

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

TIAGO FRANCISCO LINS LEAL PINHEIRO

Estudo da *sailboat* para sistemas binários

Guaratinguetá

2016

Tiago Francisco Lins Leal Pinheiro

Estudo da *sailboat* para sistemas binários

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

Orientador: Profº Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá
2016

Pinheiro, Tiago Francisco Lins Leal
L654e Estudo da sailboat para sistemas binários / Tiago Francisco Lins Leal
Pinheiro– Guaratinguetá, 2016.
57 f.: il.
Bibliografia: f. 53

Trabalho de Graduação em Bacharelado em Física – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair

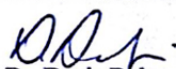
1. Planetas - Orbitas 2. Sistema binário (Matematica) 3. Metodos de
simulação I. Título .

CDU 523.

Tiago Francisco Lins Leal Pinheiro

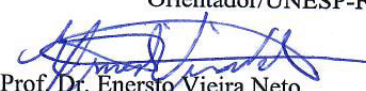
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM BACHARELADO EM FÍSICA"

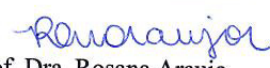
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM FÍSICA


Prof. Dr. Denis Dalmazi
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Rafael Sfair
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Enersto Vieira Neto
UNESP-FEG


Prof. Dra. Rosana Araujo
UNESP-FEG

Dezembro e 2016

DADOS CURRICULARES

TIAGO FRANCISCO LINS LEAL PINHEIRO

NASCIMENTO 03/06/1993 - Lorena / SP

FILIAÇÃO Roberto Carlos Pinheiro
Jurema Lins Leal Pinheiro

2012 / 2016 Bacherelado em Física
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

2011 Bacherelado em Engenharia de Produção
Centro Universitário Salesiano de São Paulo - UNISAL

2008 / 2010 Ensino Médio
Instituto Santa Teresa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Sfair que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais Roberto Carlos Pinheiro e Jurema Lins Leal Pinheiro, e irmãos Maria Teresa, Daniel, Gabriel e Rafael, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

RESUMO

A *sailboat* é uma região estável de partículas localizadas entre a órbita de Plutão e Caronte. Ela possui características muito peculiares e foram estudadas minuciosamente por Winter et al. (2014) com o objetivo de descobrir quais os riscos esta região poderia trazer para a missão New Horizons. Os autores confirmaram a estabilidade da *sailboat* através de superfícies de seção de Poincaré. Para um entendimento mais profundo da *sailboat*, neste trabalho foram criados sistemas binários hipotéticos. Estabelecendo a massa (m_p) e raio (r_p) do corpo primário são iguais a de Plutão e variou-se a razão de massa do sistema, no intervalo $\mu = [0.05, 0.70]$. No corpo secundário o raio utilizado foi idêntico ao de Caronte $r_s = 610$ km com órbitas circulares ou excêntrica, dependendo da simulação. Para a distância de separação dos dois corpos (d), também foi adotado a mesma do sistema Plutão-Caronte. As simulações numéricas foram feitas utilizando o integrador Radau 15 (EVERHART, 1985), onde considerou-se que as partículas (sem massas) sofrem a perturbação do binário mas não alteram a órbita dos corpos massivos. O tempo de integração adotado foi de 10^4 períodos orbitais (6500 dias, o mesmo da binária Plutão-Caronte). Os resultados das simulações mostraram que a existência desta região se limita a μ entre 0.05 e 0.27, esta região é formada inicialmente além de $0.5d$, porém se aproxima do corpo primário a medida que μ cresce. Quando a razão de massa está entre 0.28 e 0.29 duas novas regiões estáveis surgem, uma situada além de $0.6d$ e se estende a distância superior a $0.8d$ e outra região localizada em aproximadamente $0.45d$ e de partículas com alta excentricidade, acima 0.6. Com um pequeno aumento na razão de massa estas duas regiões se misturam com a *sailboat*, formando uma única região. As simulações mostram também que pequenos incrementos na excentricidade do corpo secundário causam uma redução significativa no tamanho desta região dentro diagrama de condições iniciais ($a \times e$). O tamanho da *sailboat* possui um comportamento inversamente proporcional quando é relacionado μ com a inclinação máxima das partículas. Os resultados mostram que esta região existe dentro de dois intervalos estreitos de ω (ao redor de 0° e 180°) onde sua extensão é máxima.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Binários. Região Estável. Elementos Orbitais.

ABSTRACT

The *sailboat* is a stable region of particles located between the orbits of Pluto and Charon, this region has peculiar features and were studied in detail by Winter et al. (2014) with the goal to discover what the risk this region could cause for the New Horizons's mission. The authors checked the stability of the *sailboat* through the Poincaré surface of section. To a deeper understanding of the *sailboat*, in this project has been created hypothetical binary systems. Setting the mass (m_p) and radius (r_p) of the primary body equals to Pluto. Varying the mass ratio of the system, since $\mu = [0.05, 0.70]$, in the second body the radius adopted was identical to the Charon $r_s = 610$ km and it had a circular or eccentric orbit, depending of the simulation. The separation distance (d) between two bodies was adopted the same of Pluto-Charon system. We numerically integrated the orbits using the Radau 15 (EVERHART, 1985), where it was considered that the massless particles were disturbed by the binary but it can't change the orbit of massive bodies. The time span adopted was 10^4 orbital periods (6500 days, the same as the binary Pluto-Charon). The results of the simulation showed that the existence of this region is limited within μ between 0.05 and 0.27, this region is initially formed beyond to $0.5d$, however, it get closer to the primary body when the μ grows. When a mass ratio is between 0.28 and 0.29 two new stable regions arised, one situated beyond $0.6d$ and extends to a distance greater than $0.8d$ and another region located at approximately $0.45d$, but has high eccentricity, above 0.6. With a small increase in mass ratio these two regions mixed with a sailboat, forming a single region. The simulations show that small increments in eccentricity of the secondary body cause a significant reduction in the size of this region in the initial condition diagram ($a \times e$). The size of the *sailboat* has a behavior inversely proportional when it is related μ and the maximum inclination of the particles. The results show that this region exists within two narrows intervals of ω (around of 0° and 180°) where its extension is maximum.

KEYWORDS: Binary Systems. Stable Region. Orbital Elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Diagrama de condições iniciais estáveis ($a \times e$) para o caso plano mostrando a <i>sailboat</i>	16
Figura 2	Distribuição dos sistemas estelares binários catalogados ($\mu \times a/r_p$).	19
Figura 3	Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.05 até 0.10.	24
Figura 4	Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.11 até 0.16.	25
Figura 5	Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.17 até 0.22.	26
Figura 6	Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.23 até 0.28.	27
Figura 7	Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.29 até 0.34.	28
Figura 8	Excentricidade do corpo secundário máxima onde existe a <i>sailboat</i> pela razão de massa do sistema binário hipotético	29
Figura 9	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.05$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.	30
Figura 10	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.11$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.	31
Figura 11	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.27$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.	31
Figura 12	Gráfico da inclinação máxima das partículas onde existe a <i>sailboat</i> pela razão de massa do sistema binário hipotético.	32
Figura 13	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.05 e 0.07.	33
Figura 14	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.08 e 0.10.	34
Figura 15	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.11 e 0.13.	34
Figura 16	Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.14 e 0.16.	35

Figura 17	Diagrama de condições iniciais (a x e) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.17 e 0.19.	35
Figura 18	Diagrama de condições iniciais (a x e) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.20 e 0.22.	36
Figura 19	Diagrama de condições iniciais (a x e) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.23 e 0.25.	36
Figura 20	Diagrama de condições iniciais (a x e) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.26 e 0.27.	37
Figura 21	Gráfico do valor absoluto do intervalo do argumento do pericentro em torno de 0° e 180° das onde existe a <i>sailboat</i> pela razão de massa do sistema binário hipotético	38
Figura 22	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.05$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 70$ (parte inferior).	39
Figura 23	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.06$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 30$ (parte inferior).	39
Figura 24	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.07$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 35$ (parte inferior).	40
Figura 25	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.08$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 30$ (parte inferior).	40
Figura 26	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.09$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 25$ (parte inferior).	41
Figura 27	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.10$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 25$ (parte inferior).	41
Figura 28	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.11$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	42
Figura 29	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.12$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	42
Figura 30	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.13$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	43
Figura 31	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.14$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	43
Figura 32	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.15$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	44
Figura 33	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.16$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	44
Figura 34	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.17$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	45
Figura 35	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.18$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	45
Figura 36	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.19$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).	46

Figura 37	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.20$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	46
Figura 38	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.21$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	47
Figura 39	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.22$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	47
Figura 40	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.23$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	48
Figura 41	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.24$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	48
Figura 42	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.25$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	49
Figura 43	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.26$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	49
Figura 44	Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.27$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).	50
Figura 45	Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.35 até 0.40.	54
Figura 46	Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.41 até 0.46.	55
Figura 47	Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.47 até 0.54.	56
Figura 48	Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.56 até 0.66.	57
Figura 49	Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.68 e 0.70.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento dos dados dos planetas anões e outros corpos menores do Sistema Solar e seus satélites.	20
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
U.A.	Unidade Astronômica
Km	quilometro
kg	quilograma

LISTA DE SÍMBOLOS

a	semieixo maior
e	excentricidade
d	separação entre os dois corpos massivos do sistema binário
μ	razão de massa
ω	argumento do pericentro
I	inclinação
r_p	raio do corpo principal
r_s	raio do corpo secundário
m_p	massa do corpo principal
m_s	massa do corpo secundário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	SISTEMA BINÁRIOS	18
2.1	Sistema binários de Estrelas	18
2.2	Sistemas binários no Sistema Solar	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Criação de sistemas binários hipotéticos	21
3.2	Sistemas binários hipotéticos com diferentes valores de condições iniciais	22
4	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA <i>SAILBOAT</i>	23
4.1	Variação da Razão de Massa (μ) dos Sistemas Hipotéticos	23
4.2	Variando a excentricidade do corpo secundário	29
4.3	Variando a inclinação (I) das partículas	32
4.4	Variando argumento do pericentro (ω) das partículas	37
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DE CONDIÇÕES INICIAIS ($A \times E$), PARA OS SISTEMAS BINÁRIOS HIPOTÉTICOS COM $\mu = [0.35, 0.7]$	54

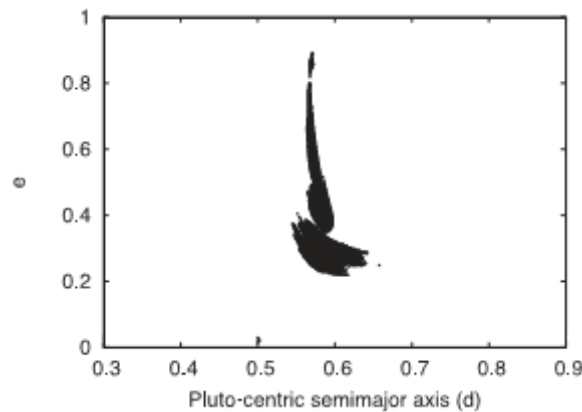
1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de analisar as regiões de estabilidade de partículas no sistema Plutão-Caronte antes da chegada da sonda New Horizons, Winter et al. (2010) realizaram diversas simulações numéricas para determinar possíveis regiões estáveis de partículas do tipo S (onde as partículas orbitam ao redor de um dos corpos mais massivos do sistema).

Neste sistema a razão de massa é $\mu = 0.1165$ e a distância de separação entre os corpos é $d = 19571\text{km}$; o raio de Caronte é aproximadamente duas vezes menor do que Plutão e sua excentricidade é 0.0035, porém também foi simulado considerando Caronte em órbita circular ao redor de Plutão. Para obter o diagrama de estabilidade, os autores estabeleceram aproximadamente 70 000 condições iniciais de partículas distribuídas uniformemente entre Plutão e Caronte, com diferentes valores de semieixo maior e excentricidade. As partículas possuíam inclinação 0° (órbitas prógradas) e 180° (órbitas retrógradas).

Entre os resultados foram identificado quatro regiões estáveis ao redor de Plutão, sendo que em duas delas as partículas possuíam órbitas retrógradas. Das regiões de órbitas prógradas, foi identificada uma região peculiar, situada em $a \approx (0.5d, 0.7d)$ e $e \approx (0.2, 0.9)$, sendo a e e os valores iniciais de semieixo maior e excentricidade das partículas, respectivamente. O formato desta região assemelha-se ao de um barco a vela dentro do diagrama de condições iniciais ($a \times e$), por esse motivo ela foi denominada de *sailboat*, como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de condições iniciais estáveis ($a \times e$) para o caso plano mostrando a *sailboat*.



Fonte: Winter et al. (2014).

