 500 mil anos de integração numérica são representados nas [Figura 41](#) e [Figura 42](#) e mostram, respectivamente, a excentricidade e inclinação dos exocometas sobreviventes no sistema em função dos semi-eixo maior nos 500 mil anos de integração. Em ambos os gráficos são representados os elementos orbitais iniciais e finais dos exocometas sobreviventes, sendo em preto a representação inicial desses corpos e em verde a representação ao final da integração. Sobreviveram 177 exocometas e esse número equivale a, aproximadamente, 2.11% do total considerado.

Na [Figura 41](#) podemos observar que ocorrem variações das excentricidades dos exocometas sobreviventes e alguns desses corpos diminuem significativamente o valor da excentricidade e se aproximam de  $e = 0.4$ .

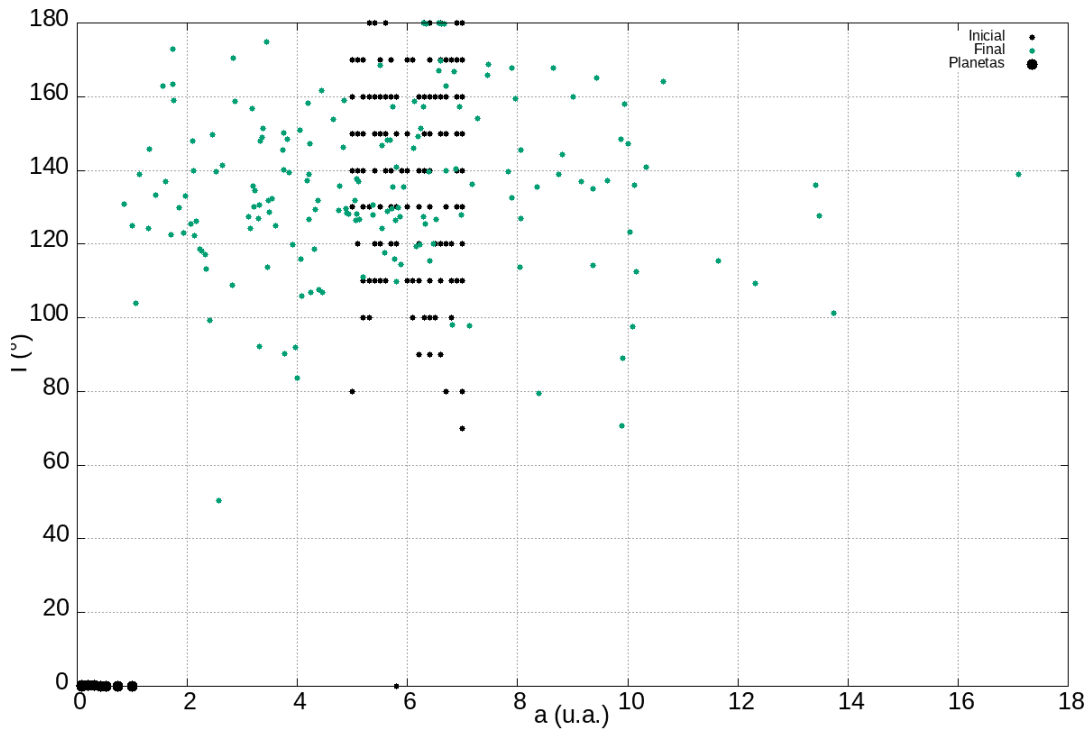
Figura 41 – Gráfico do semi-eixo maior versus excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são iguais a 0.01. Os pontos pretos e verdes representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos maiores representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

Na [Figura 42](#) observamos que os valores das inclinações não variam significativamente, sendo que ao final da integração numérica se mantêm próximos aos valores iniciais.

Figura 42 – Gráfico do semi-eixo maior versus inclinação dos exocometas que sobreviveram no sistema após 500 mil anos quando as excentricidades dos planetas são iguais a 0.01. Os pontos pretos e verdes representam, respectivamente, os elementos orbitais dos exocometas no início e no final da integração e os pontos pretos maiores representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

## 2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DO SISTEMA KEPLER-90

O sistema Kepler-90 foi escolhido para ser estudado neste trabalho por suas semelhanças com o nosso Sistema Solar. A estrela hospedeira tem massa igual a  $1.2M_{Sol}$  e abriga oito planetas em sua estrutura, sendo três planetas do tipo Terra e mais internos, três super-Terras na região intermediária e dois planetas gigantes gasosos mais externos. A principal diferença de K90 em relação ao Sistema Solar são as dimensões das órbitas planetárias. K90 é um sistema compacto e o planeta mais externo, h, possui semi-eixo maior aproximadamente igual a 1 u.a.

Analisamos a dinâmica de exocometas com as condições iniciais dos elementos orbitais apresentadas e consideramos três casos em que as diferenças se dão pelos valores de excentricidades dos planetas de K90. Analisamos para  $e = 0$ ,  $e = 0.001$  e  $e = 0.01$ , sendo o sistema estável para essas condições de excentricidade como demonstrado por Gaslac (2021).

O principal objetivo é analisar a dinâmica e colisões dos exocometas hipotéticos com os planetas do sistema e a possibilidade do transporte de água. Nos três casos analisados, observamos que ocorrem colisões sendo a maioria delas com os planetas gigantes gasosos e mais externos. Esse resultado é semelhante ao obtido por Dvorak et al. (2020) e sugere que os planetas mais massivos interferem na órbita das partículas e dificultam a entrada na região interna do sistema.

Quando a excentricidade é igual a zero (primeiro caso analisado), aproximadamente 2% dos exocometas colidem com os planetas; para o segundo caso, 1.32% dos exocometas colidem e no terceiro caso, 2.11% colidem. Para os três casos, a maioria das colisões ocorrem com o planeta gigante

gasoso e mais externo, Kepler-90 h. O planeta i sofre colisões apenas quando  $e = 0.01$ .

A inclinação dos exocometas que colidiram não possuem um valor preferencial, ou seja, ocorrem colisões para todos os valores iniciais de inclinação. Entretanto, observamos que para os três casos de excentricidades dos planetas analisados, para as inclinações iniciais dos exocometas  $I = 0^\circ$  e  $I = 180^\circ$ , o número de colisões é maior e esse resultado é esperado, como observado por Dvorak et al. (2020), porque esses exocometas possuem órbitas próximas ao plano orbital dos planetas.

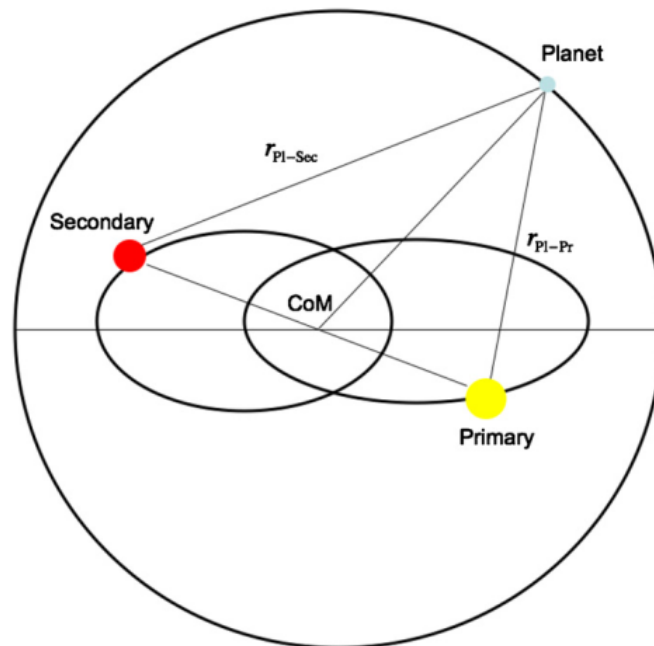
Além das oscilações que ocorrem nos elementos orbitais das partículas durante o tempo de integração, observamos também uma variação de  $e$  dos planetas, em especial o planeta gigante gasoso Kepler-90 g. Isso se deve devido a perturbação que o planeta h causa sobre g.

A maioria dos exocometas analisados são ejetadas do sistema Kepler-90 nos três casos considerados. As ejeções ocorrem quando os exocometas atingem um raio orbital igual a 30 u.a. e saem do domínio analisado sendo desconsiderados das integrações numéricas (e não necessariamente assumem uma órbita hiperbólica). Para os três valores de  $e$  dos planetas analisados, existem exocometas que sobrevivem com excentricidades inferior a 0.7 e esse valor, junto com o semi-eixo maior inferior a 10 u.a., caracterizam captura no trabalho de Dvorak et al. (2020).

### 3 ANÁLISE DE COLISÕES DE EXOCOMETAS NOS SISTEMAS BINÁRIOS KEPLER-35 E KEPLER-38

Sistemas estelares binários são compostos por duas estrelas que estão interligadas gravitacionalmente e que orbitam um centro de massa em comum (Mello, 2014). Estima-se que existem mais de 2100 estrelas binárias (Orosz et al., 2012). De acordo com Batten et al. (1989) e Welsh et al. (2012), a maioria das estrelas de nossa galáxia, inclusive estrelas do tipo Sol, se encontram em sistemas binários. A [Figura 43](#) mostra o esquema de um sistema binário com um planeta que possui órbita do tipo P, ou seja, as duas estrelas e o planeta orbitam o centro de massa do sistema. Na figura, o centro de massa é representado pelo ponto CoM e a distância do planeta às estrelas primária e secundária são, respectivamente,  $r_{pl-Pr}$  e  $r_{pl-Sec}$ .

Figura 43 – Esquema de um sistema binário do tipo P. A estrela primária, secundária e o planeta orbitam em torno do centro de massa do sistema representado pelo ponto CoM.



Fonte: Haghighipour e Kaltenegger (2013).

O planeta Kepler-16 b foi o primeiro detectado em trânsito em um sistema binário pela sonda espacial Kepler (Orosz et al., 2012). De acordo com os autores, os planetas em sistemas binários podem ser detectados através de dois métodos. O método de trânsito ocorre quando o planeta passa na frente das estrelas e altera a quantidade de luz observada. O segundo método ocorre devido à perturbação gravitacional de um planeta do sistema sobre as estrelas, fenômeno que resulta na variação dos tempos dos eclipses observados e a não periodicidade desses eventos que também ocorre por causa do planeta estar orbitando estrelas que estão em movimento em torno do centro de massa.

Estudos mostram que existem indícios de discos protoplanetários em sistemas circumbinários nos quais as estrelas não estão muito afastadas uma da outra, o que possibilita a formação de planetas. Ainda, de acordo com Haghighipour e Kaltenegger (2013), a energia proveniente de uma segunda

estrela e os parâmetros orbitais do par binário pode fazer com que a ZH desses sistemas seja mais extensa como é discutido na Seção 3.2. As características dos sistemas descritas levantam questões e o interesse no estudo de sistemas binários.

Nesta etapa do trabalho, são estudadas a dinâmica de partículas nos sistemas binários Kepler-35 (K35) e Kepler-38 (K38), ambos detectados pela missão Kepler que possuem um planeta gigante confirmado. Um estudo recente (Barbosa et al., 2021) mostrou que há possibilidade de formação de um planeta do tipo Terra na zona habitável de cada um desses sistemas. Assim, o principal objetivo deste capítulo é analisar a colisão de exocometas hipotéticos com os planetas dos sistemas binários K35 e K38.

Este capítulo é dividido em cinco seções. Na primeira seção foi feito um resumo do trabalho intitulado "Earth-size planet formation in the habitable zone of circumbinary stars" (Barbosa et al., 2020), no qual é mostrada a possibilidade de formação de planetas do tipo Terra nos sistemas K35 e K38 e o motivo do interesse desses sistemas no trabalho. Na Seção 2.2 são descritas as características das zonas habitáveis de sistemas binários e o método analítico utilizado para calcular essas regiões. Em 3.3 são descritas as condições iniciais dos exocometas que foram considerados em ambos os sistemas. Nas Seções "Kepler-35" e "Kepler-38" são descritos os sistemas e os resultados obtidos das simulações numéricas para K35 e K38, respectivamente. Por fim, na Seção 3.6 apresentamos os principais resultados sobre a análise dos sistemas.

### 3.1 FORMAÇÃO DE PLANETAS TERRESTRES NOS SISTEMAS KEPLER-35 E KEPLER-38

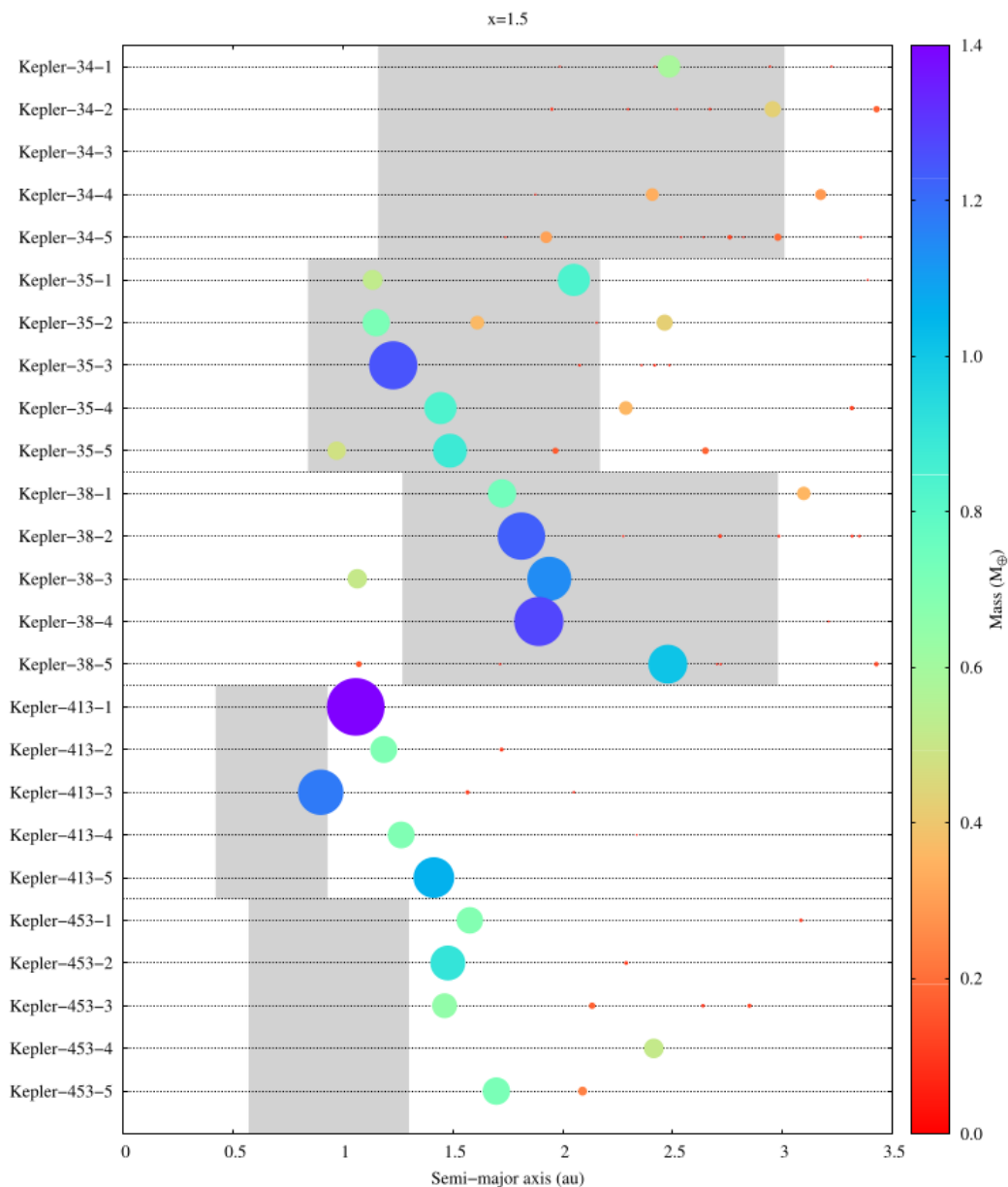
No trabalho realizado por Barbosa et al. (2020), os autores analisam a estabilidade da zona habitável (ZH) de sistemas circumbinários (CB) e a possibilidade de formação de planetas terrestres nessas regiões. Para a escolha dos sistemas, foi feita uma curadoria que selecionou os sistemas que possuem dados necessários disponíveis na literatura para o cálculo da ZH.