Um estudo detalhado da *sailboat* para o sistema Plutão-Caronte foi realizado por Winter et al. (2014). Primeiramente foram simuladas numericamente uma amostra de partículas coplanares a Plutão e perturbadas gravitacionalmente por Caronte, configurando um problema restrito de de três corpos (pois assumiu-se que os satélites Nix, Hidra, Kerberos e Styx não alteram a dinâmica das partículas). As simulações numéricas cobriram uma região de $0.5d$ até $0.75d$, excentricidade desde 0 até 0.99, com um tempo de integração de 10^4 períodos orbitais de Caronte (65 000 dias). Os autores utilizaram o integrador Radau 15 (EVERHART, 1985). Os resultados do artigo confirmaram que a *sailboat* existe para o intervalo de semieixo principal igual a $0.5d$ até $0.7d$, com a excentricidade variando entre 0.2 a

0.9. Os autores também usaram do método de superfície de Poincaré para comprovar a estabilidade da trajetória das partículas.

No diagrama $(a \times e)$ da Figura 1 não aparece, a outra região estável presente no sistema Plutão-Caronte, localizada entre $a = (0.3d, 0.5d)$, pois nesse trabalho apenas a *sailboat* foi analisada.

Também foi analisada a extensão da *sailboat* para diferentes valores de inclinação (I) e argumento do pericentro (ω) das partículas. Primeiramente foi assumido a partícula no mesmo plano da binária e variou-se o ω , mostrando que a *sailboat* sobrevive em dois diferentes estreitos intervalos: $\omega = [10^\circ, -10^\circ]$ e $\omega = [160^\circ, 200^\circ]$, sendo o tamanho máximo da região ocorre para os valores de $\omega = 0^\circ$ e 180° . Já o estudo da inclinação mostrou que a *sailboat* existe para $I \leq 90^\circ$ tanto para ω igual a 0° ou 180° . No caso da inclinação a Winter et al. (2013) mostrou que *sailboat* é a região estável mais resistente do sistema.

Estes resultados foram combinados em outro artigo Winter et al. (2015) com objetivo de fornecer subsídios para determinação de trajetórias seguras para a missão New Horizons. A sonda passou próximo a esta região em 14 de julho de 2015.

2 SISTEMA BINÁRIOS

A descoberta da *sailboat* no sistema Plutão-Caronte, fomentou a ideia de que esta região também poderia estar presente em outros sistemas binários que apresentam características semelhantes, como os sistemas de estrelas binárias, e planetas anões e seus satélites. Por ser uma região de estável a *sailboat* pode conter partículas ou corpos menores remanescentes de um processo colisional, sendo assim de tais sistema poderiam ter exoplanetas, pequenos satélites naturais ou até mesmo um sistema de anéis situados nesta região.

2.1 SISTEMA BINÁRIOS DE ESTRELAS

Se duas estrelas orbitam em torno de um centro de massa comum são chamadas de estrelas binárias. Segundo British Astronomical Association (2015) é possível que mais que 50% dos sistemas estelares sejam binários.

Os sistemas estelares são separados por meio de três diferentes tipos de estrelas binárias na Figura 2: em verde os sistemas do tipo semi destacado (onde uma de suas estrelas possui o seu lóbulo de Roche preenchido, por esse motivo há transferência de massa entre as elas); em vermelho são os sistemas classificados como de contato (quando as duas apresentam seus lóbulo de Roche preenchidos, portanto também havendo transferência de massa entre elas); por último em azul são as do tipo destacado (onde nenhuma delas possuem os seus lóbulos de Roche preenchidos, sendo assim não há transferência de massa).

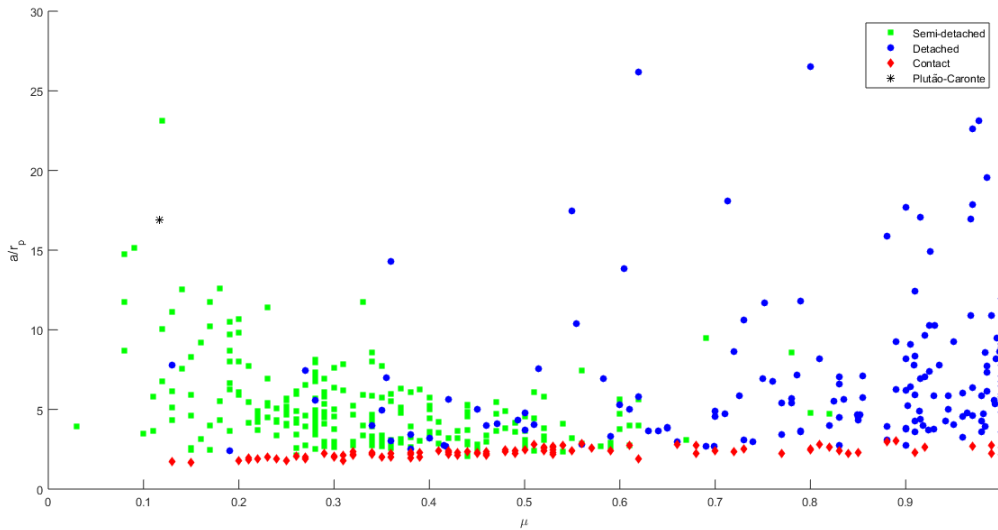
A Figura 2 mostra um levantamento de sistemas estelares binários feito a partir de diferentes catálogos: Catalog of DMS-type eclipsing binaries (Svechnikov; Perevozskina, 2004); Catalog of eclipsing binaries parameters (Brancewicz; Dworak, 1980); Catalog of early-type contact binaries (Bondarenko; Perevozskina, 1996) ; Semi-detached eclipsing binaries (Surkova; Svechnikov, 2004). Foram selecionados somente aqueles sistemas cuja separação entre os corpos era conhecida e para os quais era possível determinar a razão de massa do sistema. Os elementos orbitais são todos determinados por eclipses (nenhuma binária astrométrica), totalizando em 489 diferentes sistemas, sendo 100 estrelas do tipo contato, 232 do tipo semi-destacado e 157 do tipo de destacado.

A Figura 2 identifica os sistemas binários através de sua razão de massa (μ), definido como a razão entre a massa das estrelas, e o fator a/r_p , definido como a razão entre o semieixo maior do binário pelo raio da estrela principal (mais massiva). Para comparação, o sistema Plutão-Caronte que possui $\mu = 0.1165$ e um fator $a/r_p \approx 16.87$ e aparece no gráfico em preto.

Pela figura pode-se ver que as sistemas binários aparecem bem divididos pelo tipo da estrela, os que se possuem razão de massa menor que 0.5 são em sua maioria binário do tipo semi destacado, já os sistema com μ superior a 0.5 são praticamente todas destacado. Nota-se que a estrelas contato estão bem distribuídas em paralelo com eixo da abcissa. Também é possível observar uma separação por meio do fator a/r_p . As binárias que possuem a/r_p próximo a 1 e 2 são em sua maioria do tipo contato, isto porque os dois corpos se encontram bem próximos um dos outros, pelo mesmo motivo os sistemas

semi destacado estão quase todos compactados no fator a/r_p entre 1 e 10, já as estrelas destacado estão distribuídas pelo gráfico, não tendo uma regra geral em relação ao fator a/r_p .

Figura 2 – Distribuição dos sistemas estelares binários catalogados ($\mu \times a/r_p$).



Fonte: Autoria Própria.

As binárias da Figura 2 que estão posicionadas próximas ao sistema Plutão-Caronte, são em sua maioria do tipo semi destacado. Por haver troca de massa entre as estrelas, não se pode concluir se seria possível existir regiões estáveis de partículas (possibilitando a formação de planetas) entre as estrelas.

Contudo quatro sistemas destacado (denominados como EN Lac, V467 Per, V478 Lyr, AR Cas) aparentam serem fortes candidatos para conterem a *sailboat*, suas razões de massas compreendem entre 0.13 e 0.28 e o fator a/r_p entre 5 e 10, com exceção do binário V467 Per, que tem $\mu = 0.19$ e $a/r_p \approx 2$, dificultando a existência de zonas estáveis, já que qualquer corpo com o semieixo de até $0.5a$ neste sistema, colidiria com a estrela principal. Winter et al. (2014) mostrou que a região da *sailboat* continua existindo independentemente da distância de separação do binário, portanto apenas quando o valor de a/r_p for muito pequeno (≈ 2) ele é relevante. Apesar dos sistemas estelares terem dimensões superiores a binária Plutão-Caronte, eles são proporcionalmente semelhantes.

2.2 SISTEMAS BINÁRIOS NO SISTEMA SOLAR

Plutão e Caronte não formam o único sistema binário dentro do Sistema Solar. Outros planetas anões ou corpos menores também fazem binária com seus satélites.

É classificados como planeta anão todo corpo que órbita ao redor do Sol e tem massa suficiente para que esteja em equilíbrio hidrostático, porém não possuem a mesma eficiência dos planetas para serem dominantes em sua órbita, isto é não têm as proximidades da sua órbita desimpedidas.

A tabela 2.1 mostra um levantamento com dados dos principais candidatos e planetas anões do Sistema Solar. Ela mostra os valores do semieixo maior do satélite pertencente ao planeta anão (a), a razão entre este semieixo maior e o raio do planeta e a razão de massa do sistema. Alguns sistema

marcados pelo símbolo (*) indica que sua razão de massa foi calculada admitindo que o satélite possui a mesma densidade do planeta e sua forma é esférica.

Tabela 1 – Levantamento dos dados dos planetas anões e outros corpos menores do Sistema Solar e seus satélites.

Sistema	a (km)	a/r_p	μ
Plutão-Caronte	19.571	16,87	0.1165
Éris-Disnomia	37.580	32,31	0,0108*
Makemake-S/2015 (136472) 1	>21.100	>29,51	0,0018*
Haumea-Namaka	25.657	37,21	$6,8846 \times 10^{-04}$
Haumea-Hiiaka	49.880	72,34	$6,8846 \times 10^{-03}$
Orco-Vanth	9.030	19,68	0,0265*
Quaoar-Weywot	13.800	25,79	0,0004*
(55637) 2002 UX25-S/2007 (55637) 1	4.770	14,35	0,0318*
Salácia-Actaea	5.619	13,16	0.0425
Varda-IImare	4.800	13,62	0,1181*

Fonte: Johnston (2016)

Dos planetas anões presente na Tabela 1, três sistemas são bons candidatos para possuírem a *sailboat*: (55637) 2002 UX25-S/2007 (55637); Salácia-Actaea e Varda-IImare. Os sistemas (55637) 2002 UX25-S/2007 (55637) e Salácia-Actaea são objetos transnetuniano e ambos estão localizados no cinturão de Kuiper.

(55637) 2002 UX25 é um possível planeta anão com aproximadamente 665 km de e com densidade de 0.82 g/cm^3 e um dos maiores corpos do sistema solar com densidade menor do que da água (BROWN, 2013).

Salácia é outro possível planeta anão com o diâmetro de 854 km e densidade 1.29 g/cm^3 , também classificado como Cubewano. Apesar desse dois sistemas citados terem suas razões de massa um pouco baixa em comparação com de Plutão-Caronte, neste trabalho mostrou que a *sailboat* pode existir em sistema com valores de μ bem próximos a estes.

A binária Varda-IImare é a binária mais compatível com Plutão-Caronte, sendo seus parâmetros de $\mu = 0.1181$ e $a/r_p = 13.62$, um forte candidato a conter a *sailboat*. Varda é um transnetuniano, possui 705 km de diâmetro e densidade igual a 1.27 g/cm^3 , já IImare tem um tamanho de 361 km (aproximadamente metade do tamanho de Varda) e segundo Grundy et al. (2015) ambos possui a mesma densidade e com período orbital de 5.75 dias, também semelhante ao de Plutão-Caronte (≈ 6.5 dias).

Com propósito de determinar as condições de existência da *sailboat*, no capítulo 3 é mostrado o método utilizado na pesquisa, criando diversos sistemas binários hipotéticos com seus diferentes parâmetros de razão de massa e elementos orbitais. No capítulo 4 são discutidos os principais resultados obtidos nas simulações numéricas, quais seriam as razões de massa onde é possível identificar a *sailboat*. Nos itens 4.2, 4.3 e 4.4, explora a robustez desta região em relação as variações da excentricidade do corpo secundário, da inclinação e do argumento do pericentro das partículas. Por fim na capítulo 5 está presente na conclusão.

3 METODOLOGIA

3.1 CRIAÇÃO DE SISTEMAS BINÁRIOS HIPOTÉTICOS

Para entender a natureza *sailboat* foram criados sistemas binários hipotético com diferentes valores de razão de massa e parâmetros orbitais.

A criação dos sistemas binários hipotéticos foram feitas fixando a massa (m_p) e raio (r_p) do corpo primário (corpo central) igual ao de Plutão (Buie et al., 2006), sendo:

$$m_p = 1.304 \times 10^{22} \text{ kg} \quad (1)$$

$$r_p = 1160 \text{ km} \quad (2)$$

Variando a massa do corpo secundário (m_s) de acordo com a razão de massa (equação 3) do sistema (Buie et al., 2006)

$$\mu = \frac{m_s}{m_p} \quad (3)$$

desde $\mu = 0.05$ até $\mu = 0.50$, inicialmente com intervalos de $\Delta\mu = 0.01$ e para os valores de μ entre 0.50 e 0.70 com $\Delta\mu = 0.02$. No corpo secundário o raio utilizado era idêntico ao de Caronte (Buie et al., 2006)

$$r_s = 610 \text{ km} \quad (4)$$

com excentricidade, inclinação e argumento do pericentro iguais a zero.

A distância de separação entre os dois corpos também foi adotado a mesma do sistema Plutão-Caronte ($d = 19571 \text{ km}$). As simulações numéricas foram utilizando-se do integrador Radau 15 (EVERHART, 1985) onde considerou-se que as partículas teste (sem massa) sofrem a perturbação apenas do binário, mas não alteram a órbita dos corpos massivos (problema restrito de três corpos).

Foram feitos para cada simulação um diagramas de condições iniciais de semieixo maior (a) por excentricidade (e). O tempo de integração adotado era de 10^4 períodos orbitais (6500 dias, o mesmo da binária Plutão-Caronte), uma vez que Holman e Wiegert (1999) e Winter e Vieira Neto (2001) mostram que este intervalo de tempo é suficiente para definir uma partícula como estável. Na região simulada as partículas foram distribuídas uniformemente entre 0.3d até 0.8d, com $\Delta a = 0.0008 \text{ d}$ e excentricidade de 0 até 0.99, tendo $\Delta e = 0.005$, totalizando 133008 diferentes condições iniciais.

Os valores da inclinação com relação ao plano da binário, do argumento do pericentro e do tempo de passagem pelo pericentro para as partículas utilizados nesta primeira parte da pesquisa foram iguais a zero.

Considerou-se uma colisão toda vez que um corpo se aproximava ao menos um raio de distância de um dos dois corpos mais massivos.

Todas as partículas que permaneceram com a energia negativa durante todo a simulação foram consideradas estáveis, as que atingiam a energia positiva eram ejetadas do corpo principal.

3.2 SISTEMAS BINÁRIOS HIPOTÉTICOS COM DIFERENTES VALORES DE CONDIÇÕES INICIAIS

Nesta subseção foi explorada o comportamento da *sailboat* de acordo com a variação da excentricidade do corpo secundário, da inclinação e do argumento do pericentro das partículas. Foram analisados apenas os casos desde $\mu = 0.05$ até 0.27 , intervalo determinado como de existência da *sailboat* (ver seção 4.1).

Cada sistema binário hipotético com sua respectiva razão de massa foi estudado separadamente. As condições iniciais utilizadas no item anterior são praticamente as mesmas utilizada nessa etapa, com exceção dos elementos orbitais citados acima, onde variaram seus valores com a finalidade de determinar os limites da *sailboat*.

Cada subdivisão da seção 4 subsequente mostrará reação da *sailboat* de acordo com as mudanças desses elementos orbitais. Nesta etapa cada simulação numérica as partículas estavam compreendidas entre $0.45d$ até $0.8d$, com $\Delta a = 0.0008d$ e suas excentricidade foram de 0 até 0.99 com o $\Delta e = 0.005$, totalizando mais de 93000 condições iniciais. Desta forma foi simulando praticamente apenas a região onde se encontra a *sailboat*, otimizando o tempo das simulações.

A fim de determinar o valor da excentricidade máxima do corpo secundário, onde existe a *sailboat*. Na seção 4.2 para cada diferente sistema binário hipotético foi estipulado empiricamente um valor inicial de excentricidade para o corpo secundário e por meio do diagrama de condições iniciais ($a \times e$) foi verificado a existência ou não da *sailboat*. Quando era observado o desaparecimento desta região, realizou-se várias simulações em torno deste valor de excentricidade, com variações de $\Delta e = 0.01$, com a finalidade de estabelecer a excentricidade limite do binário em relação a μ , as partículas estavam no mesmo plano binária e ω adotado era igual a 0° .

De acordo com Winter et al. (2013) no caso do sistema Plutão-Charonte as partículas da *sailboat* resistem para inclinações de até 90° . Na seção 4.3 foi analisado para cada caso de μ entre 0.05 até 0.27 a forma da *sailboat* com a inclinação das partículas em relação ao plano da binária iguais a 40° , 80° e em torno de 90° . Foram feitas varias simulações numéricas com $\Delta I = 5^\circ$, com o objetivo de descobrir o valor máximo de I para esta região.

No seção 4.4 é apresenta a extensão da *sailboat* de acordo com a mudança do argumento do pericentro das partículas, para cada um dos diferentes sistema binário estudado. Em Winter et al. (2014) descobriu-se que a *sailboat* existe em dois diferentes intervalos de ω , o primeiro $\pm 10^\circ$ em torno de 0° e o segundo de $\pm 20^\circ$ ao redor de 180° . Com o propósito de encontrar o tamanho desses dois intervalos da *sailboat* para cada um dos sistemas binários em estudo, criaram-se diversas simulações numéricas com $\Delta \omega = \pm 5^\circ$ ao redor de 0° e 180° , tendo as partículas no mesmo plano da binária.

4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA *SAILBOAT*

4.1 VARIAÇÃO DA RAZÃO DE MASSA (μ) DOS SISTEMAS HIPOTÉTICOS

Por meio da análise dos diagramas de condições iniciais ($a \times e$) é possível observar duas regiões estáveis (nas Figura 3 até Figura 7 representada em azul). A região mais próxima do corpo primário será denominada de região 1 e outra situada no meio da distância entre os dois corpos principais é a *sailboat*. Nas figuras o valor do semieixo maior das partículas estão normalizadas pela distância entre os dois corpos principais, sendo assim no eixo da abscissa em zero está localizado o corpo primário e em 1d está o corpo secundário.

A sequência de imagens a seguir ilustra em azul as partículas que permaneceram estáveis durante toda a simulação, para os casos dos sistemas binários hipotéticos com μ entre 0.05 até 0.34, as demais partículas simuladas não aparecem no diagrama, pois ou elas colidiram com um dos dois corpos principais ou escaparam do corpo principal.

Os resultados das binárias simulados com μ entre 0.35 e 0.70 estão ilustrados no apêndice, devido ao fato deles não conterem a *sailboat*, eles deixaram de serem objetos desta pesquisa.

Nas binárias onde era possível distinguir claramente a *sailboat* das outras regiões estáveis presente no diagrama ($a \times e$) (caso de $\mu = 0.05$ até 0.27), foram explorados mais profundamente, com interesse de obter os efeitos que esta região peculiar sofre com relação a mudanças de certos elementos orbitais.

A *sailboat* apresenta-se bem extensa para sistemas com pequenas razões de massa, conforme μ aumenta esta região perde excentricidade e se aproxima do corpo primário. Como pode-se se observar na Figura 3 para $\mu = 0.05$ ela é formada a uma distância além de 0.5d atingindo quase 0.75d, com excentricidade máxima próxima a de 0.9. Um acréscimo sutil em μ ela alcança uma distância um pouco maior de 0.75d (caso de $\mu = 0.07$), porém ela começa a se estreitar dentro do diagrama de condições iniciais ($a \times e$) a partir de $\mu = 0.08$.

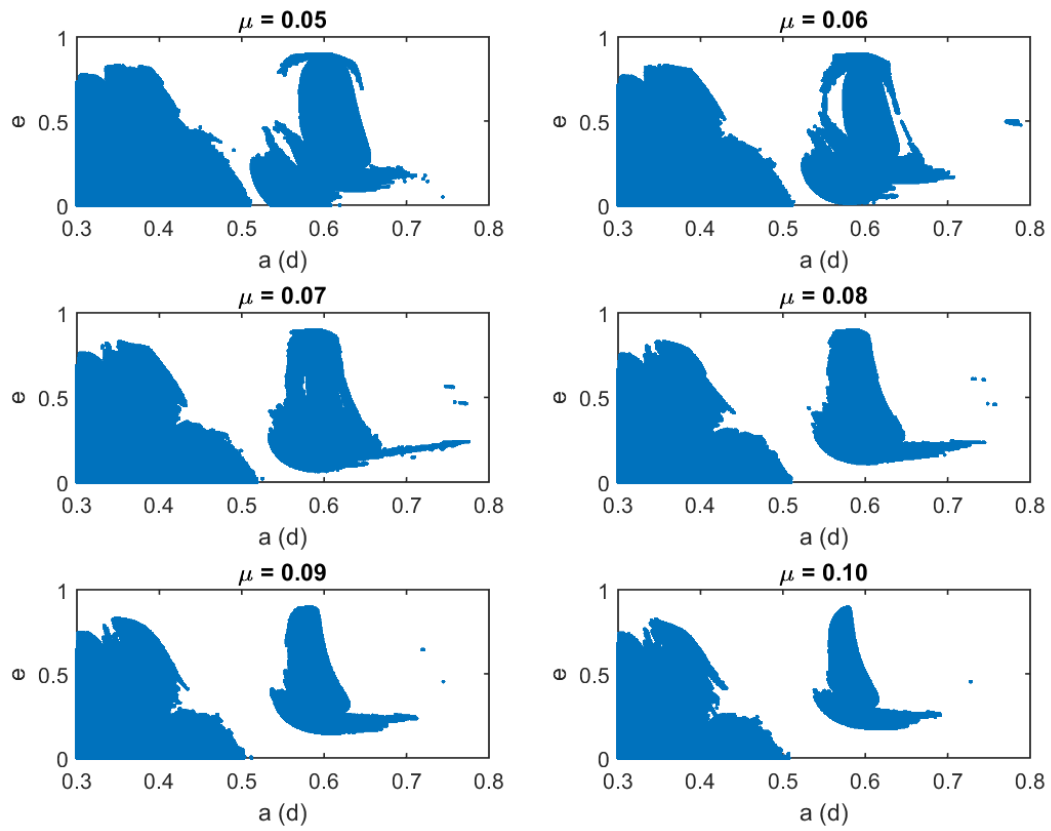
Na Figura 4 está o sistema com $\mu = 0.11$ (o binário mais semelhante de Plutão-Caronte), o resultado obtido foi semelhante ao encontrado por Winter et al. (2010), no artigo os autores simularam o caso circular de Plutão-Caronte de $\mu = 0.1165$ (ver Figura 1).

A partir de μ igual a 0.18 (Figura 5) a *sailboat* tem um decréscimo significativo na excentricidade máxima das partículas (perde a "vela"), ficando próximo de 0.7. A medida que μ cresce, a perturbação gravitacional do corpo secundário é mais intensa, desta forma as partículas estáveis se encontram mais perto do corpo primário e com excentricidades baixas.

Os resultados das simulações demonstram que esta região se delimita até para razões de massa próximo a 0.27. Na Figura 6 encontra-se o sistema $\mu = 0.28$, onde duas novas regiões estáveis surgem, uma situada além de 0.6d e se estende a distância superior a 0.8d e outra região localizada em aproximadamente 0.45d, com alta excentricidade, acima 0.6.

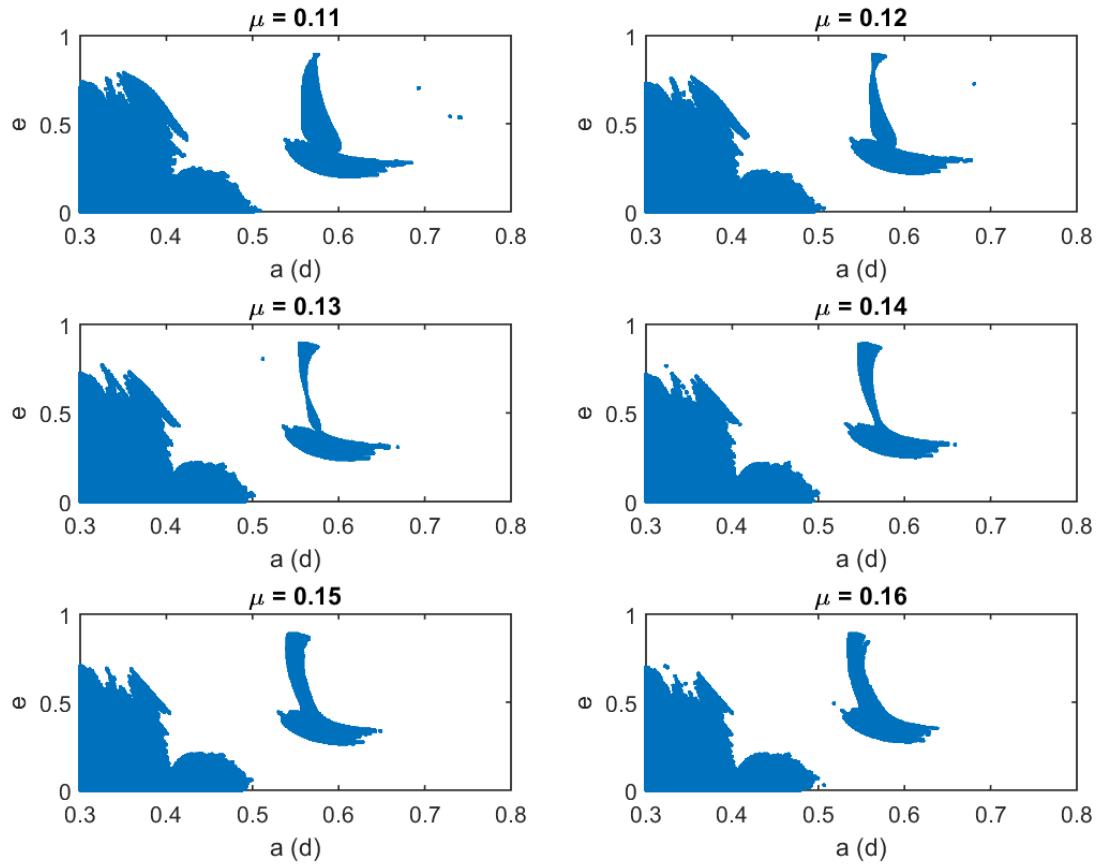
O avanço em μ faz com que essas duas regiões se unam com a *sailboat* (caso de $\mu = 0.31$, Figura 7). Esta nova região se junta com a região 1, formando uma única região estável casos de $\mu \geq 0.32$, com o aumento na razão de massa a única zona estável que permanece no sistema diminui a sua extensão e fica cada vez mais próxima do corpo primário.