Os sistemas circumbinários são compostos por duas estrelas que orbitam em torno de um centro de massa em comum e não muito distantes uma da outra. De acordo com Barbosa et al. (2020), pelo menos metade das estrelas do tipo Sol estão em sistemas múltiplos, a ZH desses sistemas é maior do que a de sistemas de estrelas únicas e há evidências da existência de discos protoplanetários em sistemas CB (Jensen e Mathieu, 1997). Os planetas confirmados em sistemas circumbinários são planetas gigantes gasosos, assim, apesar de até então não terem sido detectados planetas do tipo Terra, a existência de discos protoplanetários permite a formação desses corpos. Esses são fatores que motivam o interesse no estudo de sistemas múltiplos.

Os sistemas selecionados por Barbosa et al. (2020) foram Kepler-34, Kepler-35, Kepler-38, Kepler-413 e Kepler-453. Para a análise da estabilidade, os autores consideraram partículas com órbitas circulares e coplanares ao plano orbital do par binário na ZH de cada sistema estudado. Foi demonstrado que os sistemas K35 e K38 possuem essa região estável, sendo que algumas partículas da região interna foram ejetadas em K35 devido à perturbação do planeta confirmado no sistema que é próxima a borda interna da ZH. Para K38, nenhuma partícula foi ejetada durante a análise e é o sistema mais estável.

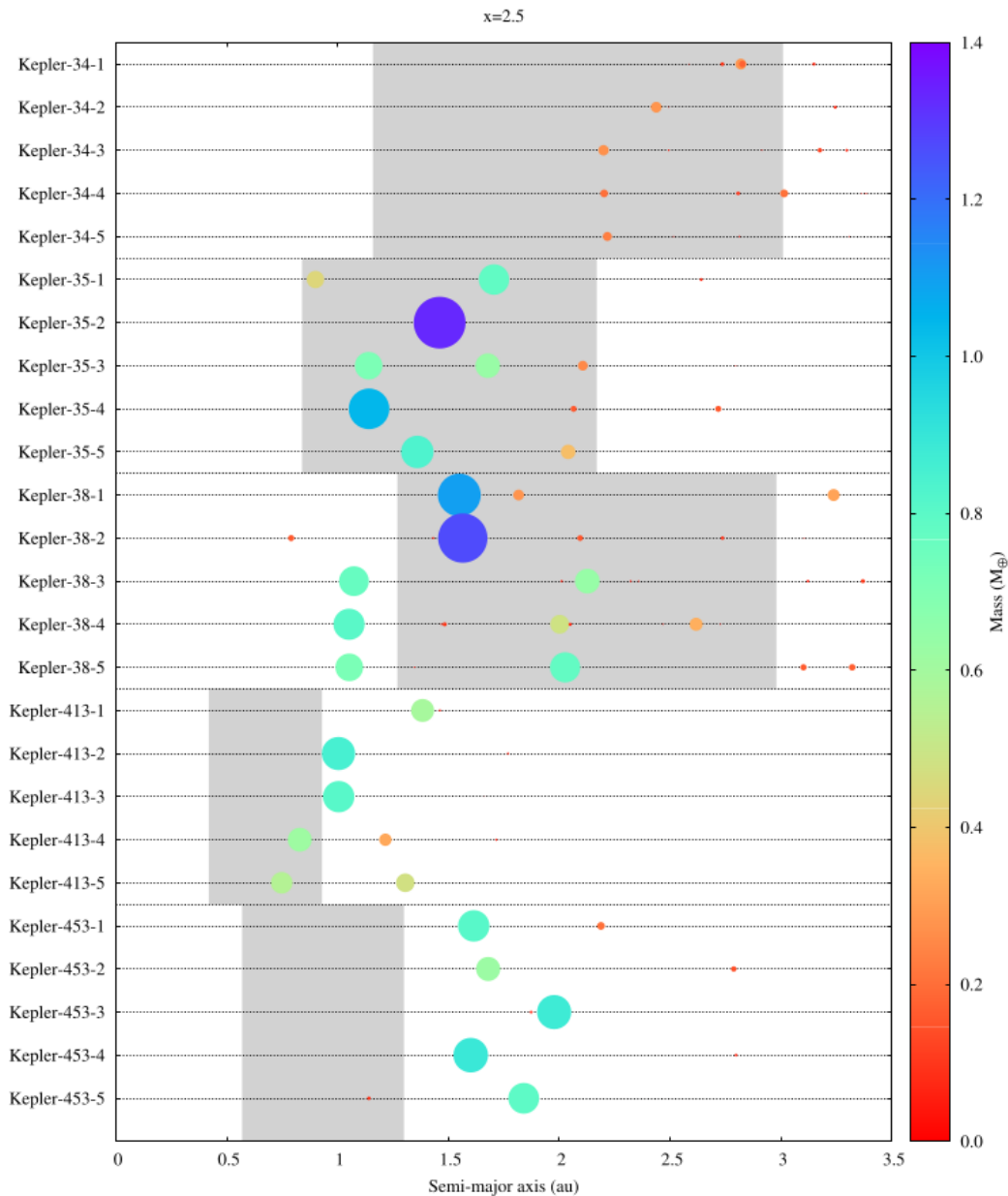
Para os sistemas que apresentaram ZH estável, Barbosa et al. (2020) analisaram a possibilidade de formação de planeta do tipo Terra. Os autores consideraram um disco protoplanetário com densidade que depende do raio orbital e dado por  $\sum r^{-x}$  para  $x = 1.5$  e  $x = 2.5$ , sendo o disco mais denso na região interna e externa para os respectivos valores de  $x$ . As formações de planetas do tipo Terra foram consideradas quando o corpos formados através de colisões inelásticas possuem massas entre  $0.8$  e  $1.2M_T$ . Para os sistemas Kepler-35 e Kepler-38 foram formados planetas do tipo Terra na ZH nas simulações numéricas realizadas e para os valores de  $x$  considerados. As [Figura 44](#) e [Figura 45](#) mostram os planetas formados nas simulações numéricas para  $x = 1.5$  e  $x = 2.5$ , respectivamente. Nas figuras, a região sombreada indica a ZH e a escala de cores na lateral direita indica a massa do planeta formado.

Figura 44 – Planetas formados nos sistemas CB para o disco planetesimal com  $x = 1.5$ . A região sombreada indica a ZH e a escala de cor a direita indica a massa dos planetas formados.



Fonte: Barbosa et al. (2020).

Figura 45 – Planetas formados nos sistemas CB para o disco planetesimal com  $x = 2.5$ . A região sombreada indica a ZH e a escala de cor a direita indica a massa dos planetas formados.



Fonte: Barbosa et al. (2020).

A formação de planetas terrestres na ZH e estabilidade dessa região em K35 e K38 foram os motivos da escolha desses sistemas para o estudo da dinâmica de exocometas. Em nossa análise, consideramos as estrelas binárias e os planetas confirmados com parâmetros físicos e orbitais descritos na literatura e, também, o planeta do tipo Terra na ZH de cada sistema formado no trabalho de Barbosa et al. (2020).

Na Seção 3.2 é feito um breve resumo sobre zona habitável e na Seção 3.3 são descritas as condições iniciais dos exocometas considerados nos sistemas Kepler-35 e Kepler-38 e os parâmetros físicos e orbitais dos planetas confirmados, dos planetas terrestres formados e das estrelas de cada sistema. Esses são os parâmetros utilizados nas simulações numéricas de cada sistema.

### 3.2 ZONA HABITÁVEL DE SISTEMAS BINÁRIOS

De acordo com Haghhighipour e Kaltenegger (2013), a zona habitável (ZH) é definida como uma região em torno de uma estrela hospedeira ou de um sistema de estrelas na qual um planeta do tipo Terra que possui uma atmosfera composta por  $N_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  é capaz de manter água no estado líquido em sua superfície.

Nesta seção descrevemos os cálculos e considerações realizados por Haghhighipour e Kaltenegger (2013) para o cálculo da ZH de um sistema binário, sendo que o modelo adotado pelos autores é o mesmo de Kopparapu et al. (2013), no qual são definidas as zonas habitáveis estreita e empírica. Os limites da região estreita são definidos pelo efeito estufa, respectivamente, descontrolado para o limite interno e máximo para o limite externo. Os limites empíricos são definidos por comparação com o fluxo de energia recebido por Vênus e Marte no Sistema Solar, nas regiões onde esses planetas não têm água líquida em suas superfícies.

A habitabilidade de um planeta depende de ele ter condições de abrigar vida da forma que a conhecemos, deste modo, é necessário suportar água no estado líquido. Esse fato é dependente da quantidade de energia recebida pelo planeta da estrela que, segundo Haghhighipour e Kaltenegger (2013), a atmosfera do planeta converte essa insolação em temperatura da superfície do planeta. A quantidade de energia é dependente do SED da estrela, que é a distribuição de energia espectral da estrela.

Para um sistema binário, o SED das estrelas podem ser diferentes e a presença de uma estrela secundária pode alterar os limites da ZH, pois a resposta da atmosfera do planeta é diferente para diferentes tipos espectrais. Além do tipo de estrela, de acordo com Haghhighipour e Kaltenegger (2013), os elementos orbitais podem causar variações instantâneas na ZH, ou seja, o movimento orbital das estrelas em torno do centro de massa dos sistema causa variações nas ZH. Entretanto, a variação da ZH não necessariamente implica em mudança na condição de habitabilidade porque a atmosfera do planeta pode manter a temperatura que permite a existência de água no estado líquido. Ainda, as altas excentricidades da órbita de um par binário e a consequente possibilidade de mudanças de distâncias entre estrelas e planetas pode alterar o fluxo de energia recebido pelo planeta.

Para a obtenção analítica da ZH de sistemas binários, Haghhighipour e Kaltenegger (2013) definem essa região como "a região onde o fluxo total recebido por um planeta do tipo Terra no topo da atmosfera é igual ao recebido da Terra pelo Sol". A expressão para o cálculo da ZH obtida pelos autores é dada pela Equação [1](#).

$$W_{pr}(f, T_{pr}) \frac{L_{pr}(T_{pr})}{r_{pl-pr}^2} + W_{sec}(f, T_{sec}) \frac{L_{sec}(T_{sec})}{r_{pl-sec}^2} = \frac{L_{Sun}}{l_{x-Sun}^2} \quad (1)$$

Os índices *pr* e *sec* são referentes, respectivamente, às estrelas primárias e secundárias. *T* é a temperatura efetiva; *f* a fração de nuvem na atmosfera; *W* é o peso espectral e *r* é a distância entre o planeta e as estrelas do sistema.

Haghhighipour e Kaltenegger (2013) concluem que a zona habitável de sistemas binários são dependente do tipo da estrela, sendo que a quantidade de energia fornecida depende do tipo e também dos elementos orbitais do sistema binário. Esses fatores podem alterar instantaneamente a ZH, mas

não necessariamente a habitabilidade, visto que a atmosfera do planeta pode manter a temperatura necessária para a existência de água líquida.

É possível obter as zonas habitáveis estreita e nominal graficamente por meio da equação e estudo analítico de Haghhighipour e Kaltenegger (2013) através do site interativo <http://astro.twan.info/hz/> declarando os parâmetros físicos e orbitais do sistema binário. Para os sistemas K35 e K38 descritos, respectivamente, nas Seções 3.4 e 3.5 são tabelados os limites das zonas habitáveis e os gráficos dos sistemas com essas regiões ressaltadas que foram obtidos através do site.

### 3.3 CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais dos exocometas apresentadas nessa seção são as mesmas para os dois sistemas binários. De modo similar à análise realizada sobre o sistema K90, para os sistemas binários consideramos o movimento orbital dos exocometas são afetados pela interação gravitacional com os planetas e as estrelas sendo esses os únicos perturbadores. Na análise, os exocometas possuem massas desprezíveis e não interagem entre si.

Na Tabela 3 são apresentados os valores iniciais, finais e as variações dos semi-eixo maior, excentricidade e inclinação dos exocometas considerados nos sistemas K35 e K38 sendo formada uma grade desses corpos. Para cada par de excentricidade e semi-eixo maior, variamos a inclinação de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Os valores de  $I$  são baseados nos cometas da nuvem de Oort no Sistema Solar que são altamente excêntricos e não possuem uma direção preferencial. Há um total de 4275 corpos considerados nos sistemas binários. O limite inferior do semi-eixo maior escolhido é proporcional à distância entre o último planeta do sistema 47 UMa e o valor inicial de  $a$  das partículas no estudo de Dvorak et al. (2020). O argumento do pericentro ( $\omega$ ), longitude do nodo ascendente ( $\Omega$ ) e anomalia média ( $M$ ) são inicialmente iguais à zero para todos os exocometas.

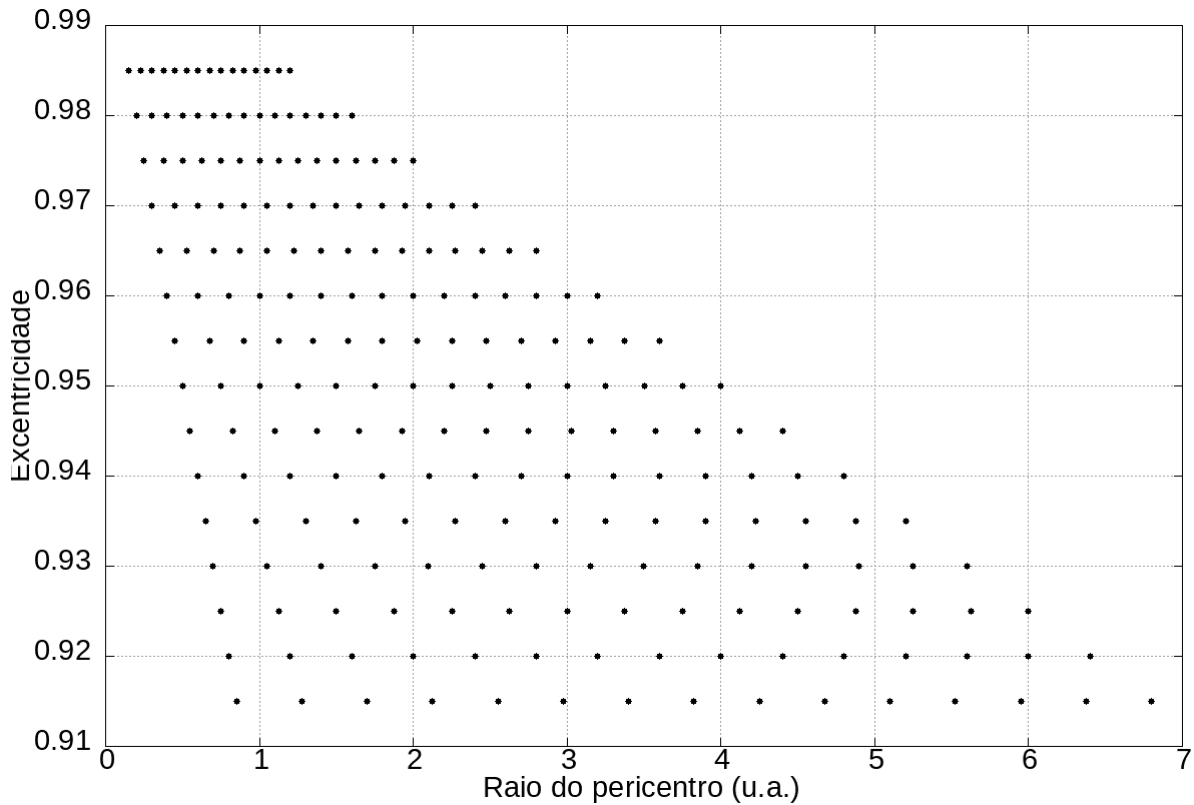
Tabela 3 – Condições iniciais

Parâmetros	Valor inicial	Valor final	Variação
Semi-eixo maior (u.a.)	10	80	5
Excentricidade	0.915	0.985	0.005
Inclinação ( $^\circ$ )	0	180	10

Fonte: Produzido pela autora.

As altas excentricidades permitem que as órbitas dos exocometas atinjam a região mais interna dos sistemas. Para exocometas inicialmente com  $a = 10$  u.a., os raios do pericentro ( $q$ ) são 0.85 u.a. e 0.15 u.a., respectivamente, para o menor e maior valores de excentricidade. Os exocometas mais externos, com  $a = 80$  u.a., têm o raio do pericentro para a menor e maior excentricidades iguais a, respectivamente, 6.8 u.a e 1.2 u.a. A Figura 46 é um gráfico que mostra todos os valores do raio do pericentro e excentricidade dos exocometas considerados nos sistemas binários e são representados por pontos pretos. Como as inclinações não são consideradas no gráfico, cada ponto representa 19 exocometas que possuem os mesmos  $q$  e  $e$ , mas inclinações variando entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

Figura 46 – Raio do pericentro e excentricidade dos exocometas considerados nos sistemas binários Kepler-35 e Kepler-38.



Fonte: Produzido pela autora.

As simulações numéricas foram realizadas em duas partes. Na primeira, consideramos o movimento de todas os exocometas nos sistemas durante 500 mil anos de integração e assumimos que foram ejetados quando atingiram um raio orbital de 250 u.a. Na segunda parte, os exocometas sobreviventes na primeira e com semi-eixo maior final inferior a 10 u.a. foram analisados por mais 500 mil anos e as condições iniciais nesse caso são os valores finais dos exocometas na primeira etapa.

Para a realização das simulações nos sistemas Kepler-35 e Kepler-38 foi utilizado a versão alterada do programa Mercury para sistemas binários, MINOR-MERCURY (Amarante, Winter and Sfair, 2019). As condições iniciais dos exocometas hipotéticos descritos são utilizadas nos dois sistemas binários estudados Kepler-35 e Kepler-38.

### 3.4 KEPLER-35

Kepler-35 é um sistema binário que possui estrelas com massas próximas a do Sol em nosso Sistema Solar. A Tabela 4 contém os valores das massas das estrelas comparadas à massa do Sol, o semi-eixo maior e excentricidade do par binário.

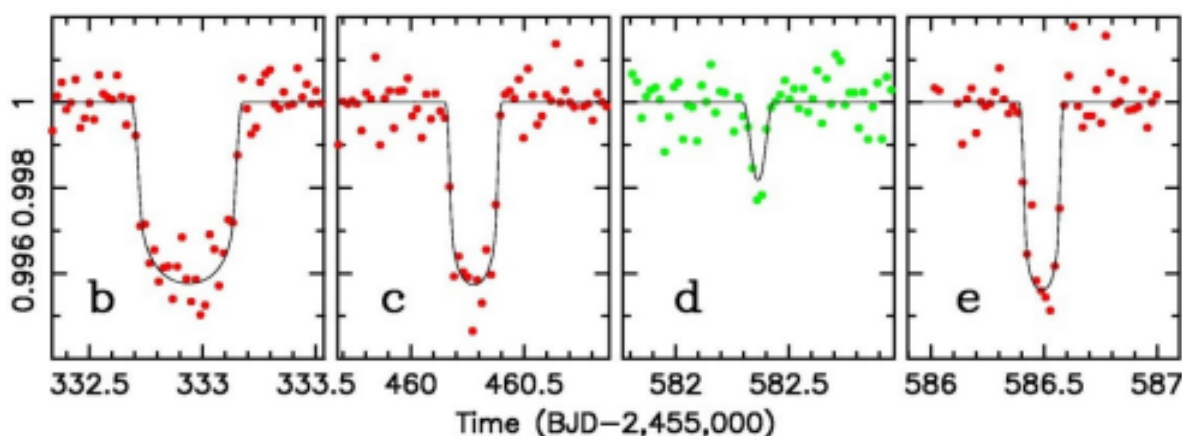
Tabela 4 – Parâmetros das estrelas do sistema K35

$M_A (M_{Sol})$	$M_B (M_{Sol})$	$a_{bin}$ u.a.	$e_{bin}$
0.890	0.810	0.176	0.142

Fonte: Barbosa et al. (2020)

De acordo com Welsh et al. (2012), o sistema possui um planeta gigante gasoso confirmado, o Kepler-35 b, que foi detectado através das variações do tempo de trânsito das estrelas. A [Figura 47](#) mostra os trânsitos da estrela primária, representado pela cor vermelha, e da estrela secundária, representada por verde. Segundo os autores, a variação nos tempos indicam a presença de um planeta no sistema.

Figura 47 – Trânsito das estrelas do sistema K35. Os gráficos b, c e e indicam trânsitos da estrela primária e o gráfico d indica trânsito da estrela secundária. O planeta do sistema é identificado através da não periodicidade em que os trânsitos acontecem.



Fonte: Welsh et al. (2012)

O sistema K35 é circumbinário e Kepler-35 b possui órbita do tipo P, isso significa que as estrelas hospedeiras estão próximas uma da outra e o planeta orbita as duas estrelas do sistema. Segundo Welsh et al. (2012), o planeta possui densidade igual  $0.41 \text{ g/cm}^3$  o que confirma a sua característica de gigante gasoso, embora de baixa densidade. Na [Tabela 5](#) são mostrados os valores do semi-eixo maior, excentricidade, inclinação e massa em termos da massa de Júpiter ( $M_J$ ) do planeta confirmado e também do planeta tipo Terra que tem possibilidade de ser formado no sistema como mostrado anteriormente no trabalho de Barbosa et al. (2020).

Tabela 5 – Parâmetros dos planetas no sistema K35.

Parâmetros	Planeta confirmado	Planeta formado
semi-eixo maior (u.a.)	0.603	1.226
excentricidade	0.042	0.121
inclinação ( $^\circ$ )	0.336	2.589
massa ( $M_J$ )	0.127	$3.491 \times 10^{-3}$

Fonte: Barbosa et al. (2020)

Kepler-35 b possui uma órbita mais interna do que a órbita do planeta terrestre que está localizado na ZH do sistema. O planeta do tipo Terra formado na ZH possui  $1.109 M_T$ , sendo  $M_T$  a representação da massa da Terra, e consideramos inicialmente os valores de  $\omega$ ,  $\Omega$  e  $M$  iguais a zero para os dois planetas.

Na [Tabela 6](#) estão representados os limites da zona habitável do sistema em unidades astronômicas, considerando o modelo dos autores Kaltenegger e Haghighipour (2013). São mostrados os limites

estreito, caracterizado como os limites máximos de efeito estufa, e o limite largo classificado como o limite de fluxos recebidos por Marte e Vênus no Sistema Solar.

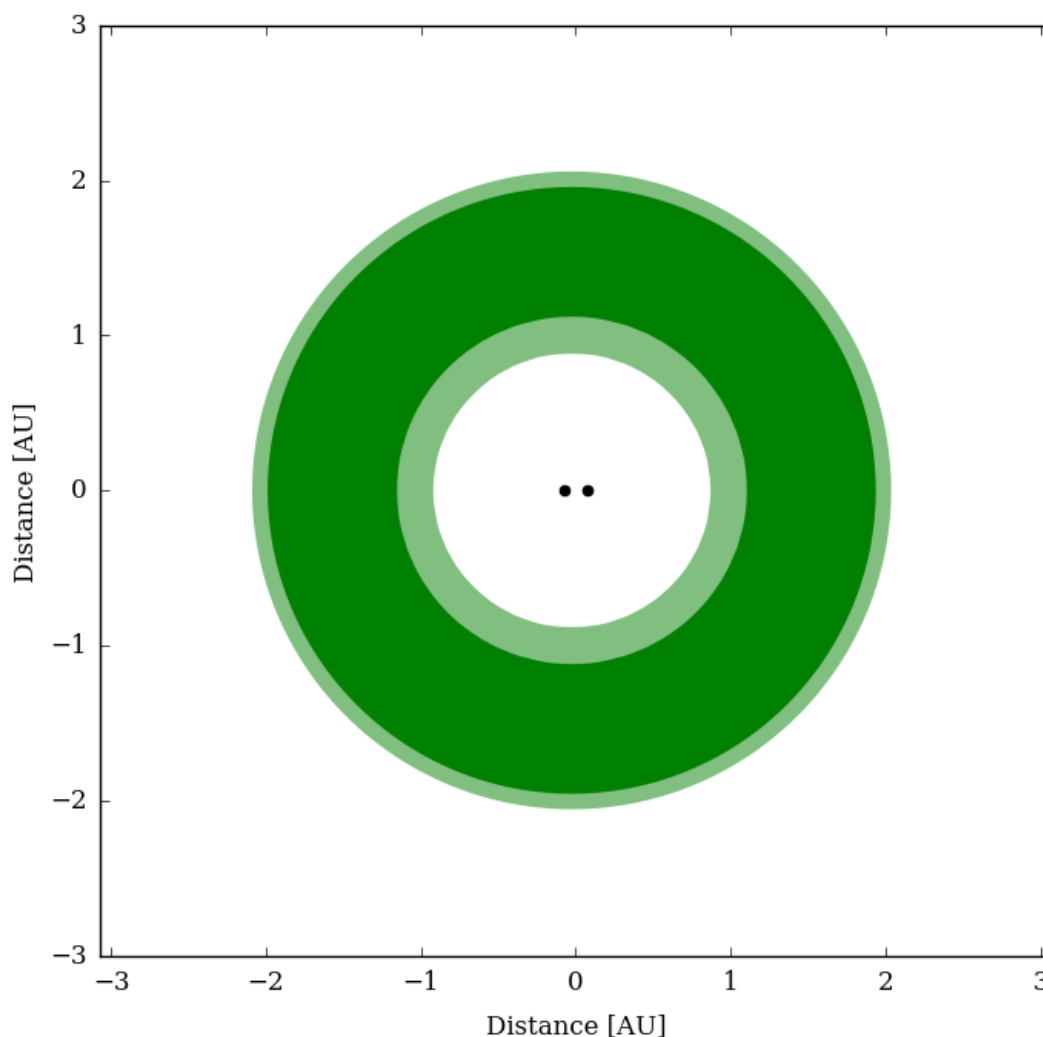
Tabela 6 – Zona Habitável: K35

	Interno	Externo
Estreito (u.a.)	1.10	1.98
Largo (u.a.)	0.89	2.09

Fonte: Gerson et al. (2020)

Os limites das zonas habitáveis estreita e larga são representados graficamente através da [Figura 48](#). Em verde escuro temos o limite da ZH estreita (ou conservativa) e em verde claro temos os limites da ZH larga (ou extensa). Essa imagem foi obtida através do site interativo <http://astro.twam.info/hz/>.

Figura 48 – Limites da zona habitável do sistema Kepler-35. A região da ZH conservativa é representada por verde escuro, e ZH extensa é representada por verde claro. Os pontos pretos representam as estrelas do sistema.



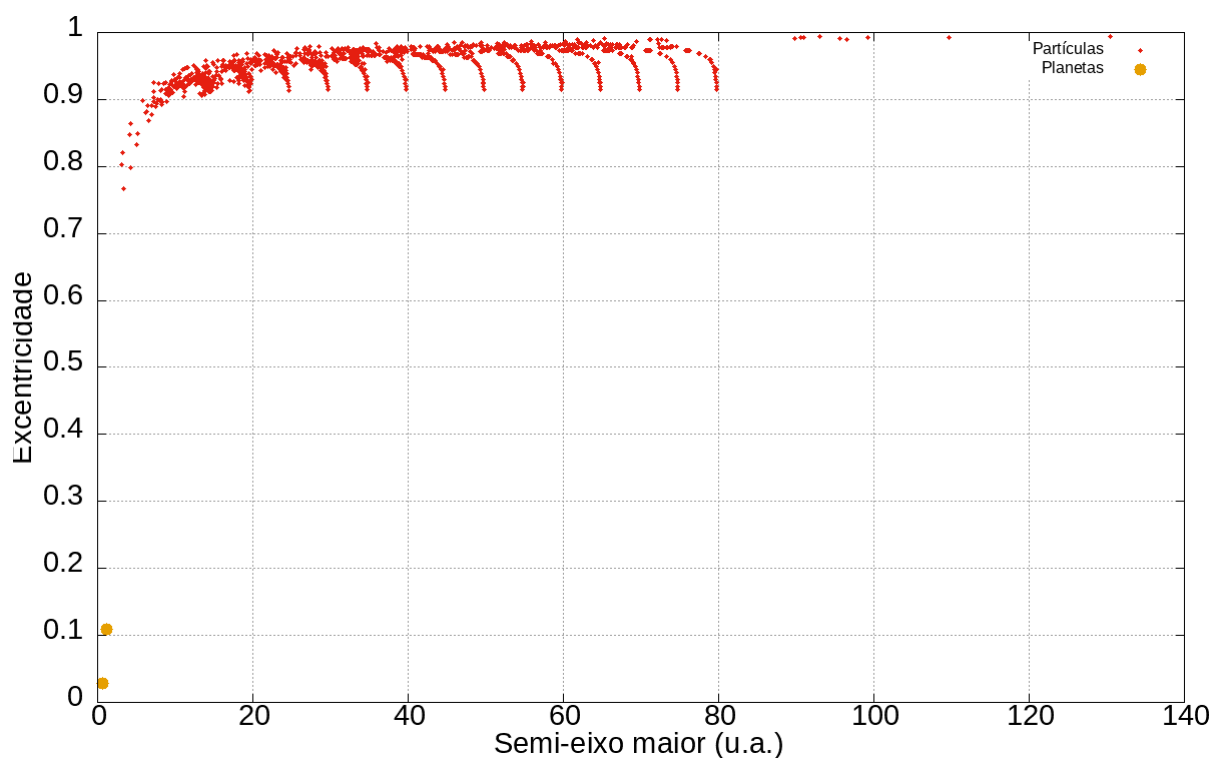
Fonte: Produzido pela autora.