Figura 3 – Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.05 até 0.10.



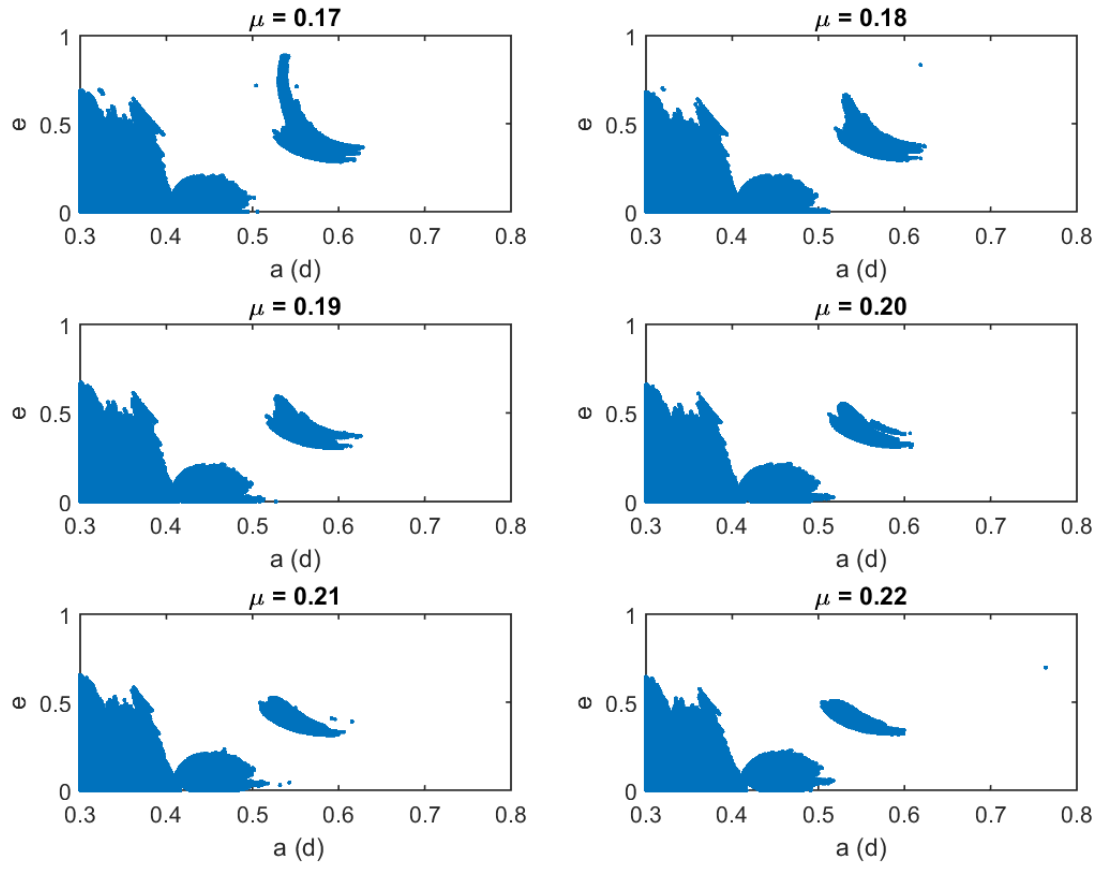
Fonte: Autoria Própria.

Figura 4 – Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.11 até 0.16.



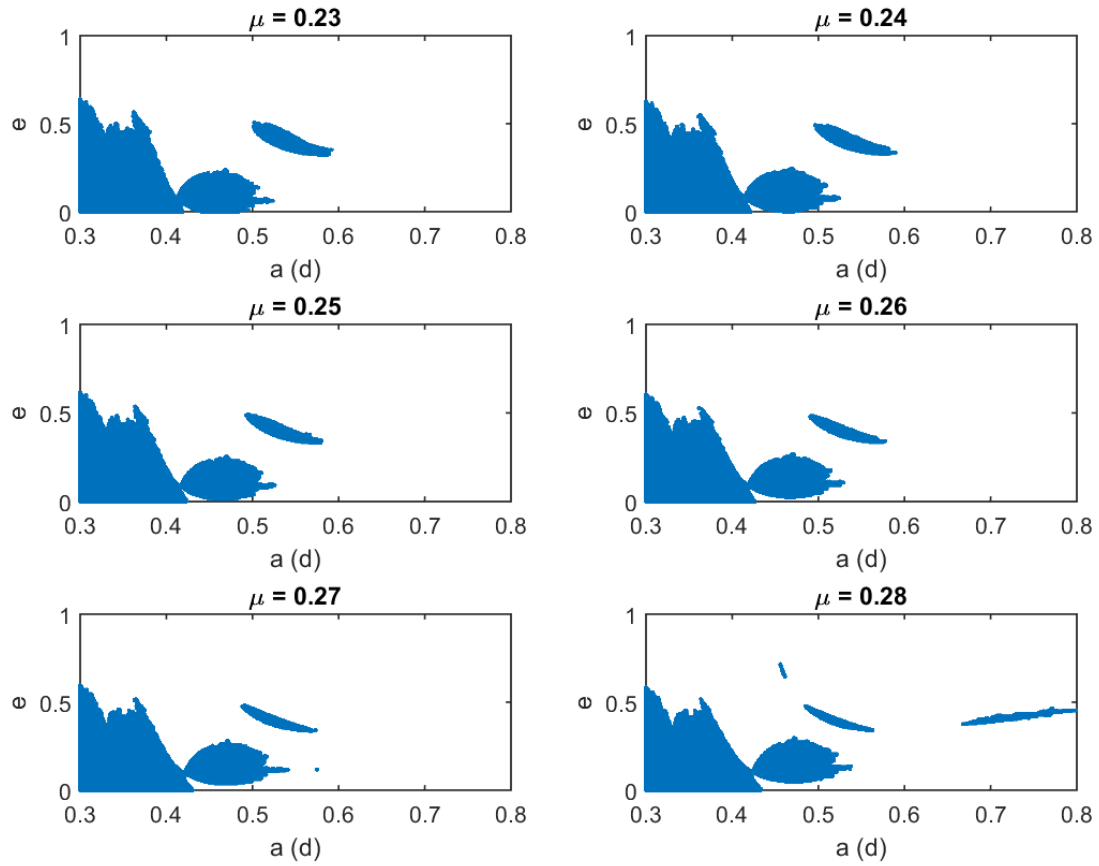
Fonte: Autoria Própria.

Figura 5 – Regiões de estabilidades (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.17 até 0.22.



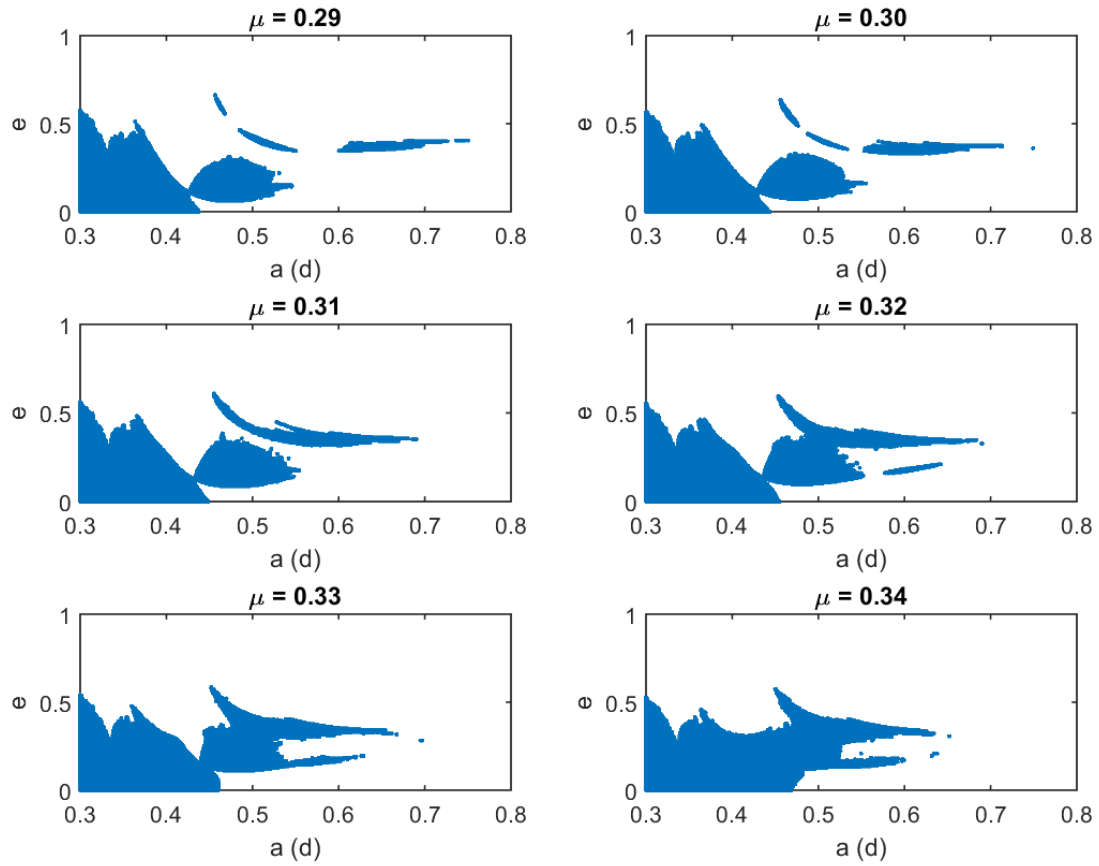
Fonte: Autoria Própria.

Figura 6 – Regiões de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.23 até 0.28.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 7 – Regiões de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.29 até 0.34.

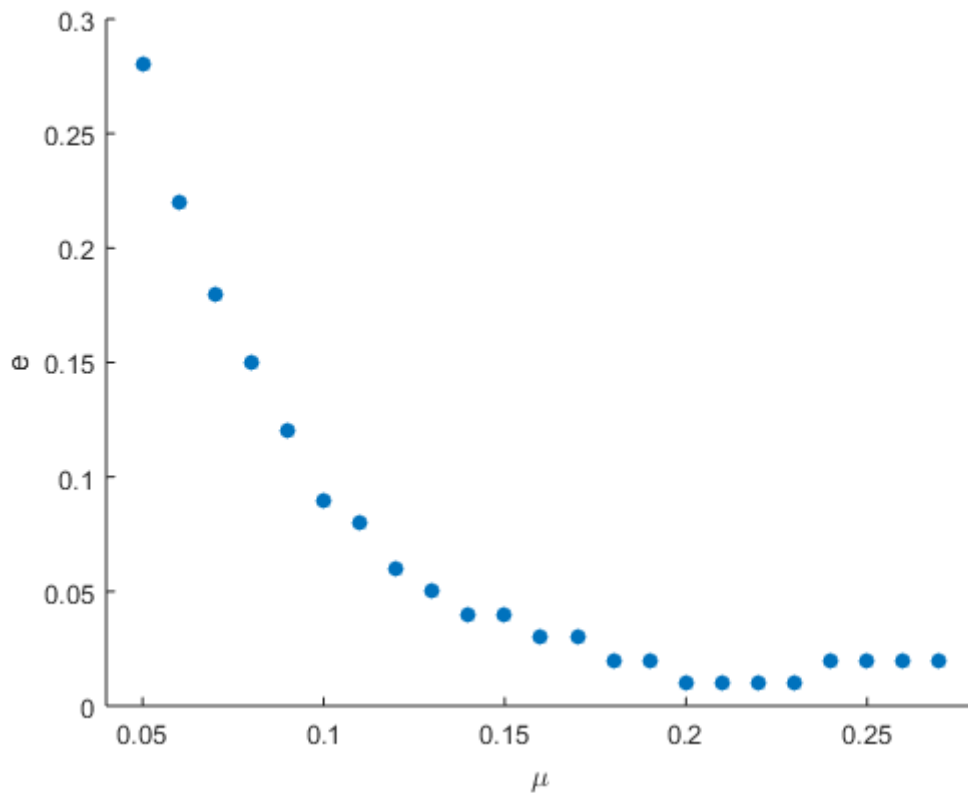


Fonte: Autoria Própria.