Através do gráfico representado pela [Figura 48](#) conseguimos verificar que o planeta do tipo Terra formado está dentro dos limites da ZH e o planeta gigante confirmado está na região interna à zona habitável.

Para a análise numérica da dinâmica dos exocometas, as simulações foram realizadas em duas partes, sendo que na primeira, todas as partículas descritas nas condições iniciais são colocadas no sistema sob influência gravitacional dos planetas e são integradas durante um tempo de 500 mil anos. Nessa primeira etapa, não ocorreram colisões com os planetas e 20 partículas (que equivale aproximadamente 0.5% do total analisado) colidiram com as estrelas. 14.27% do total foram ejetadas.

O gráfico representado através da [Figura 49](#) caracteriza o semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema após o tempo considerado. Os planetas são representados pelos pontos amarelos e os exocometas pelos pontos vermelhos. A maior parte dos exocometas sobreviventes têm semi-eixo maior inferior a 80 u.a. e as excentricidades não diminuem consideravelmente e permanecem próximas aos valores iniciais.

Figura 49 – Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas sobreviventes na primeira etapa da análise de K35, após 500 mil anos de integração. As partículas são representadas por pontos vermelhos e os planetas são representados pelos pontos amarelos.

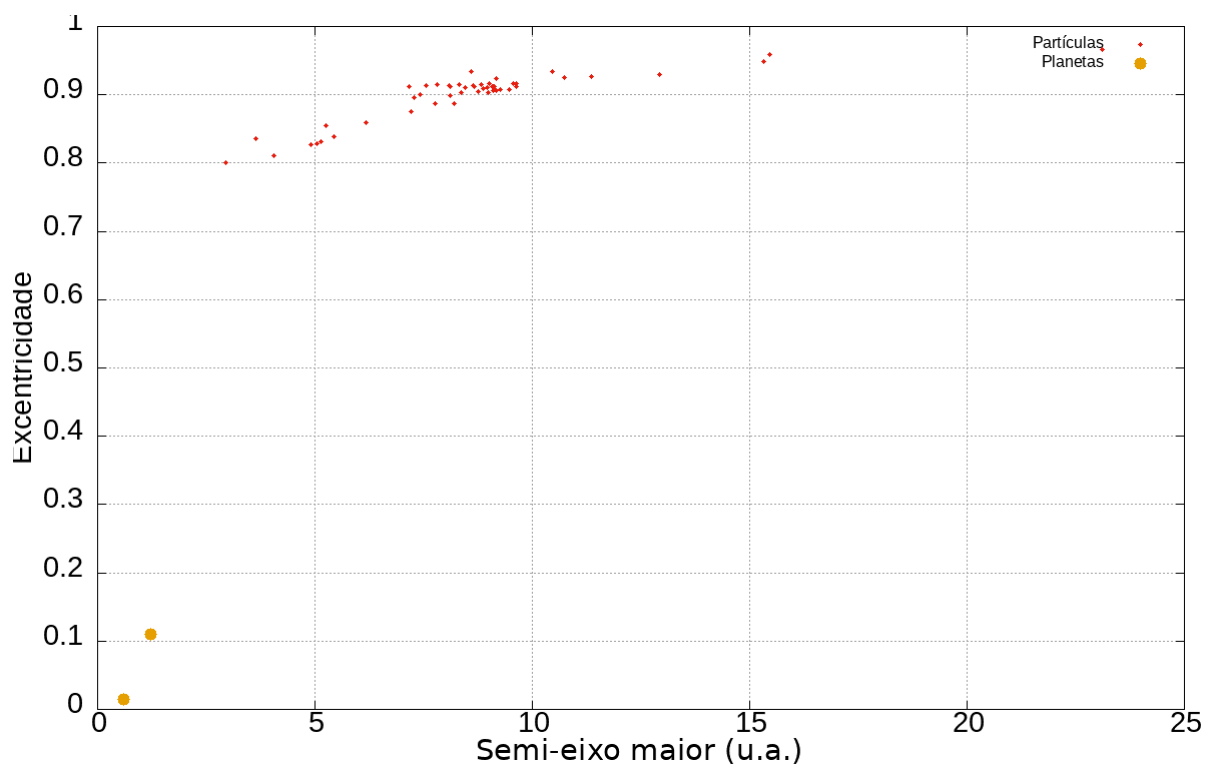


Fonte: Produzido pela autora.

Na segunda parte da análise, consideramos os exocometas cujo semi-eixo maior, após os primeiros 500 mil anos de integração, são menores que 10 u.a., para verificar assim se as órbitas mais próximas dos planetas colidem. A simulação numérica foi feita por mais 500 mil anos.

O gráfico representado na [Figura 50](#) mostra os valores de  $a$  e  $e$  dos exocometas sobreviventes no sistema após a segunda integração. Na segunda parte analisada, também não verificamos colisões com os planetas do sistema. O exocometa que mais se aproximou da região planetária possui, ao final da integração, o semi-eixo maior igual a 2.952 u.a. As excentricidades desses corpos também são próximas das condições iniciais assumidas, sendo que  $e$  não atinge valores menores que 0.8. Na [Figura 50](#), os exocometas são representados pelos pontos vermelhos e os planetas pelos pontos amarelos.

Figura 50 – Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas sobreviventes na segunda etapa de integração, após 500 mil anos de integração. Os exocometas são representados por pontos vermelhos e os planetas são representados pelos pontos amarelos.

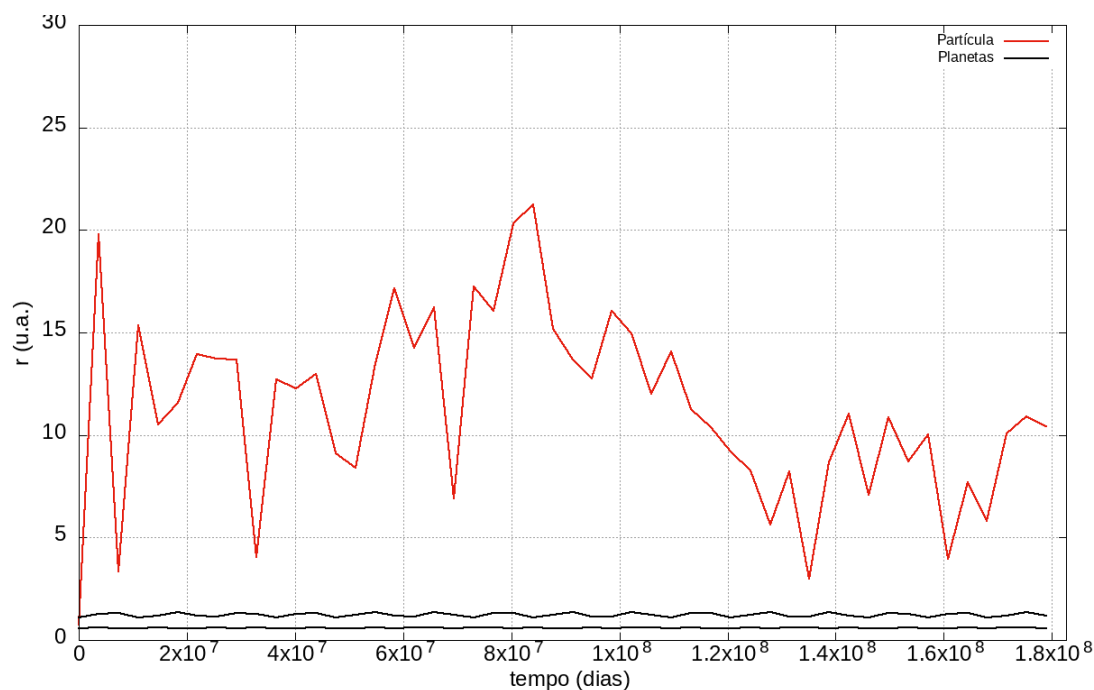


Fonte: Produzido pela autora.

Deste modo, a interação gravitacional entre os exocometas e os planetas, principalmente o planeta com maior massa que se encontra na região mais interna do sistema, não é intensa para alterar consideravelmente os elementos orbitais dos exocometas e ocasionar colisões ou ejeções para as condições iniciais consideradas.

O gráfico apresentado na [Figura 51](#) mostra a evolução do raio orbital de um exocometa, inicialmente, com  $a = 10$  u.a.,  $e = 0.925$  e  $I = 80^\circ$ . A curva em vermelho representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas. O raio orbital do exocometa se aproxima dos raios planetários em alguns momentos ao longo da análise e atinge valores inferiores a 5 u.a.

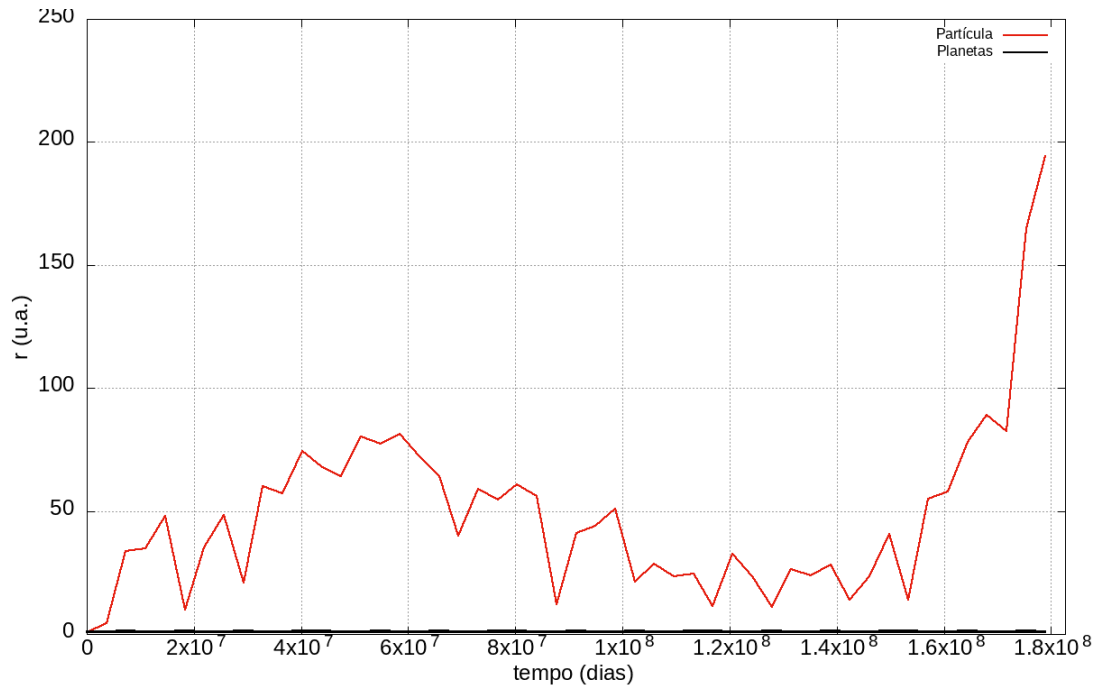
Figura 51 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometa que sobreviveu no sistema Kepler-35 durante 500 mil anos de integração. A curva em vermelho representa a partícula e as curvas em preto representam os planetas.



Produzido pela autora

O exocometa ejetado possui os parâmetros orbitais iniciais  $a = 50$  u.a.,  $e = 0.985$  e  $I = 80^\circ$ . A **Figura 52** mostra a evolução do raio orbital desse exocometa que tende para o valor de 250 u.a. é ejetado do sistema em aproximadamente 494 mil anos de integração (aproximadamente  $1.8 \times 10^8$  dias). O momento da ejeção não é mostrado por causa do intervalo de tempo escolhido para a computação dos dados do sistema. A curva em vermelho representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas do sistema. Isso significa que a ejeção ocorre entre dois valores computados dos elementos orbitais pelo programa que ocorre a cada 10 mil anos de integração.

Figura 52 – Evolução orbital do raio de um exocometas que foi ejetada do sistema Kepler-35 em aproximadamente 494 mil anos de integração. A curva em vermelho representa o exocometas e as curvas em preto representam os planetas.

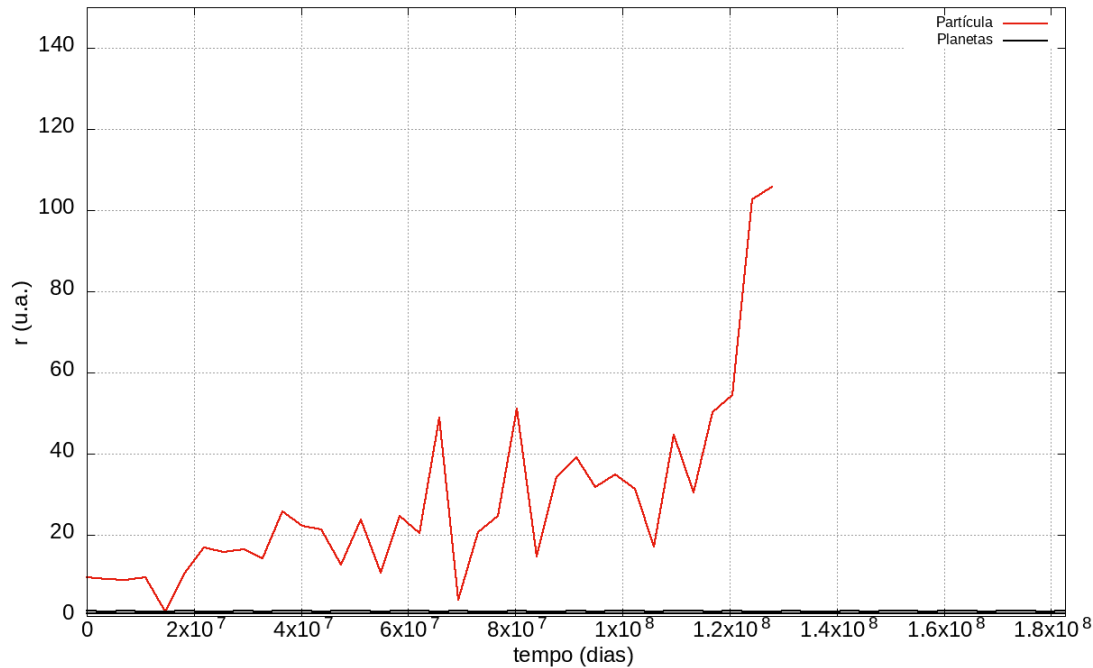


Fonte:

Produzido pela autora.