4.2 VARIANDO A EXCENTRICIDADE DO CORPO SECUNDÁRIO

Definido o intervalo de razões de massa de existência da *sailboat* ($\mu = [0.05, 0.27]$), foram criados novas simulações numéricas, utilizando diferentes condições iniciais, em três diferentes etapas, realizadas de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.2. A Figura 8 apresenta o valores limites da excentricidade do corpos secundário onde existe a *sailboat* em função da variação da sua razão de massa do sistema. É visível um decaimento de e conforme o aumento de μ .

Figura 8 – Excentricidade do corpo secundário máxima onde existe a *sailboat* pela razão de massa do sistema binário hipotético



Fonte: Autoria Própria.

Para $\mu = 0.05$ o maior valor da excentricidade máxima onde pode se encontrar a *sailboat* é de 0.28 e quando a razão de massa é superior a 0.1 apenas as binárias com e inferior a 10^{-1} podem conter esta região. Isso mostra que uma pequena alteração no valor da excentricidade altera drasticamente a estabilidade desta região.

As Figura 9, 10 e 11 mostram as mudanças sofridas pela *sailboat* no diagrama $(a \times e)$ com relação a excentricidade do corpo secundário, para os casos de μ iguais a 0.05, 0.11 e 0.27, respectivamente. Nessas figuras as partículas em cor preta representam as temporariamente estáveis, em vermelho as que escaparam do sistema e em verde as que colidiram com um dos dois corpos principais.

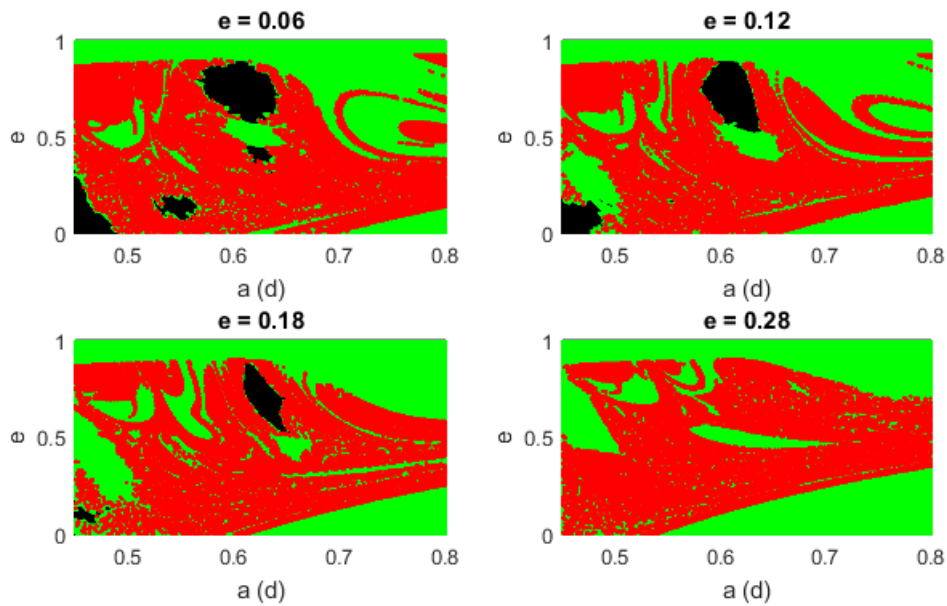
Nas figuras é possível observar que a *sailboat* é bem sensível as variações na excentricidade do binário, como por exemplo no caso de $\mu = 0.05$ (Figura 9), uma pequena mudança de 0.06 na excentricidade do sistema, quase que desaparece com toda esta região, depois ela se desfaz mais

lentamente até atingir o seu valor máximo. Também é notável que as partículas mais excêntricas da *sailboat* resistem mais as variações da excentricidade.

De maneira em geral as partículas com alta excentricidade (> 0.9) ou que estão próximas ao corpo secundário, acabam colidindo com um dos corpos principais. Já maioria das partículas com excentricidade ≤ 0.8 e as que estão a uma distância entre $0.45d$ e $0.7d$ do corpo primário, são ejetadas do sistema. As partículas que eram estáveis nos casos de sistemas menos excêntricos, com o aumento da excentricidade, possam quase todas escapam da binária.

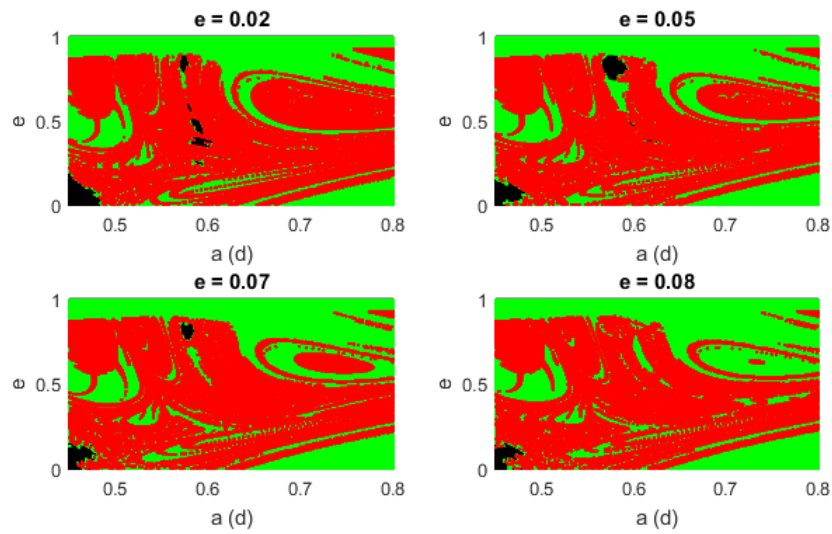
Na região da *sailboat* as partículas com as maiores excentricidades resistem mais as mudanças da excentricidade do corpo secundário. Como os sistemas binários com os menores valores de μ possuem um maior número de partículas excêntricas na *sailboat*, esses binários atingem maiores valores de excentricidade máxima para o corpo secundário.

Figura 9 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.05$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.



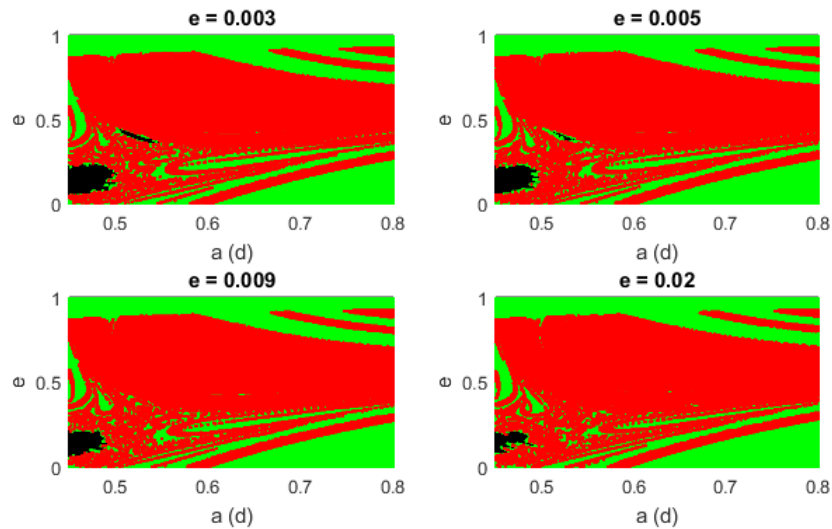
Fonte: Autoria Própria.

Figura 10 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.11$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 11 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso plano e $\mu = 0.27$ para sistemas com diferentes valores de excentricidade do corpo secundário, em verde as partículas que colidiram, em vermelhos as partículas que escaparam e em preto as partículas temporariamente estáveis.



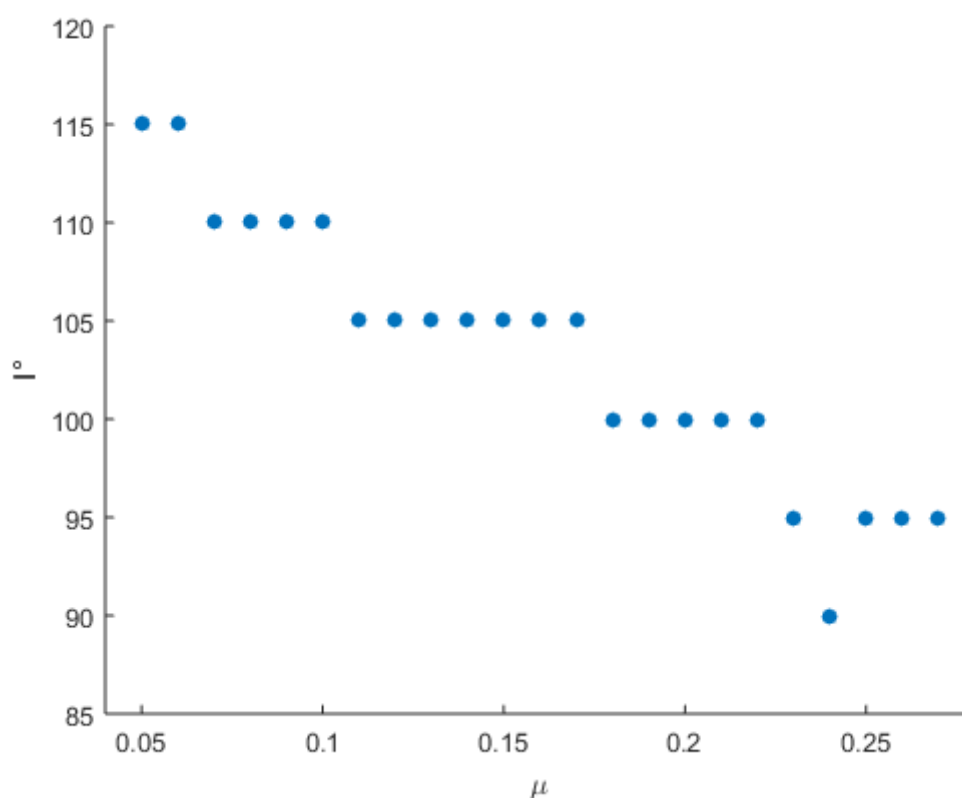
Fonte: Autoria Própria.

4.3 VARIANDO A INCLINAÇÃO (I) DAS PARTÍCULAS

Com intuito de analisar a extensão da *sailboat* em relação a variação da inclinação das partículas. Foram realizadas diversas simulações numéricas, tendo como valor inicial das partículas iguais a 40° , 80° e a partir de 90° cada simulação ganhava um acréscimo de $\Delta I = 5^\circ$ até atingir a inclinação máxima, onde existe a *sailboat*. Como descrito na seção 3.2.

Os resultados das simulações numéricas mostraram que a *sailboat* possui um comportamento inversamente proporcional com relação a inclinação máxima (I_{max}) das partículas e a razão de massa do sistema. No gráfico da Figura 12 tem se que para o sistemas com μ entre 0.23 e 0.27 a inclinação atinge o valor limite de 95° , uma pequena queda inesperada ocorre em $\mu = 0.24$, onde a inclinação máxima atinge 90° .

Figura 12 – Gráfico da inclinação máxima das partículas onde existe a *sailboat* pela razão de massa do sistema binário hipotético.



Fonte: Autoria Própria.