Analisamos também o comportamento orbital no tempo de um exocometas ejetado na segunda etapa estudada. O gráfico da [Figura 53](#) representa a evolução temporal de  $r$  de um exocometas ejetado em aproximadamente 352 mil anos de integração ( $1.3 \times 10^8$  dias). Nesta etapa, os elementos orbitais iniciais são iguais a  $a = 5.157$  u.a.,  $e = 0.849$  e  $I = 56.6^\circ$ . Esses são os valores dos parâmetros orbitais finais do exocometas sobrevivente com  $a$  menor que 10 u.a. na primeira etapa analisada. A curva em vermelho representa o exocometas e as curvas em preto representam os planetas. Observamos que raio orbital do exocometas sofre variações durante o tempo e cruza o dos planetas do sistema, mas não ocorre colisão por causa dos diferentes valores de inclinação entre o exocometas e os planetas.

Figura 53 – Evolução orbital do raio de um exocometa que foi ejetado do sistema Kepler-35 em aproximadamente 352 mil anos na segunda parte da integração. A curva em vermelho representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte:

Produzido pela autora.

Na Seção 3.5 são mostrados os resultados realizados para a análise de exocometas no sistema binário Kepler-38.

### 3.5 KEPLER-38

O sistema Kepler-38 (K38) é circumbinário e possui um planeta confirmado do tipo Netuno, o Kepler-38 b. Esse planeta possui uma órbita do tipo P, ou seja, orbita em torno do par binário com período de 105 dias (Orosz et al., 2012).

Diferente do sistema Kepler-35 que possui as estrelas hospedeiras com valores de massas próximas, Kepler-38 tem uma estrela mais massiva que a outra. As massas das estrelas hospedeiras e as características orbitais são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros das estrelas hospedeiras de K38

$M_A (M_{Sun})$	$M_B (M_{Sun})$	$a_{bin}$ u.a.	$e_{bin}$
0.949	0.249	0.147	0.103

Fonte: Orosz et al. (2012)

Além do planeta confirmado, existe a possibilidade de formar um planeta do tipo Terra na ZH, como mostrado por Barbosa et al. (2020) e descrito na Seção 3.1 deste capítulo. Na Tabela 8 são mostrados os parâmetros orbitais e as massas do planeta do tipo Terra que é considerado nesse estudo e do planeta confirmado Kepler-35 b.

Kepler-35 b possui uma órbita mais próxima do par binário e é interior à ZH onde o planeta do tipo Terra é formado. O planeta formado no trabalho de Barbosa et al. (2020) possui massa igual a

Tabela 8 – Parâmetros dos planetas do sistema K38

Parâmetros	Planeta confirmado	Planeta formado
semi-eixo maior (u.a.)	0.464	1.494
excentricidade	0.030	0.052
inclinação (°)	0.182	6.672
massa ( $M_j$ )	0.016	$3.273 \times 10^{-3}$

Fonte: Barbosa et al. (2020)

1.040  $M_T$ , sendo  $M_T$  a massa da Terra. Os limites das zonas habitáveis, tanto estreita quanto larga, de acordo com o modelo de Haghighipour e Kaltenegger (2013) para o sistema Kepler-38 são mostrados na Tabela 9.

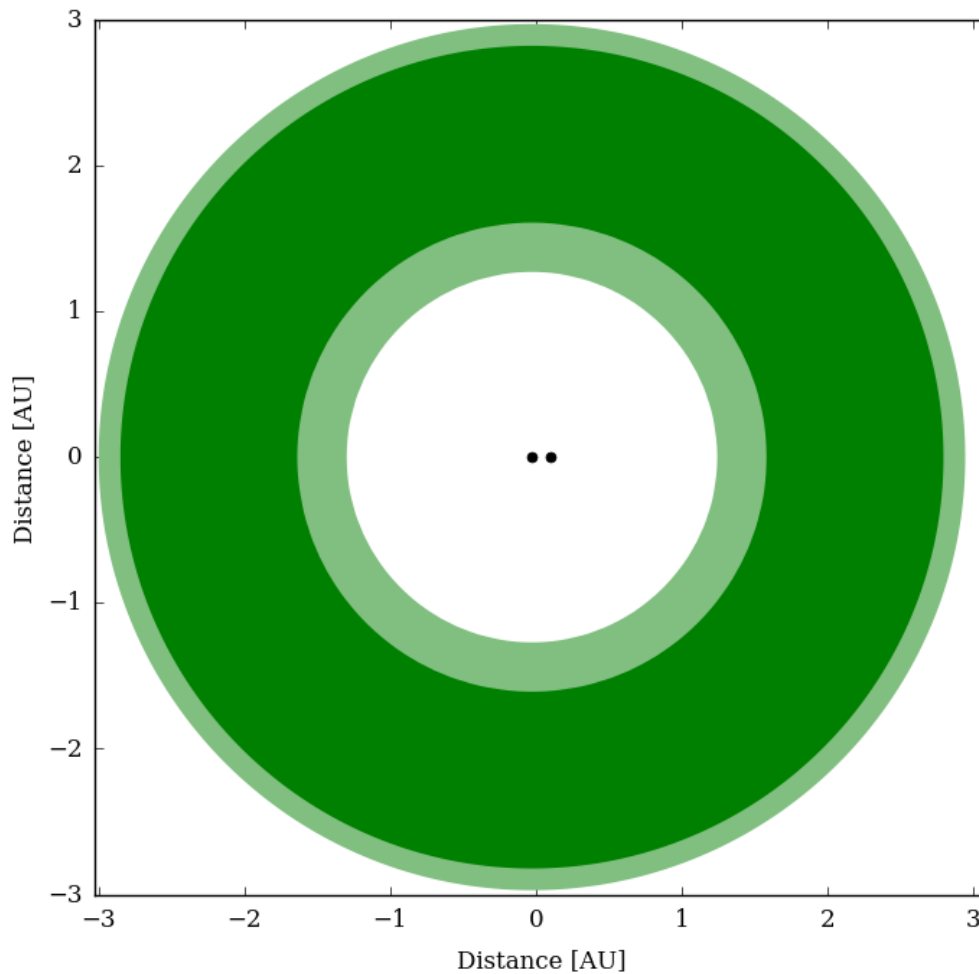
Tabela 9 – Limites da ZH do sistema K38

	Interno	Externo
Estreito (u.a.)	1.60	2.85
Largo (u.a.)	1.30	3.00

Fonte: Barbosa et al. (2020)

Assim como feito no sistema Kepler-35, foram obtidos graficamente os limites da zona habitável do sistema Kepler-38 através do site interativo <http://astro.twam.info/hz/>. Essas regiões são apresentadas no gráfico da Figura 54, sendo que a região em verde escuro demonstra a ZH conservativa e em verde claro, a ZH larga. O planeta do tipo Terra tem semi-eixo maior igual a 1.494 u.a. e está localizado na região habitável.

Figura 54 – Limites da ZH do sistema K38. A região verde escura é a ZH conservativa e a região delimitada por verde claro demonstra a ZH larga.



Fonte: Produzido pela autora.

Analisamos a dinâmica de um conjunto de exocometas hipotéticos localizadas na região externa do sistema com as mesmas condições iniciais dos exocometas analisados no sistema K35 e descritas na Seção 3.3. Esses corpos são considerados sob influência gravitacional dos planetas Kepler-38 e terrestre e das estrelas hospedeiras e as altas excentricidades permitem que atinjam a região planetária de K38.

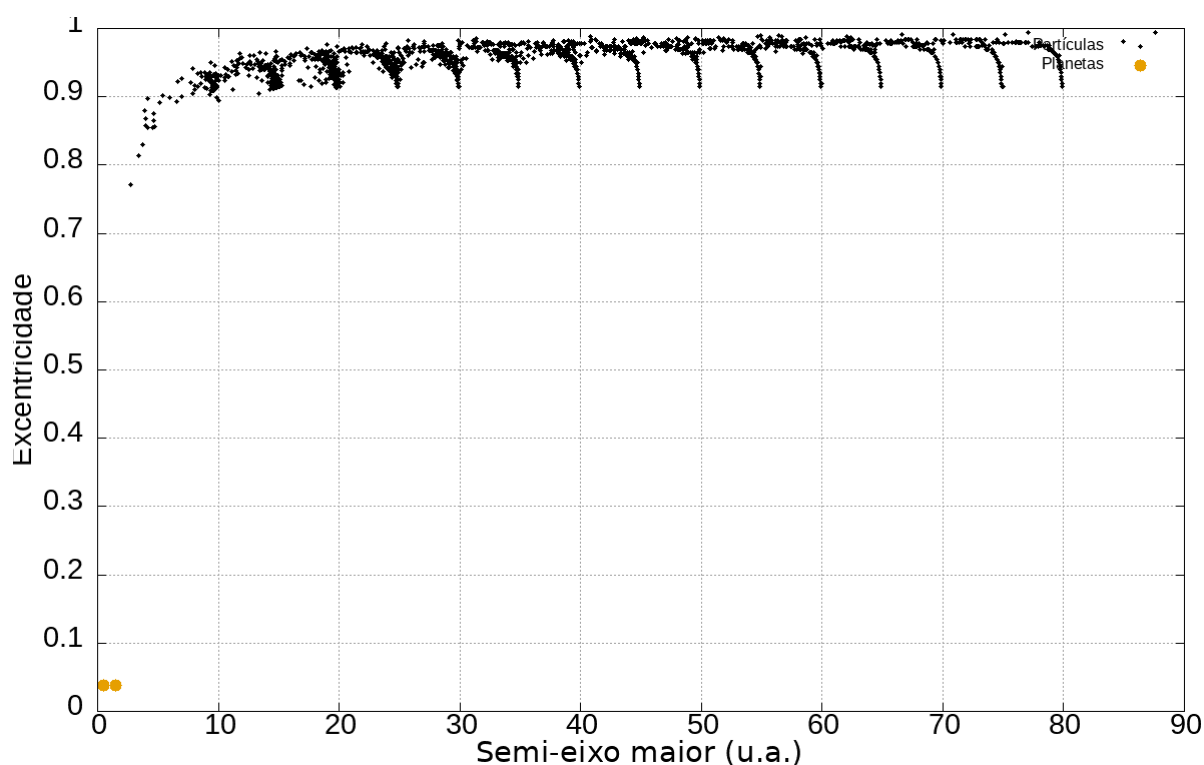
Os valores iniciais de  $\omega$ ,  $\Omega$  e  $M$ , tanto dos planetas quanto dos exocometas, são considerados iguais à zero e as simulações numéricas foram realizadas em duas etapas. Na primeira consideramos o conjunto de 4275 exocometas durante 500 mil anos de integração. Na segunda parte, estudamos a dinâmica dos exocometas que atingiram um valor de  $a$  menor do que 10 u.a. ao final da primeira parte por mais 500 mil anos. Em ambas as etapas, desconsideramos do sistema os exocometas que atingiram o raio orbital maior que 250 u.a. sendo consideradas ejetadas do sistema.

Na primeira parte da análise 12 exocometas colidiram com as estrelas do sistema e não ocorreram colisões com os planetas. Verificamos 433 ejeções (3% do total de exocometas considerados), assim a maior parte dos exocometas sobreviveram ao final dos primeiros 500 mil anos de simulação numérica. Os valores dos semi-eixos maiores e excentricidades dos exocometas sobreviventes ao final da primeira parte são representados no gráfico da [Figura 55](#). Os pontos pretos representam os exocometas e os

pontos amarelos representam os planetas.

O intervalo do semi-eixo maior da maioria dos exocometas sobreviventes são os mesmos considerados inicialmente, ou seja, permanecem com valores entre 10 u.a. e 80 u.a. Entretanto, verificamos que alguns desses corpos atingiram um valor de  $a$  menor que 10 u.a. O exocometeta que mais se aproximou do sistema possui  $a = 2.738$  u.a. Os valores das excentricidades não diminuem consideravelmente em relação aos valores inicialmente considerados, e o exocometeta que mais se aproxima do sistema assume  $e \leq 0.8$ .

Figura 55 – Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema K38 após 500 mil anos de integração. Os pontos pretos representam os exocometas e os pontos amarelos representam os planetas.

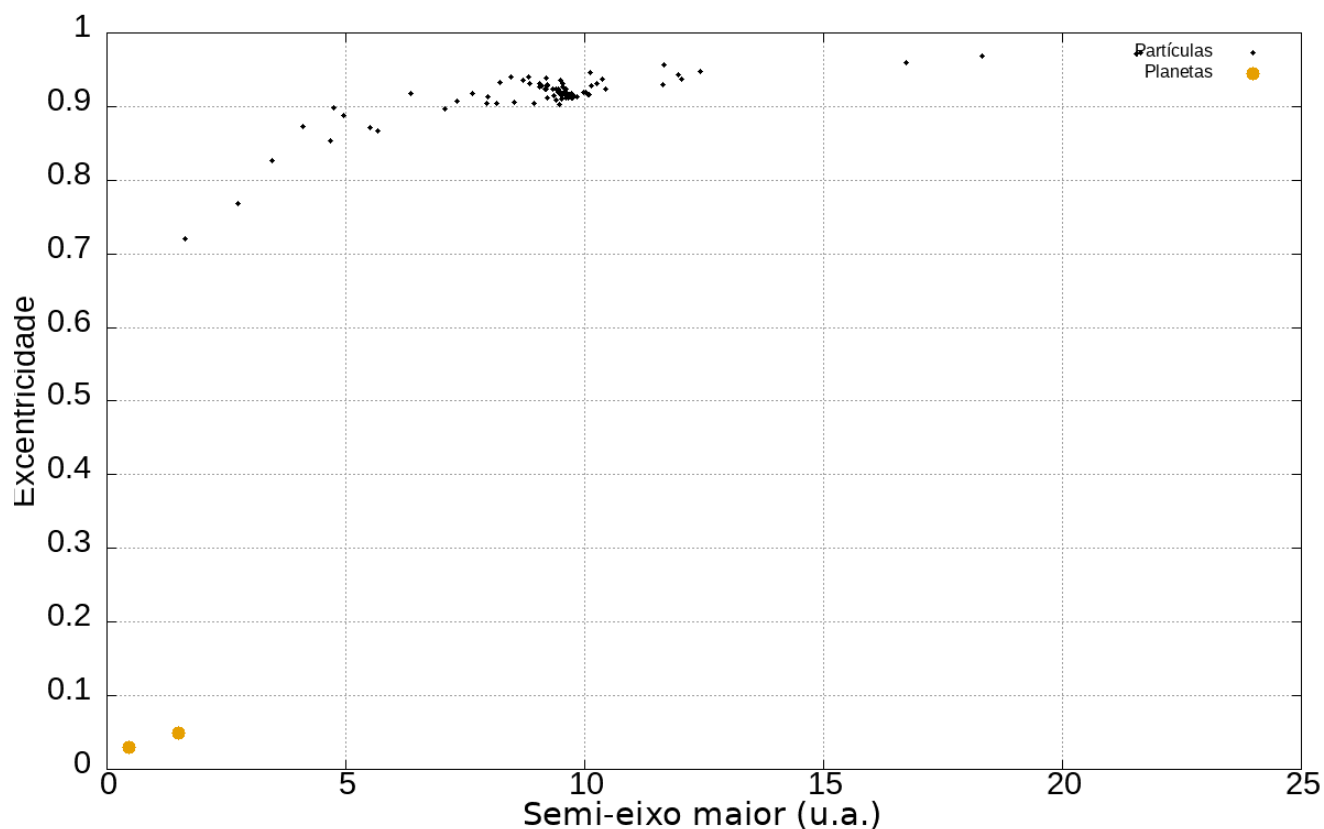


Fonte: Produzido pela autora.

Na etapa seguinte realizamos a análise dos exocometas com  $a \leq 10$  u.a. na primeira etapa. Há um total de 92 exocometas considerados no sistema por mais 500 mil anos e as condições iniciais desses corpos são os valores dos elementos orbitais que assumiram ao final da primeira etapa.

Nesta segunda etapa não ocorreram colisões com os planetas ou as estrelas hospedeiras e 6 exocometas foram ejetados (6.5% do total analisado na segunda etapa). No gráfico representado pela [Figura 56](#) são mostrados os valores do semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas sobreviventes no sistema e o corpo que mais se aproximou da região planetária atingiu o semi-eixo maior igual a 1.628 u.a., região próxima ao planeta terrestre. As excentricidades, assim como ocorreu na primeira parte analisada, não assume valores muito diferentes dos iniciais, sendo que a menor excentricidade atingida é próxima de 0.7. Na [Figura 56](#), os exocometas são representadas por pontos pretos e os planetas por pontos amarelos.

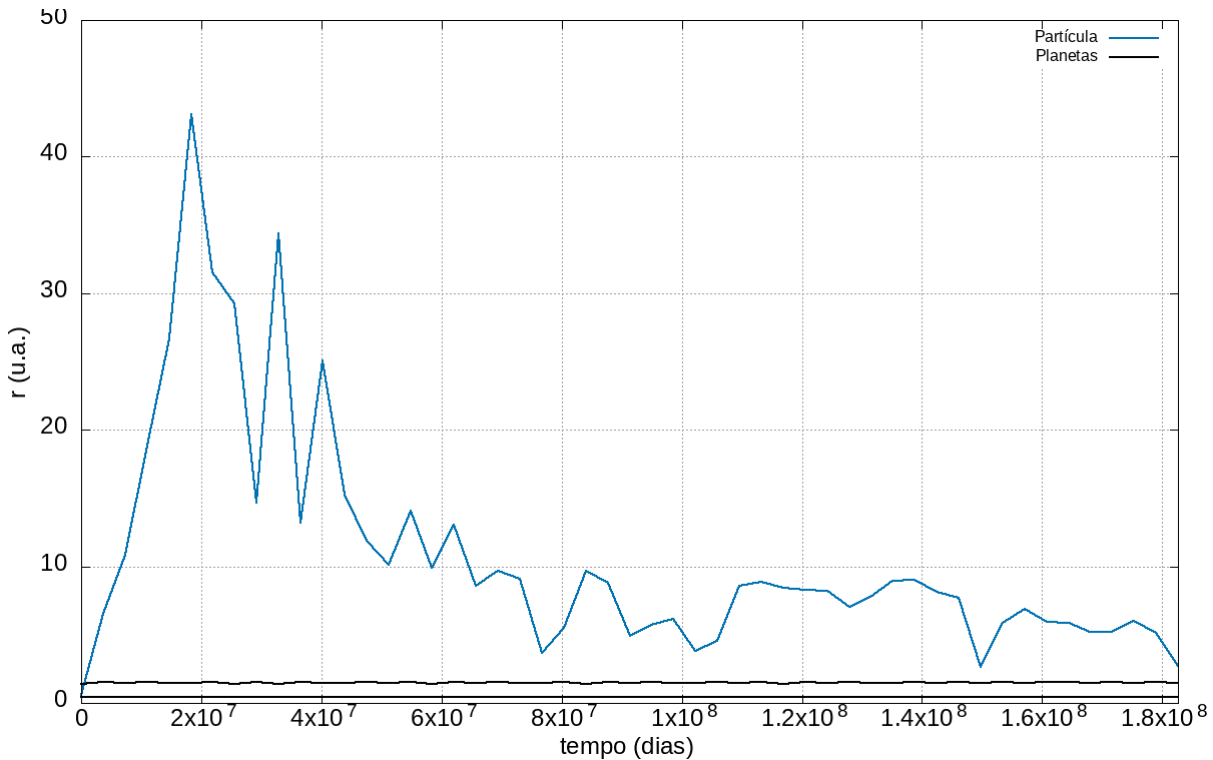
Figura 56 – Semi-eixo maior e excentricidade dos exocometas que sobreviveram no sistema K38 após a segunda integração numérica. Os pontos pretos representam os exocometas e os pontos amarelos representam os planetas.



Fonte: Produzido pela autora.

Analisamos a evolução temporal do raio orbital dos exocometas ejetados e uma sobrevivente nas duas partes analisadas do sistema. Na [Figura 57](#) é apresentada a evolução do raio orbital de um exocometa que sobreviveu nos primeiros 500 mil anos de integração com os elementos orbitais iniciais:  $a = 15$  u.a.,  $e = 0.960$  e  $I = 40^\circ$ . O raio orbital do exocometa sofre oscilações ao longo do tempo atingindo um valor máximo de aproximadamente 43 u.a. e em seguida volta para a região mais próxima dos planetas e se mantém até o fim do tempo de análise. A curva em azul representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.

Figura 57 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometa sobrevivente no sistema na primeira etapa da integração. A curva em azul representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.

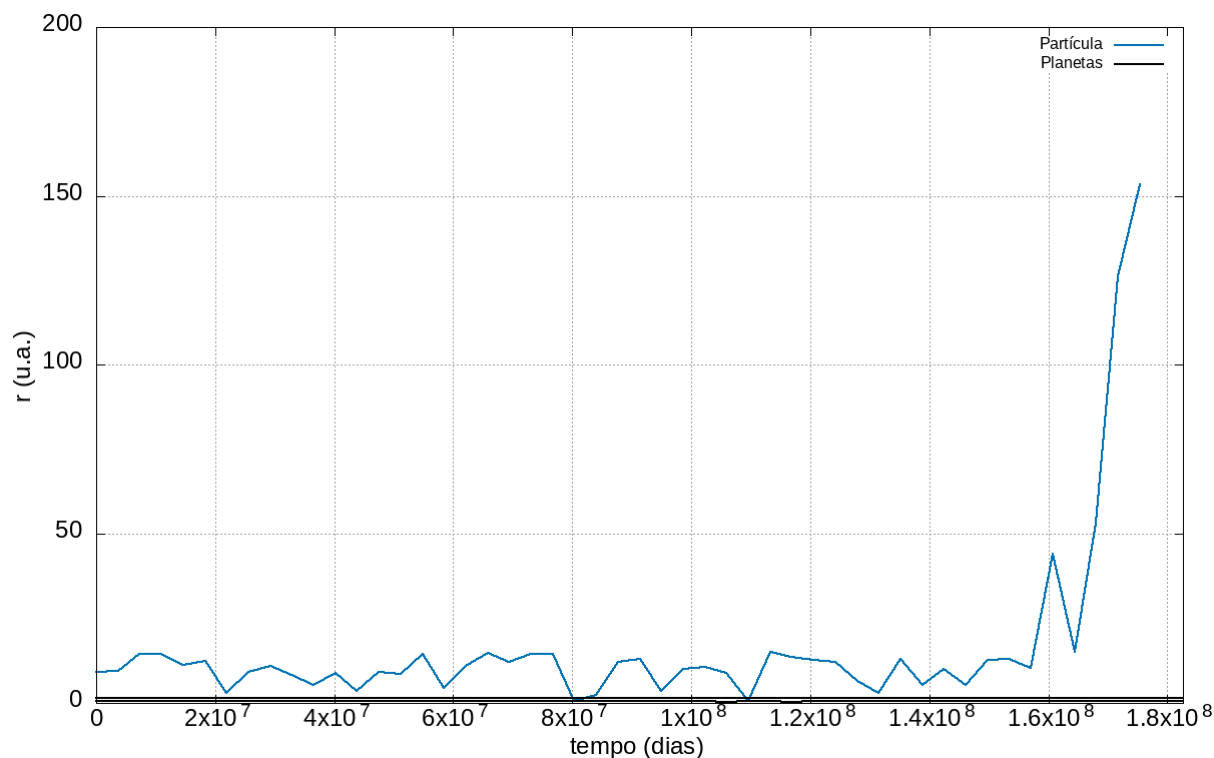


Fonte:

Produzido pela autora.

Para a segunda parte da integração, analisamos a evolução temporal do raio orbital de um exocometa ejetado e de um sobrevivente. Na [Figura 58](#) é mostrado o comportamento no tempo de  $r$  de um exocometa ejetado em aproximadamente 487 mil anos de integração e condições iniciais  $a = 5.375$  u.a.,  $e = 0.902$  e  $I = 114.5^\circ$ . A curva em azul representa o comportamento do exocometa e as curvas em preto representam os planetas. O último valor do raio orbital computado é de 150 u.a. e isso ocorre devido ao tempo em que os arquivos de saída do sistema são computados (a cada dez mil anos), ou seja, a ejeção ocorre no período posterior ao último dado em que não temos informações sobre o comportamento do exocometa. Ocorrem oscilações no valor do raio, mas não são tão expressivas como do exocometa anterior. Próximo ao final do tempo de integração observamos a tendência do exocometa de se aproximar da distância de ejeção.

Figura 58 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometas ejetado do sistema na segunda etapa da integração. A curva em azul representa o exocometas e as curvas em preto representam os planetas.

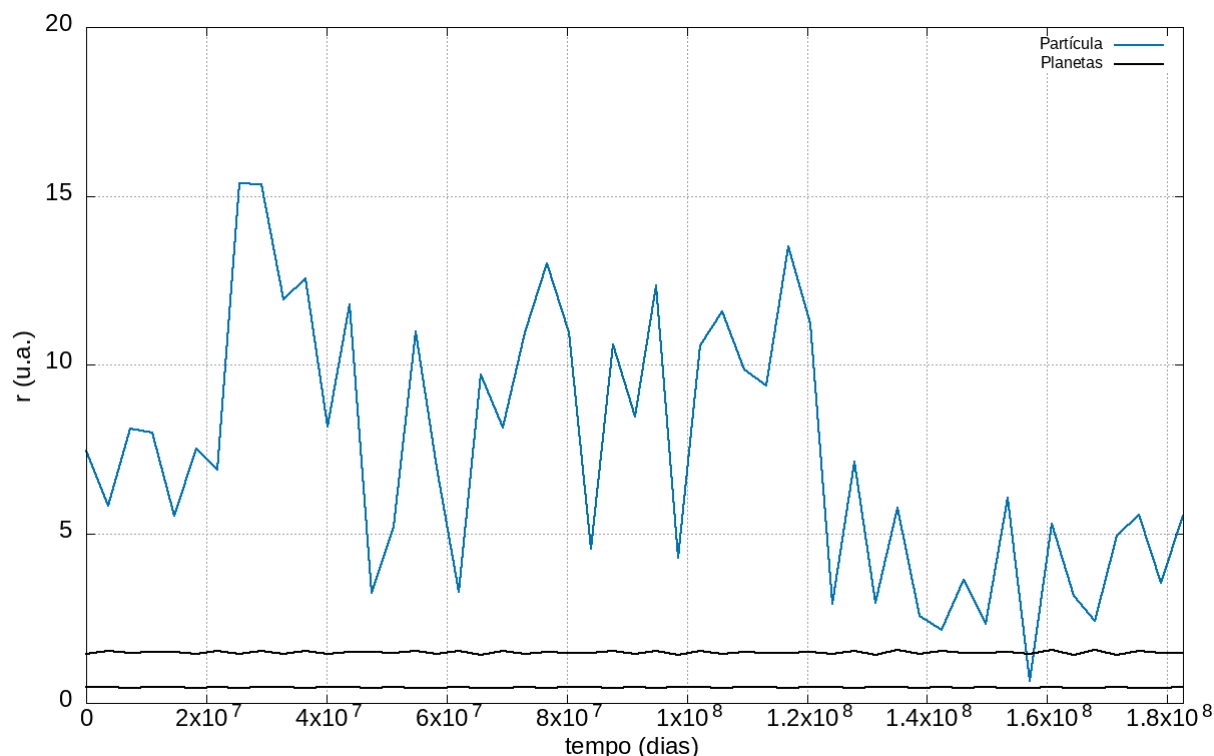


Fonte:

Produzido pela autora.

Por fim, analisamos o comportamento orbital de um exocometas sobrevivente na segunda etapa das simulações com os valores iniciais  $a = 4.145$  u.a.,  $e = 0.855$  e  $I = 109.9^\circ$ . A evolução temporal de  $r$  é mostrada na [Figura 59](#), sendo o exocometas representado pela curva em azul e os planetas pelas curvas em preto. O raio orbital sofre variações ao longo do tempo, entretanto não ultrapassa o valor de 15 u.a. e em todo o momento está suficientemente longe da distância de ejeção. Em um ponto, o raio orbital do exocometas cruza o do planeta terrestre, entretanto não ocorre colisão por causa da diferença de inclinação dos planos orbitais dos dois corpos.

Figura 59 – Evolução temporal do raio orbital de um exocometa sobrevivente no sistema na segunda etapa de integração. A curva em azul representa o exocometa e as curvas em preto representam os planetas.



Fonte:

Produzido pela autora.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DOS SISTEMAS KEPLER-35 E KEPLER-38

O estudo da dinâmica de exocometas em sistemas binários tem como principais objetivos a análise da dinâmica e de colisões desses corpos com os planetas, principalmente os planetas terrestres na ZH dos sistemas, para investigar a possibilidade de entrega de água. A escolha dos sistemas Kepler-35 e Kepler-38 se deve à capacidade que têm de formar um planeta do tipo Terra na ZH de cada sistema como mostrado por Barbosa et al. (2020).

Kepler-35 possui duas estrelas com massas de 89% e 81% do valor da massa do Sol em nosso Sistema Solar, de acordo com Welsh et al. (2012). O planeta gigante confirmado possui um semi-eixo maior de 0.603 u.a. e está localizado na região interna a ZH. Diferentemente de K35, o sistema Kepler-38 possui uma estrela muito mais massiva do que a outra. As estrelas possuem massas de aproximadamente 95% e 25% da massa do Sol. O planeta confirmado também está localizado na região interna a ZH e o semi-eixo maior é igual a 0.464 u.a.

Para os dois sistemas, consideramos um conjunto de exocometas altamente excêntricos e com diferentes valores de inclinações que permitem que esses corpos entrem na região planetária de diversas direções. Eles estão sob influência gravitacional das estrelas e dos planetas considerados nos sistemas.

A análise da dinâmica dos exocometas nos sistemas binários foram realizados em duas etapas. Na primeira, integramos todos os corpos considerados durante 500 mil anos e na segunda, realizamos uma análise dos exocometas com semi-eixo maior inferior a 10 u.a. ao final da primeira etapa por mais 500 mil anos. Em ambos os casos os exocometas são ejetadas quando o raio orbital ultrapassa o valor de

250 u.a.