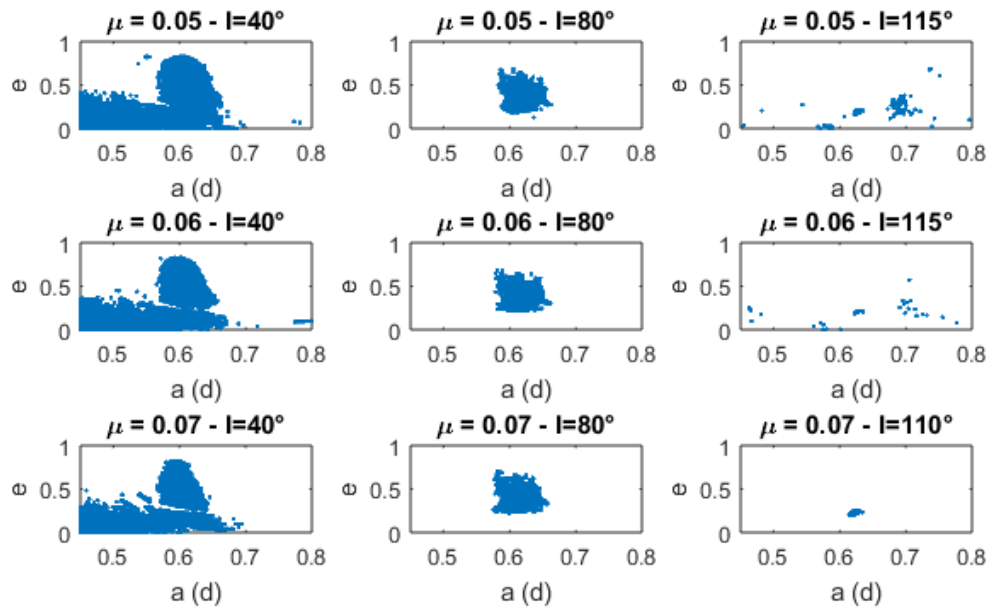
A sequência das Figura 13 até Figura 20 ilustra o tamanho da *sailboat* quando a inclinação das partículas são 40° , 80° e máxima. Por meio dessas figuras é notável que a região 1 desaparece mais rapidamente do que a *sailboat*, sendo que a inclinação é o único elemento orbital onde isso acontece. Ao atingir $I = 80^\circ$ nenhuma outra região estável permanece no sistema além da *sailboat*, resultado compatível com o encontrado por Winter et al. (2013), onde os autores mostraram que para no caso da binária Plutão-Charonte a região 1 desaparece totalmente quando a inclinação atinge 70° .

Depois de atingir o valor máximo da inclinação de sobrevivência da *sailboat*, nenhuma outra região estável permanece no sistema dentro de um certo intervalo de inclinação, após este intervalo uma nova

região de partículas estáveis com órbitas retrógradas surgem.

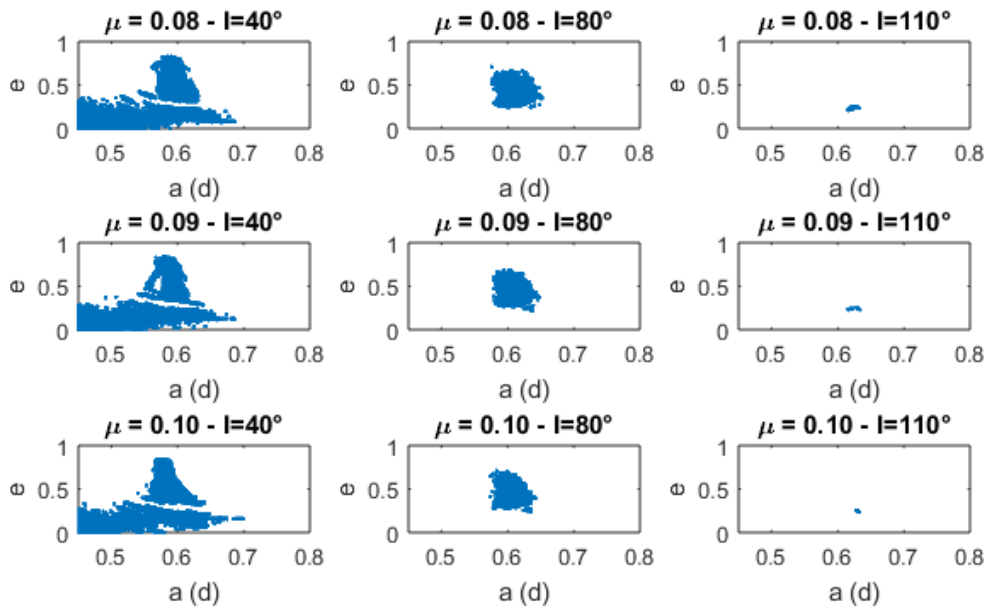
Através das figuras é possível notar que ao aumentar a inclinação das partículas, as que possuem baixa excentricidades se tornam instáveis, independentemente da razão de massa da binária. Como diferentemente da região 1, a *sailboat* possui partículas bem excêntricas, consegue resistir mais ao efeito do aumento da inclinação.

Figura 13 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.05 e 0.07.



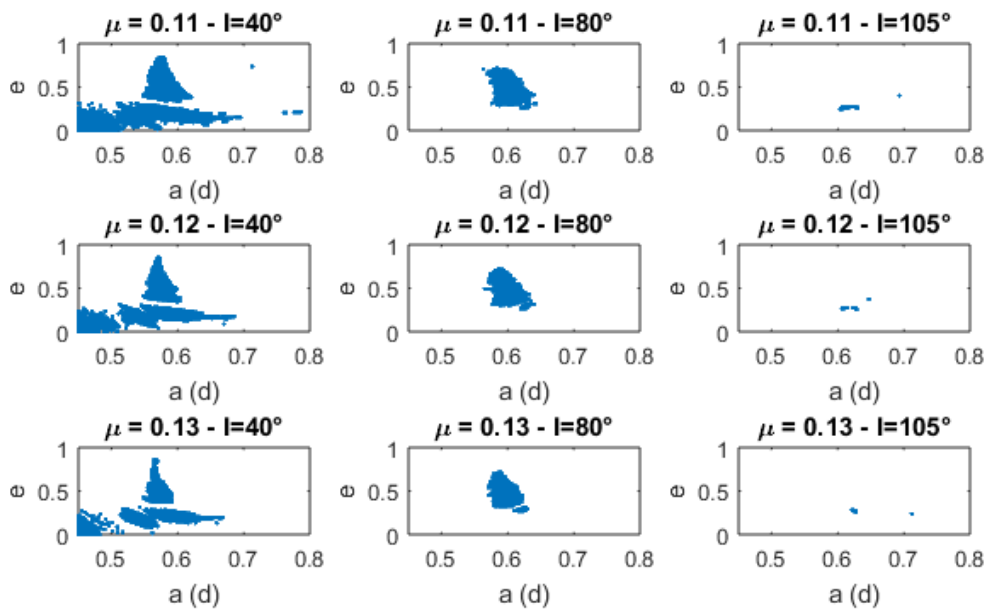
Fonte: Autoria Própria.

Figura 14 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.08 e 0.10.



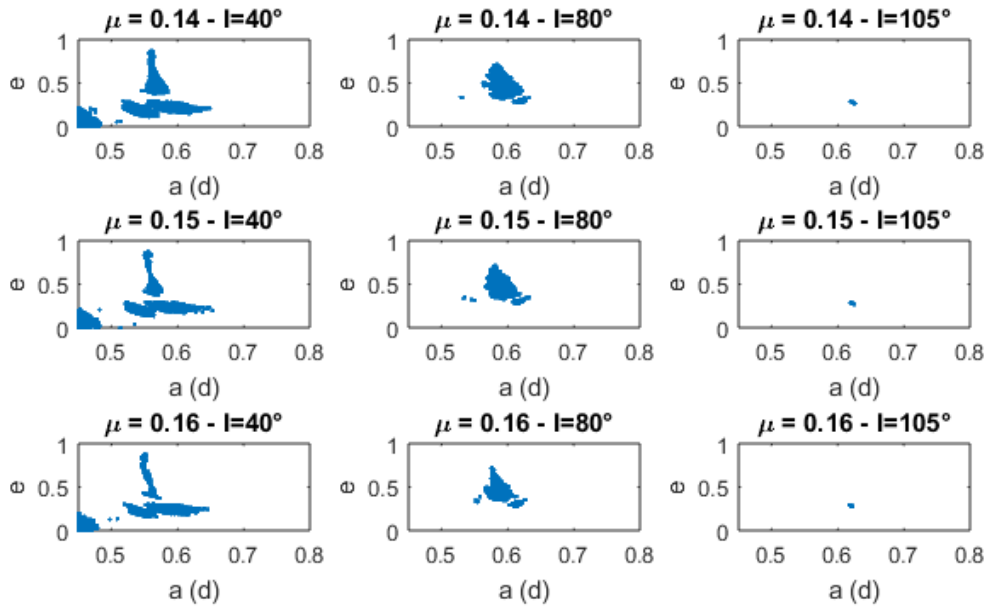
Fonte: Autoria Própria.

Figura 15 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.11 e 0.13.



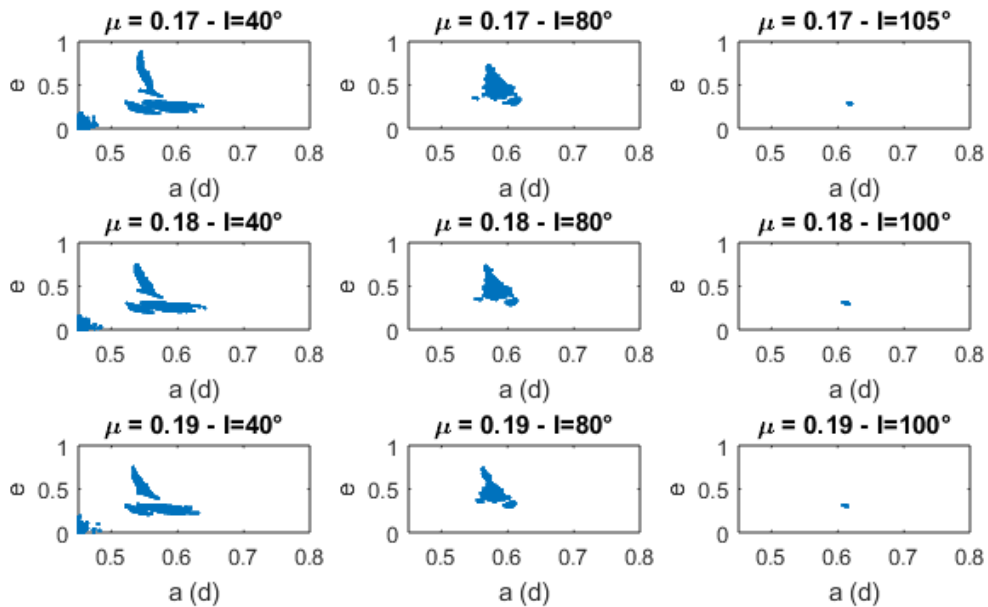
Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.14 e 0.16.



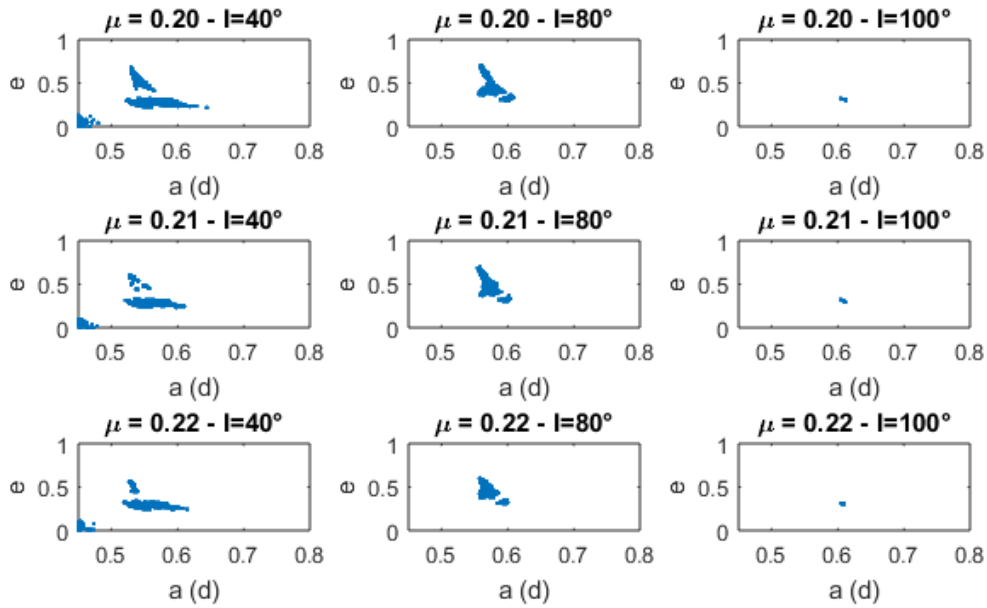
Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.17 e 0.19.



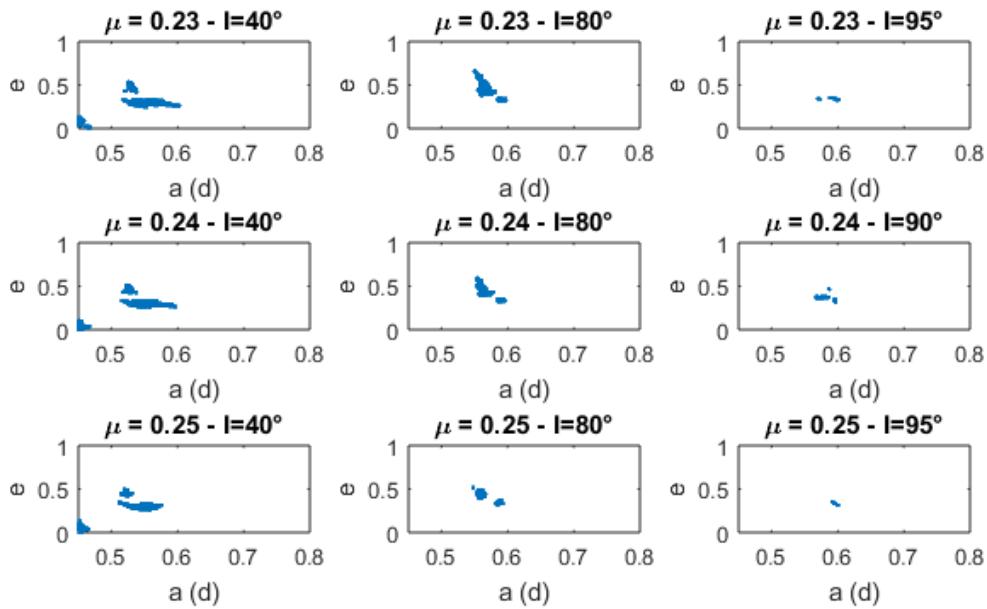
Fonte: Autoria Própria.

Figura 18 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.20 e 0.22.



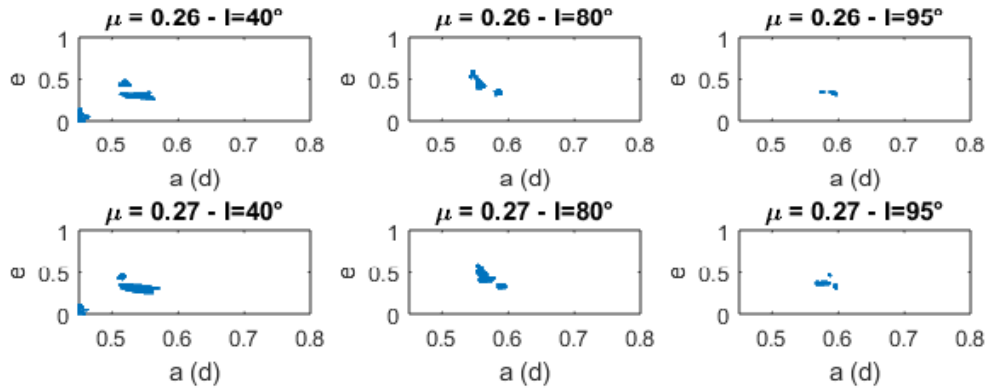
Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.23 e 0.25.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 20 – Diagrama de condições iniciais (a x e) para o caso com inclinação de 40° , 80° e de inclinação máximo, com μ entre 0.26 e 0.27.



Fonte: Autoria Própria.

4.4 VARIANDO ARGUMENTO DO PERICENTRO (ω) DAS PARTÍCULAS

Segundo Winter et al. (2014) para o sistema Plutão-Caronte com excentricidade igual a 0, a *sailboat* tem extensão máxima quando argumento do pericentro das partículas são iguais a 0° e 180° no caso coplanar.

Assumindo as partículas no mesmo plano da binária, foram realizadas diversas simulações numéricas para cada sistema binário com μ entre 0.05 e 0.27, variando o valores iniciais de ω das partículas com $\Delta\omega = \pm 5^\circ$ ao redor de 0° e 180° , até atingir a extensão mínima desta região.

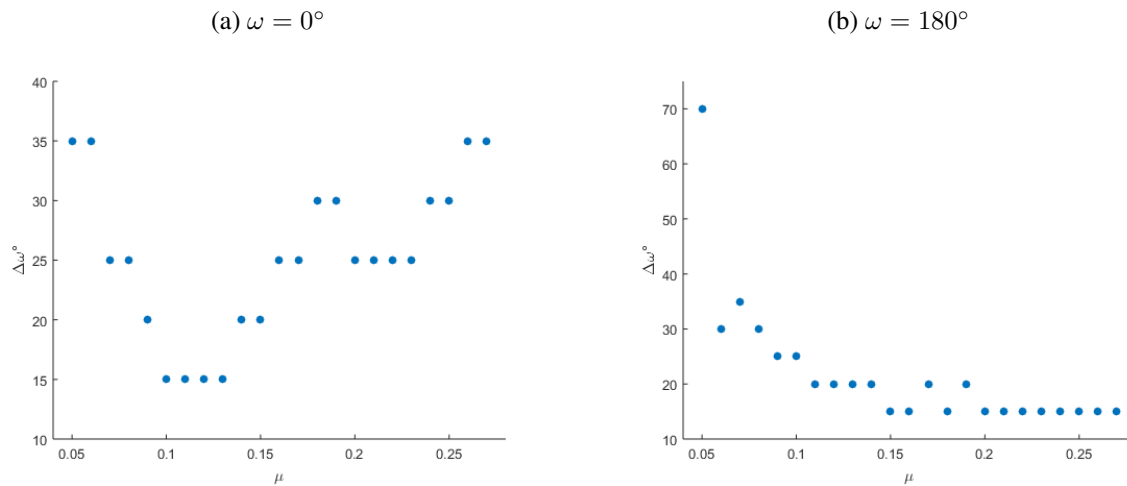
As simulações numéricas mostraram que independentemente da razão de massa, a região da *sailboat* existe dentro de dois intervalos estreitos e simétricos de ω em torno de 0° e 180° , onde atinge seu maior tamanho, confirmando o resultados obtidos em (WINTER et al., 2014).

Ao analisar o efeito da variação do argumento do pericentro sobre a *sailboat* ao redor $\omega = 0^\circ$, verifica-se que ela está dentro de um intervalo de no máximo de $\Delta\omega = \pm 35^\circ$. Quando μ está entre $[0.05, 0.13]$ é possível notar que $\Delta\omega$ diminui de acordo com o aumento da razão de massa do binário. Porém o $\Delta\omega$ torna a aumentar gradualmente em μ entre $[0.14, 0.19]$, atingindo o valor de $\Delta\omega = \pm 30^\circ$, o valor do $\Delta\omega$ cai para 25° em $\mu = [0.20, 0.23]$, porém ele retorna a subir para $\Delta\omega = \pm 35^\circ$ em $\mu = [0.24, 0.27]$.

Ao investigar o comportamento da *sailboat* perante a variação do pericentro em torno de $\omega = 180^\circ$, descobriu que ela é bem resistente quando $\mu = 0.05$ ($\Delta\omega = \pm 70^\circ$), porém tem um drástico declínio no $\Delta\omega$, com uma pequena variação na razão de massa de 0.01. Quando μ está entre 0.06 e 0.08 o $\Delta\omega$ tem pequenas oscilações em torno de $\Delta\omega = \pm 30^\circ$ e $\pm 35^\circ$. Entre μ igual a 0.09 e 0.15 o $\Delta\omega$ cai de acordo com o aumento da razão de massa, e permanece constante com $\Delta\omega$ de $\pm 15^\circ$, para todos os demais sistemas binários simulados, a única exceção está em $\mu = 0.17$, onde o $\Delta\omega = \pm 20^\circ$.

A Figura 21 é o gráfico dos valores do intervalo do argumento pericentro em torno de 0° e 180° , onde verificamos a existência da região estável versus a razão de massa de cada sistema.

Figura 21 – Gráfico do valor absoluto do intervalo do argumento do pericentro em torno de 0° e 180° das onde existe a *sailboat* pela razão de massa do sistema binário hipotético



Fonte: Autoria Própria.

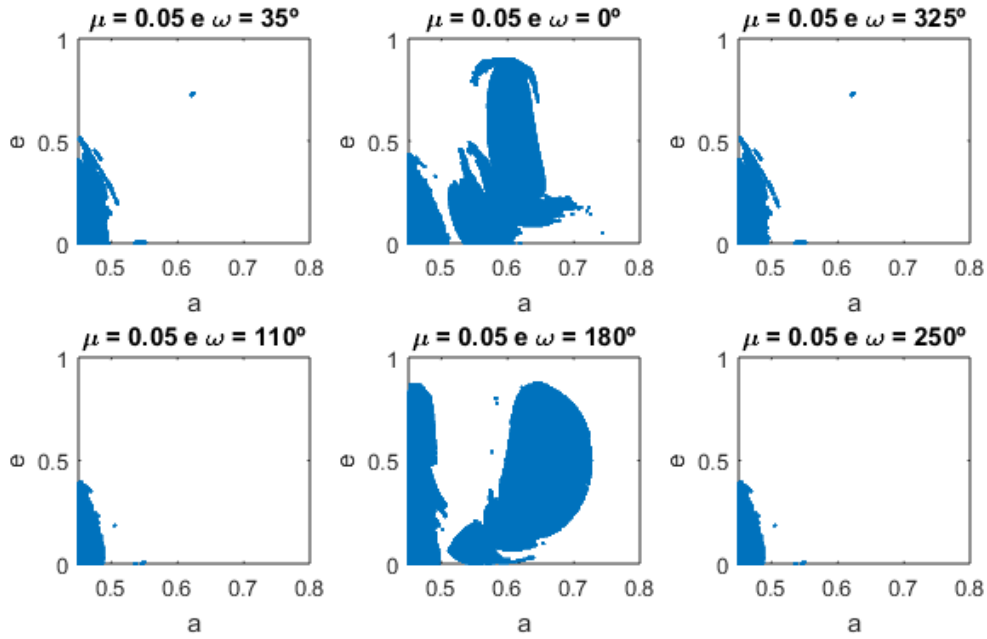
Nas Figura 22 até Figura 44 encontram-se os diagramas de condições iniciais ($a \times e$) dos sistemas binários hipotéticos simulados em relação a variação do argumento do pericentro.

Quando varia o argumento do pericentro em torno de 0° , em geral sobrevivem as partículas mais excêntricas, ao contrário do que acontece com a variação de ω ao redor de 180° , onde a *sailboat* perde excentricidade com o aumento do $\Delta\omega$.

A *sailboat* é mais extensa em ω igual 180° do que em 0° . Exceto para o binário com μ igual 0.06, todos o sistema com μ entre 0.05 e 0.13 (Figura 22 até Figura 30), o intervalo do $\Delta\omega$ é maior em torno de $\omega = 180^\circ$ do que em $\omega = 0^\circ$, para os sistemas entre μ de 0.15 e 0.27 (Figura 32 até Figura 44), acontecendo inverso, o $\Delta\omega$ é maior ao redor de $\omega = 0^\circ$ do que em $\omega = 180^\circ$.

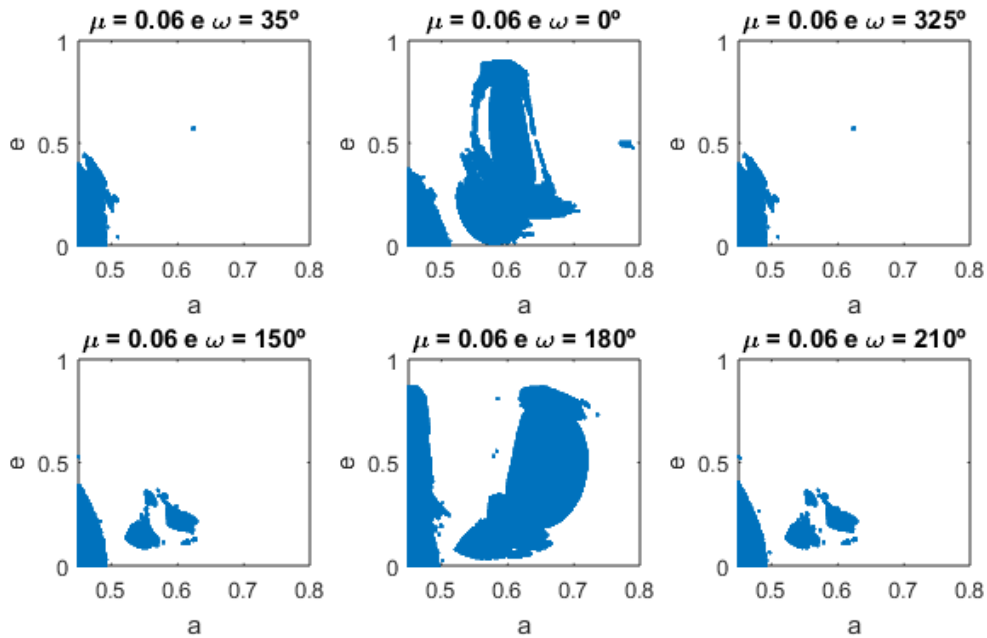
A *sailboat* ao redor de ω igual a 180° , alcança maiores distâncias em relação ao corpo primário, além do número de partículas excêntricas ser maior do que para $\omega = 0^\circ$. Quando a razão de massa do sistema está entre 0.15 e 0.18 (Figura 32 até Figura 35) a *sailboat* fica mais espessa para $\omega = 180^\circ$, em μ entre 0.20 e 0.22 (Figura 37 até Figura 39) ela perde um pouco sua excentricidade, para ambos os casos ($\omega = 0^\circ$ e 180°). Com o aumento de μ , esta região continua se encolhendo e perdendo sua excentricidade para o caso de $\omega = 0^\circ$, porém o contrário acontece em $\omega = 180^\circ$, onde a *sailboat* se estica, atingindo valores de excentricidade desde de zero até superior a 0.6, além de possuir uma distância maior de 0.7d.