Em Kepler-35 e Kepler-38 observamos resultados que são semelhantes para ambos os sistemas. O primeiro se deve à sobrevivência da maioria dos exocometas nos sistemas ao final da primeira etapa de simulações, para um tempo de 500 mil anos. Em K35, 3645 exocometas sobreviveram (85.2% do total considerada) e em K38, 3830 exocometas sobreviveram (89.6% do total considerado). Esses exocometas não alteram significativamente os valores do semi-eixo maior e excentricidade. O segundo resultado para K35 e K38 é a não ocorrência de colisões de exocometas com os planetas dos sistemas e isso acontece para as duas etapas de análise, ou seja, em 1 Myr de anos nenhum exocometas, com as condições iniciais assumidas, colidem.

Esses resultados são diferentes dos que ocorrem com o sistema K90 para o qual a maior parte dos exocometas são ejetados e verificamos colisões. Isso se deve porque tanto em K35 quanto em K38, o planeta mais massivo é mais interno no sistema e estão longe o suficiente dos exocometas para causar alterações significativas, ou seja, não interferem em seus movimentos de forma a ocasionar colisões, muitas ejeções ou grandes alterações nos elementos orbitais das partículas sobreviventes.

Deste modo, o possível transporte de água para os planetas por exocometas hipotéticos com as condições iniciais consideradas deve ser descartado para os sistemas Kepler-35 e Kepler-38. Assim, devemos investigar a dinâmica para diferentes condições iniciais ou um método alternativo para o transporte de água.

## 4 DISCUSSÃO

Quando questionamos sobre a existência de vida além do planeta Terra, cientificamente, buscamos por corpos que são capazes de manter condições necessárias para abrigar vida da forma que a conhecemos e um dos principais fatores é a existência de água no estado líquido. Baseando-nos nesse ponto levantado, neste trabalho, investigamos a possibilidade de entrega de água por exocometas para planetas em sistemas extrassolares, especialmente planetas do tipo Terra localizados na zona habitável de seus sistemas. Consideramos os exocometas como subproduto da formação planetária nos sistemas extrassolar Kepler-90 e os binários Kepler-35 e Kepler-38.

O sistema Kepler-90 foi escolhido por suas semelhanças com o nosso Sistema Solar, pois possui oito planetas em uma disposição hierárquica, ou seja, os planetas mais internos K90 b, c e i são do tipo terrestres; os planetas intermediários K90 d, e e f são super-Terras e os planetas mais externos, K90 g e h, são planetas gigantes gasosos. A estrela hospedeira do sistema tem massa e raio iguais a, respectivamente,  $1.2 M_{Sol}$  e  $1.2 R_{Sol}$ . A principal diferença entre K90 e o Sistema Solar é que o primeiro é um sistema compacto, sendo que todos os planetas existentes estão contidos em um raio orbital de 1 u.a., a mesma distância entre a Terra e o Sol no Sistema Solar.

Para K90, consideramos um conjunto de exocometas sob influência gravitacional da estrela hospedeira e dos planetas do sistema. O valor do semi-eixo maior desses corpos é proporcional ao que foi estudado por Dvorak et al. (2020) no sistema 47 UMa. As excentricidades e inclinações são baseadas nos cometas de nossa nuvem de Oort, ou seja, os exocometas são altamente excêntricos e essa característica possibilita a entrada desses corpos na região planetária e vindos de todas as direções porque a inclinação varia de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Realizamos três conjuntos de simulações numéricas para o sistema Kepler-90. No primeiro, consideramos as excentricidades dos planetas iguais à zero; no segundo, as excentricidades dos planetas foram consideradas iguais a 0.001 e no terceiro as excentricidades dos planetas são iguais a 0.01. Nos três casos, o sistema K90 é estável como demonstrado por Gaslac (2021) e os exocometas considerados possuem as mesmas condições iniciais. A interação gravitacional entre os corpos do sistema, principalmente o planeta gigante gasoso mais externo (K90 g) e os exocometas, levam a três resultados possíveis para o movimento desses corpos. O primeiro é a ejeção, sendo que nas três análises realizadas, verificamos que a maioria dos exocometas do total considerado é ejetado do sistema. Os exocometas também podem colidir com os planetas do sistema ou ser capturados.

Nos três casos analisados, verificamos que ocorrem colisões de exocometas com os planetas do sistema. No primeiro caso 2.17% dos exocometas considerados colidem; no segundo caso essa quantidade é menor, sendo 1.32% do total e no terceiro caso 1.78% do total colidem. A maior parte das colisões ocorrem com os planetas mais externos e gigantes gasosos K90 g e K90 h. Entretanto, ocorrem colisões com todos os planetas dos sistemas quando consideramos os três casos. Desta forma, existe possibilidade de entrega de água por exocometas para os planetas do sistema K90.

Observamos que nas três análises de excentricidades dos planetas, a possibilidade de colisão é maior quando os exocometas possuem inclinações iniciais iguais a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Esse resultado é

esperado porque para esses valores de  $I$ , as inclinações dos exocometas são próximas às inclinações das órbitas dos planetas que são inferiores a  $1^\circ$ . Assim existe a possibilidade de entrega de água para os planetas do sistema Kepler-90 para exocometas com as condições iniciais consideradas.

A maioria dos exocometas no sistema K90 são ejetados durante a integração numérica. Nos três casos, menos de 3% dos exocometas sobrevivem e verificamos uma diminuição significativa das excentricidades de alguns desses corpos. Os baixos valores de excentricidades que os exocometas assumem pode classificá-los como capturados pelo sistema. Em trabalhos futuros, definiremos valores de  $a$  e  $e$  adequados para assumir exocometas capturados no sistema K90.

Além do sistema Kepler-90, realizamos a análise para dois sistemas binários: Kepler-35 e Kepler-38. Escolhemos esses sistemas porque estudos recentes mostram a possibilidade de formação de um planeta do tipo Terra na ZH de cada um deles. Assim, na análise realizada neste trabalho, além do planeta existente e confirmado em cada um desses sistemas, consideramos também um planeta um planeta terrestre na zona habitável.

O sistema Kepler-35 possui duas estrelas com massas próximas uma da outra, sendo 89% e 81% da massa do Sol. O planeta confirmado em K35 é interno à zona habitável, região na qual existe a possibilidade do planeta terrestre ser formado. No sistema Kepler-38, existe uma diferença entre as massas das estrelas, tendo aproximadamente 95% e 25% da massa dos Sol. Assim como acontece para K35, em K38 existe um planeta confirmado e mais massivo localizado na região interna a zona habitável do sistema, onde o planeta do tipo Terra pode ser formado.

Para os sistemas binários, dividimos a análise em duas partes com integração de 500 mil anos cada. Na primeira parte, consideramos todos os exocometas nos sistemas com as condições iniciais descritas. Na segunda etapa, os exocometas que sobreviveram com  $a$  inferior a 10 u.a. ao final da primeira etapa foram analisados por mais 500 mil anos.

Para os dois sistemas binários, não ocorrem colisões de exocometas com os planetas e nenhuma das duas etapas analisadas. Isso ocorre porque o planeta mais massivo e localizado na região interna de cada sistema está distante e não perturba suficientemente as partículas de modo a causar variações significativas nas órbitas dos exocometas. Além de não ocorrer colisões, diferentemente de K90, aqui a maioria dos exocometas sobrevivem no sistema sem grandes mudanças em seus elementos orbitais.

Deste modo, para os sistema binários, podemos considerar a entrega de água por um método alternativo ou, ainda, considerar diferentes condições iniciais dos exocometas considerados nos sistemas para averiguar a possibilidade de colisões e o transporte de água de exocometas com os planetas de K35 e K38.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. G. G.; SANTOS, W.C. Determinação da massa e dados orbitais de exoplanetas pelo método Doppler. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7XpG6FczkrKyF96MzJpCkMC/?format=pdflang=pt>.
- BARBOSA, G.O. *et al.* Earth-size planet formation in the habitable zone of circumbinary stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 494; p. 1045-1057, 2020.
- CABRERA, J. *et al.* The planetary system to KIC11442793: a compact analogue to the Solar System. **The Astrophysical Journal**, v. 781, n. 1, p. 18, 2014.
- CHAMBERS, J. E. Hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, n. 4, p. 793-799, 1999. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x>
- CONTRERAS, A. P.; BOYLE, A. C. The dynamics of tightly-packed planetary systems in the presence of an outer planet: case studies using Kepler-11 and Kepler-90. **The Astronomical Journal**, v. 155, n. 3, p. 139, 2018.
- DUNCAN, M. J.; LEVISON, H. F. A disk of scattered icy objects and the origin of Jupiter-family comets. **Science**, v. 276, n. 5319, p. 1670-1672, 1997.
- DVORAK, R.; LOIBNEGGER, B.; CUNTZ, M. On the dynamics of comets in extrasolar planetary systems. *In: The Trans-Neptunian Solar System*. Elsevier, 2020. p. 331-350.
- GALLARDO, D. M. G. **Dinâmica dos pequenos corpos de Netuno e o sistema Kepler-90**. Orientador: Silvia Maria Giuliatti Winter. 2021. Tese (Doutorado em Física) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- HAGHIGHIPOUR, N.; KALTENEGGER, L. Calculating the habitable zone of binary star systems. II. P-type binaries. **The Astrophysical Journal**, v. 777, n. 2, p. 166, 2013.
- JENSEN, E. L.; MATHIEU, R. D. JENSEN, Eric LN; MATHIEU, Robert D. Evidence for cleared regions in the disks around pre-main-sequence spectroscopic binaries. **The Astronomical Journal**, v. 114, p. 301-316, 1997.
- KALTENEGGER, L.; HAGHIGHIPOUR, N. Calculating the habitable zone of binary star systems. I. S-Type binaries. **The Astrophysical Journal**, v. 777, n. 2, p. 165, 2013.
- KITCHIN, Chris. **Exoplanets: finding, exploring and understanding alien worlds**. Springer Science Business Media, 2011.
- KOPPARAPU, R. K. *et al.* Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. **The Astrophysical Journal**, v. 765, n. 2, p. 131, 2013.

LEVISON, H. F.; DUNCAN, M. J. From the Kuiper belt to Jupiter-family comets: The spatial distribution of ecliptic comets. **Icarus**, v. 127, n. 1, p. 13-32, 1997.

LIANG, Y.; ROBNIK, J.; SELJAK, U. Kepler-90: giant transit-timing variations reveal a super-puff. **The Astronomical Journal**, v. 161, n. 4, p. 202, 2021.

MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar System Dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 1999.

NASA. **Kepler and K2**. 2022. Disponível em: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html). Acesso em: 19 jan. 2022.

NESVORNÝ, D. *et al.* Origin and evolution of short-period comets. **The Astrophysical Journal**, v. 845, n. 1, p. 27, 2017.

PRIALNIK, D.; BARUCCI, A.; YOUNG, L. (Ed.) **The trans-Neptunian Solar System**. Elsevier, 2019.

Oort, J. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. **Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands**, v. 11, p. 91-110, 1950.

OROSZ, J. A. *et al.* Kepler-47: a transiting circumbinary multi-planet system. **Science**, v. 337, n. 6101, p. 1511-1514, 2012.

OROSZ, J. A. *et al.* The Neptune-sized circumbinary planet Kepler-38 b. **The Astrophysical Journal**, v. 758, n. 2, p. 87 2012.

SHALLUE, C. J; VANDERBURG, A. Identifying exoplanets with deep learning: a five-planet resonant chain around Kepler-80 and an eighth planet around Kepler-90. **The Astronomical Journal**, v. 155, n. 2, p. 94, 2018.

VOKROUHNICKÝ, D.; NESVORNÝ, D.; DONES, L. Origin and evolution of long-period comets. **The Astronomical Journal**, v. 157, n. 5, p. 181, 2019.

WEISSMAN, P. R. *et al.* Evolution of comets into asteroids. **Asteroids III**, v. 1, p. 669, 2002.

WELSH, W. F. *et al.* The transiting circumbinary planets of Kepler-35 and Kepler-38. **Nature**, v. 481, N. 7381, p. 475-479, 2012.

WELSH, W. F.; MONTGOMERY, S. L. WELSH, Barry Y.; MONTGOMERY, Sharon L. The appearance and disappearance of exocomet gas absorption. **Advances in Astronomy**, v. 2015, 2015.

## APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO DE EXOPLANETAS

As classificações dos planetas extrassolares são explicadas porque neste trabalho assumimos regiões nos sistemas estudados (K90, K35 e K38) que possam ter objetos que estão além dos planetas extrassolares (ou exoplanetas) confirmados e que são classificados como descrito nessa seção.

Esta seção tem como referência o livro escrito por Chris Kitchin (2012), cujo título é "Exoplanets: Finding, Exploring, and Understanding Alien Worlds".

Os planetas extrassolares são classificados através de comparações com as massas dos planetas existentes em nosso Sistema Solar. Além da massa, a distância em relação à estrela hospedeira é relevante na classificação, principalmente quando analisamos planetas do tipo Terra que podem estar em uma região de habitabilidade. Essa região habitável, de um modo geral, é considerada como a região em que o planeta pode suportar água líquida em sua superfície.

Os exoplanetas detectados podem ser classificados como Júpiteres quentes ou Júpiteres frios, Super Júpiteres, Netunos quentes, super Terras, exo-Terras ou pontos flutuantes.

Os planetas do tipo Júpiter são assim classificados quando possuem massas comparadas a de Júpiter, isto é, com valores que variam de metade até treze vezes a massa do maior planeta do nosso sistema. Quando as massas desses planetas variam de 5 - 13  $M_J$  (massas de Júpiter), eles podem ser classificados como super Júpiteres e quando excedem esse limite, são considerados anãs marrons.

Esses planetas também podem ser classificados como quentes ou frios dependendo da proximidade com a estrela hospedeira. A maior aproximação resulta em temperaturas elevadas e desta forma temos os Júpiteres quentes. Quando estão localizados a uma distância que excede duas vezes a distância Terra - Sol, são considerados como Júpiteres frios.

Os planetas com massas pouco menores que a de Júpiter e próximos da estrela são do tipo Netunos quentes.

Os planetas extrassolares encontrados com valor de massa até  $1.5M_T$ , sendo  $M_T$  a massa da Terra, são classificados como do tipo Terra ou exo-Terras. Quando possuem massa superior e que atingem o valor de até  $10M_T$  (de  $1.5$  a  $10M_T$ ), são considerados como super Terras. De acordo com Kitchin (2012), as super-Terras provavelmente são planetas rochosos.

Podemos considerar ainda os Goldilocks e as Terra gêmeas. Os Goldilocks são exo-Terras que orbitam na zona habitável dos sistemas e as Terras gêmeas possuem condições necessárias (como temperatura e atmosfera) para que os humanos possam sobreviver.

Existe uma última categoria denominada como pontos flutuantes que caracterizam planetas não associados a uma estrela hospedeira.

A maioria dos planetas extrassolares encontrados são grandes e massivos e isso ocorre porque são mais facilmente detectados com os métodos de detecção atuais e que são descritos no Apêndice B.

## APÊNDICE B – MÉTODOS DE DETECÇÃO DE EXOPLANETAS

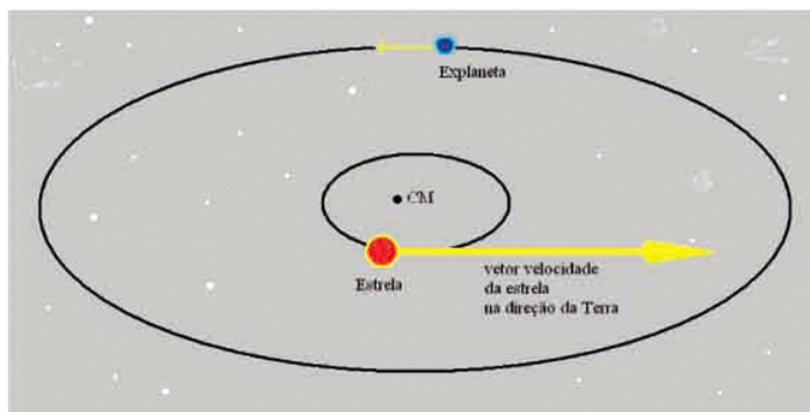
De acordo com a NASA Exoplanet Archive, existem 5197 planetas confirmados, sendo este dado atualizado em novembro de 2022. Nesta seção descrevemos métodos de detecção de planetas em sistemas extrassolares sendo eles o Efeito Doppler, Trânsito, Imageamento Direto e Microlentes Gravitacionais.

### B.1 EFEITO DOPLER OU VELOCIDADE RADIAL

A presença de um planeta massivo em um sistema estelar pode fazer com que o centro de massa do sistema seja deslocado do corpo central. Deste modo, o planeta e a estrela hospedeira possuem um movimento orbital em torno do centro de massa e, conseqüentemente, uma velocidade radial em relação a um observador.

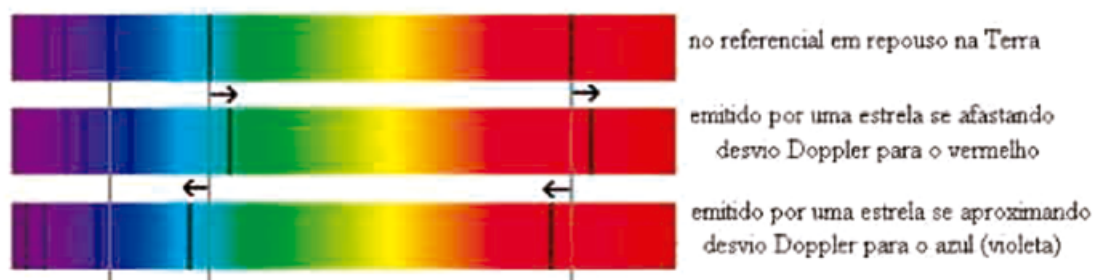
Quando o sistema está de perfil, é possível observar a velocidade radial e o efeito Doppler associado a ela no movimento de aproximação e afastamento da Terra. De acordo com Amorim e Santos (2016), o efeito pode ser observado por meio do deslocamento  $\Delta\lambda$  no espectro de absorção do hidrogênio que é presente na superfície da estrela e ilustrado na [Figura 61](#). Deste modo, no efeito Doppler ou velocidade radial, a variação observada no espectro devido à velocidade radial pode indicar a presença de um planeta.

Figura 60 – Sistema com CM em um ponto fora do corpo da estrela e o movimento orbital da estrela causa deslocamento no espectro de absorção do hidrogênio.



Fonte: Kitchin (2012).

Figura 61 – Efeito Doppler no espectro de absorção do hidrogênio.



Fonte: Amorim e Santos (2016).

A velocidade radial da estrela é calculada pela Equação [1](#). Na expressão,  $K$  é um parâmetro que depende da massa do planeta e da estrela.

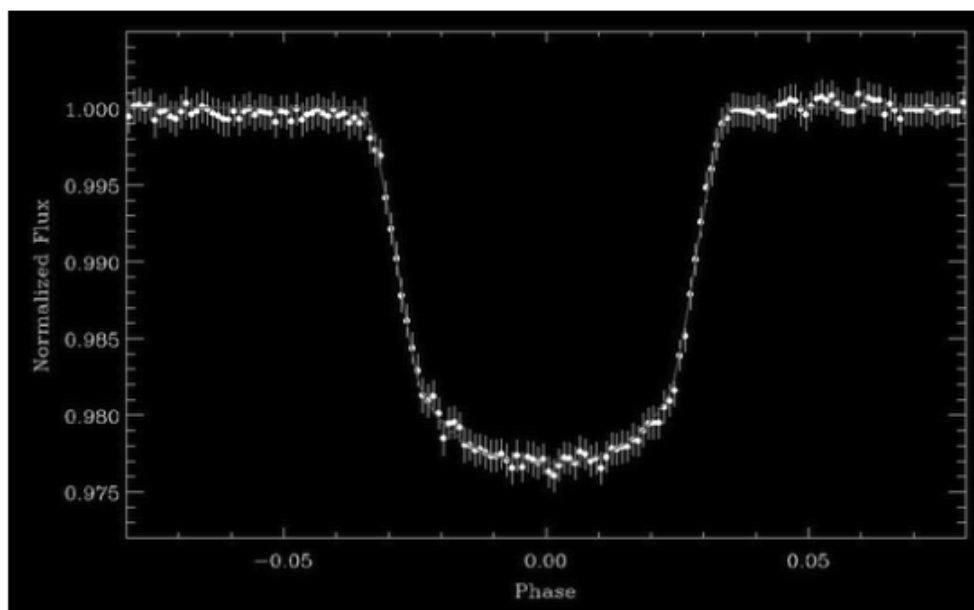
$$v_{radial} = v_{CM} + K f(t) \quad (1)$$

## B.2 MÉTODO DE TRÂNSITO

O método de trânsito é caracterizado por um corpo que passa na frente do outro como acontece nos eclipses por exemplo. Entretanto, as dimensões angulares dos corpos são bem diferentes e ao invés de obtermos um eclipse em que temos uma grande região de sombra, no trânsito observamos uma queda na curva de luz do corpo que está sendo ocultado.

Desta forma, para a descoberta de exoplanetas através do método de trânsito, é possível realizar a detecção quando um planeta passa na frente de sua estrela hospedeira e uma consequente diminuição do brilho da estrela. A [Figura 62](#) ilustra a curva do trânsito do exoplaneta do tipo Júpiter quente CoRoT-1b que foi detectado pela missão CoRoT, em que a queda na curva é causada pela diminuição no brilho da estrela hospedeira quando o planeta a oculta.

Figura 62 – Curva de luz obtida à partir do trânsito do planeta CoRoT-1b.



Fonte: Amorim e Santos (2016).

Apesar de um método simples, o trânsito possui algumas complicações. Fatores externos e internos podem fazer com o que o brilho da estrela varie. Deste modo, é preciso que o planeta passe na frente de sua estrela hospedeira algumas vezes em intervalos de tempos iguais para que seja confirmada a sua presença.

Ainda, quanto mais próximo o planeta estiver da estrela, mais intensa é a variação do fluxo de luz. De acordo com Kitchen (2012), para um planeta do tipo de Júpiter orbitando uma estrela semelhante ao Sol, a variação do brilho é cerca de 1%. Para planetas do tipo terrestre, esse valor é menor e assim, os planetas do tipo Júpiter são mais facilmente detectados através do método de trânsito.

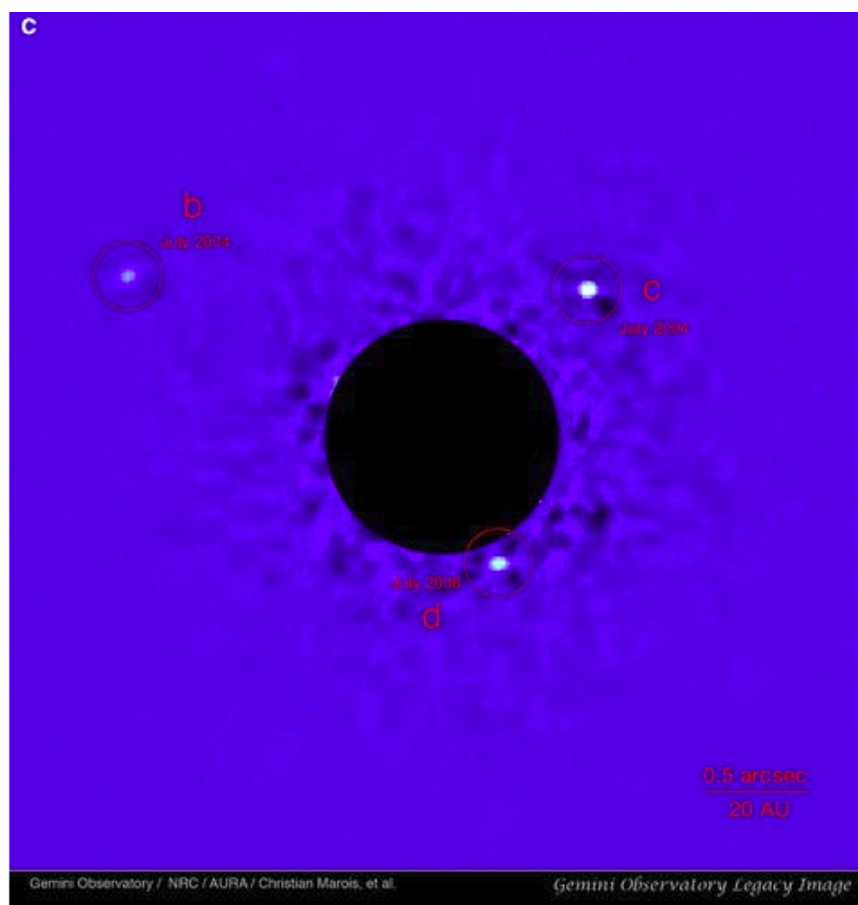
### B.3 IMAGEAMENTO DIRETO

O imageamento direto é a detecção de exoplanetas através da observação do céu por meio de telescópios.

Diferentemente dos dois métodos anteriores, o imageamento direto é útil para detectar planetas mais afastados da estrela hospedeira visto que assim não é ofuscado pelo brilho do corpo principal. Assim, este método facilita a detecção de pontos flutuantes, ou seja, os planetas que não são associados à estrelas, mas que ainda estão quente, pois a detecção é feita através de ondas na frequência do infravermelho.

A [Figura 63](#) mostra o sistema HR 8799 no qual é possível observar os corpos b, c e d através da técnica do imageamento direto.

Figura 63 – Imagem do sistema HR 8799.



Fonte: Kitchin (2012).

#### B.4 MICROLENTE GRAVITACIONAIS

Esta subseção tem como referência o artigo intitulado "On the Track of Alien Planets – Gravitational Microlensing ( 2.3% of All Exoplanet Primary Discoveries)" do autor Chris Kitchin.

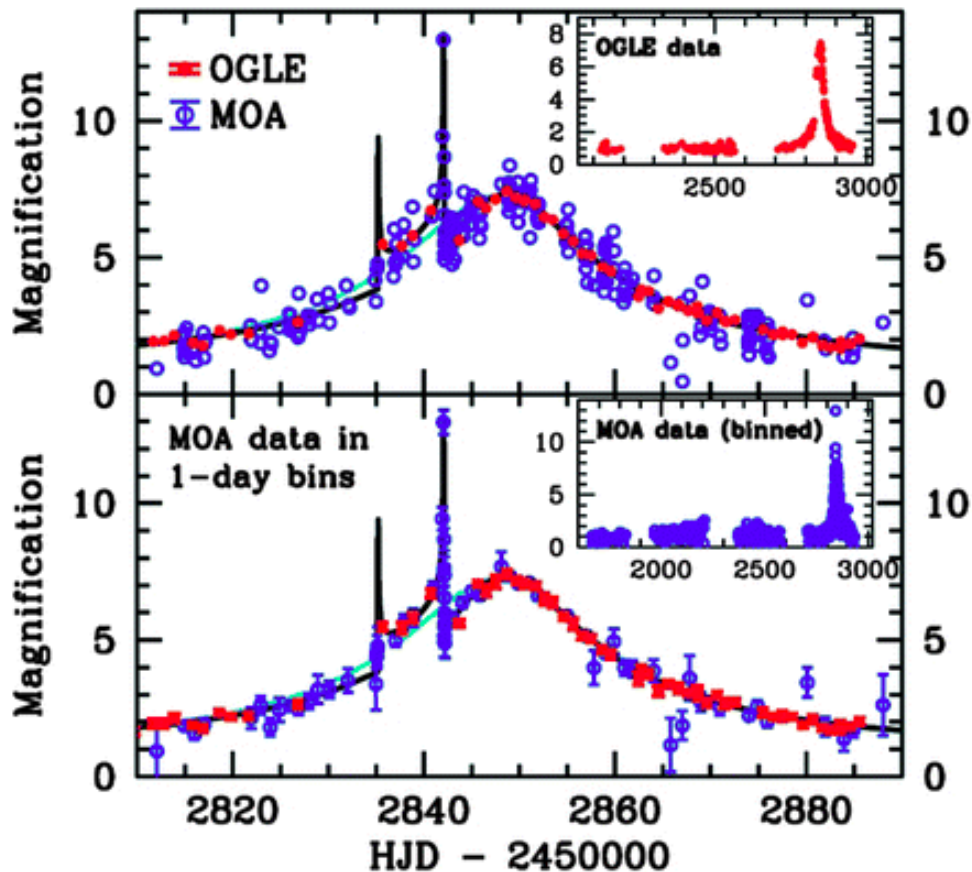
A microlente gravitacional é um método de detecção de exoplanetas que exige fotometria, ou seja, uma medida direta da quantidade de luz que chega no detector. O método consiste em um aumento do brilho de uma estrela causada pelo desvio de sua luz devido ao campo gravitacional de uma segunda estrela mais próxima do observador. Deste modo, para que seja possível empregar a técnica, é necessário que haja um alinhamento entre duas estrelas.

Quando a estrela mais próxima do observador possui um planeta em seu sistema, o campo gravitacional deste planeta também influencia na trajetória da luz da primeira estrela, a mais afastada, causando ondulações que são capturadas por telescópios e desta forma é possível detectar exoplanetas em sistemas extrassolares.

Os planetas OGLE-2006-BLG-109 L b e OGLE-2006-BLG-109 L c que possuem massas iguais a  $0.73M_J$  e  $0.27M_J$ , respectivamente, sendo  $M_J$  a massa do corpo dada em termos da massa do planeta Júpiter, foram detectados pelo método de microlentes gravitacionais pelo projeto OGLE. De acordo com o autor, planetas pequeno como por exemplo os terrestres são possíveis de serem detectados através do método de microlentes gravitacionais.

A [Figura 64](#) mostra uma curva de luz detectada pelo método de microlente gravitacional no ano de 2003, sendo que as ondulações observadas permitem a detecção do exoplaneta. A curva vermelha foi a obtida pelo projeto OGLE, e a curva em azul foi obtida pelo projeto MOA, que significa "Observação de microlentes em astrofísica", da sigla em inglês.

Figura 64 – Curva de luz obtida através do método de microlentes gravitacionais em uma observação realizada em 2003. A curva em azul ffoi obtida pelo projeto MOA e a curva em vermelho, pelo projeto OGLE.



Fonte: Kitchin (2012).