Figura 22 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.05$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 70$ (parte inferior).



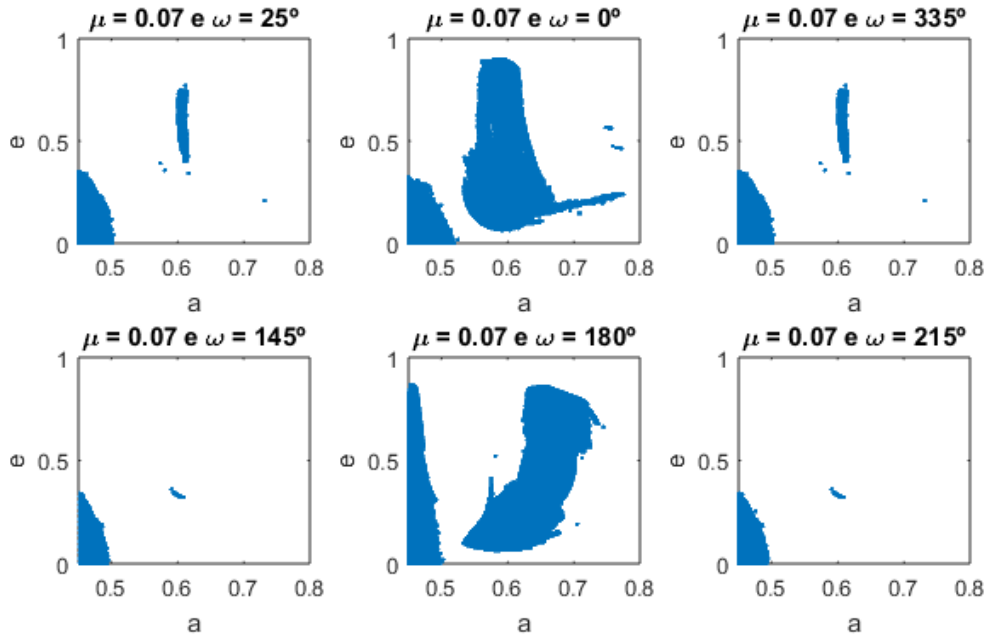
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.06$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 30$ (parte inferior).



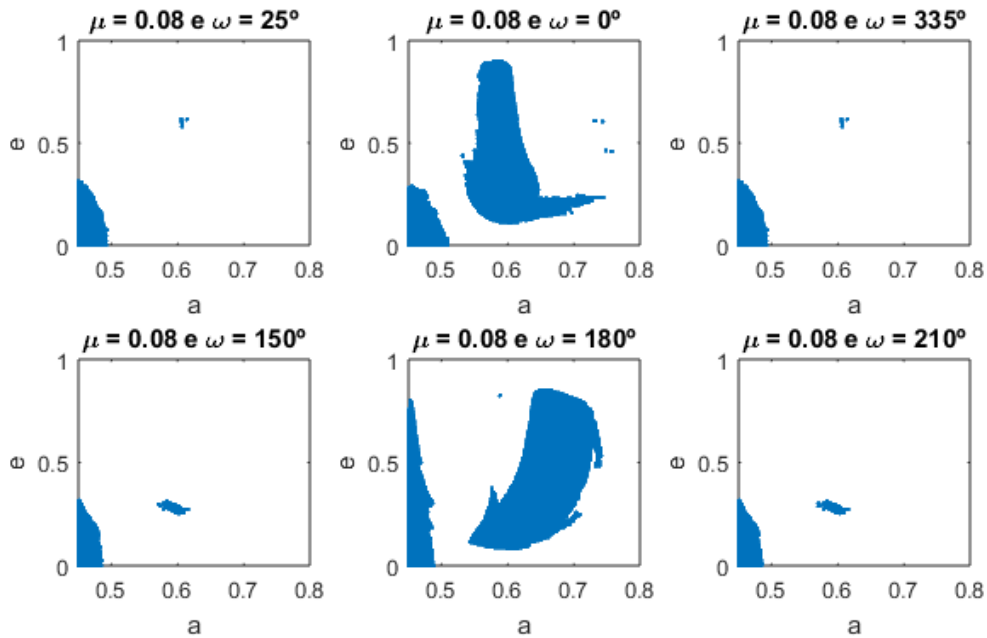
Fonte: Autoria Própria.

Figura 24 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.07$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 35$ (parte inferior).



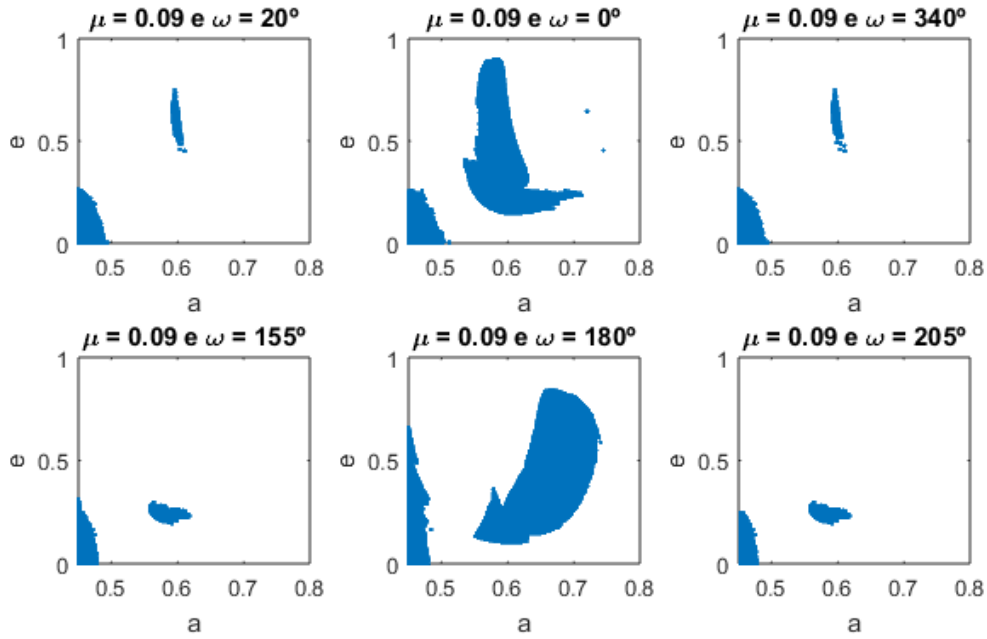
Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.08$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 30$ (parte inferior).



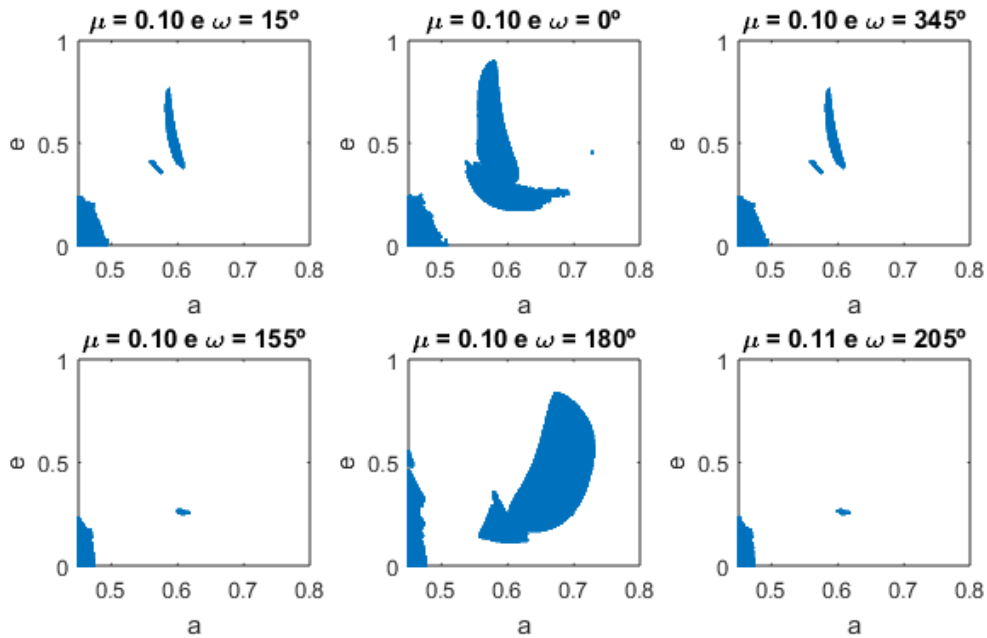
Fonte: Autoria Própria.

Figura 26 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.09$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 25$ (parte inferior).



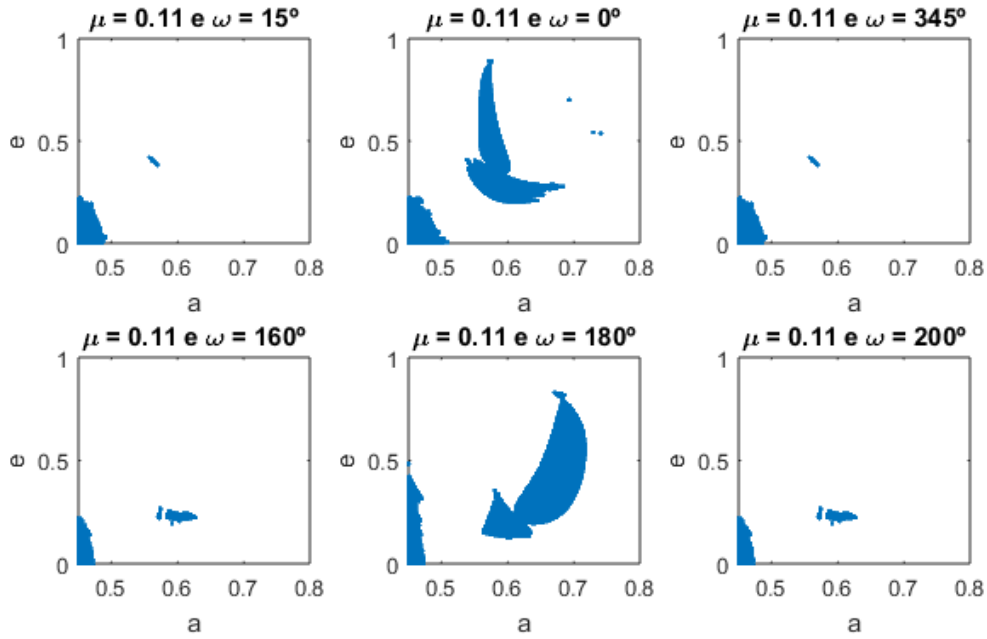
Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.10$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 25$ (parte inferior).



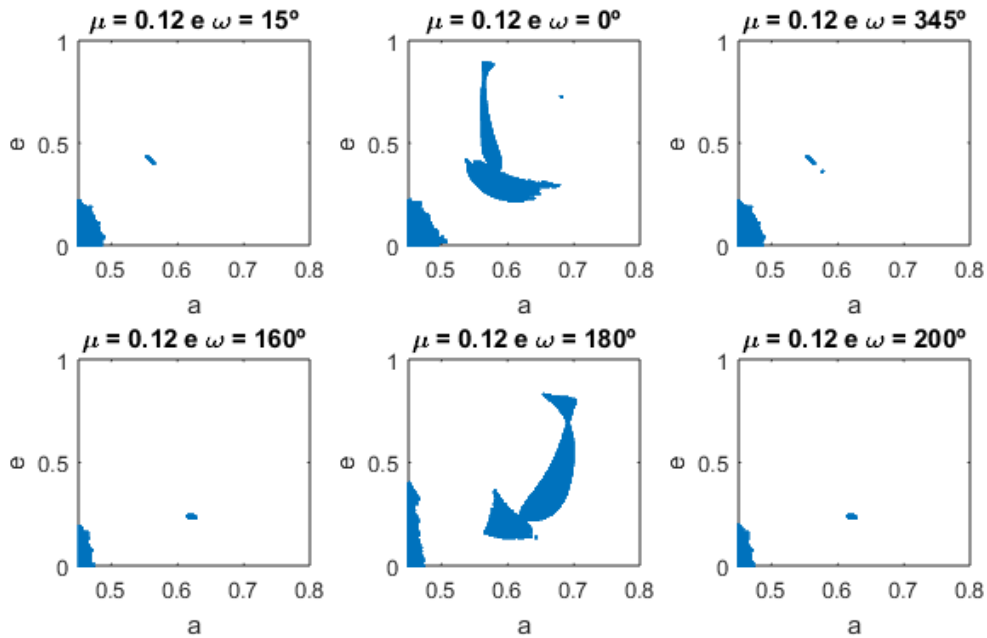
Fonte: Autoria Própria.

Figura 28 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.11$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



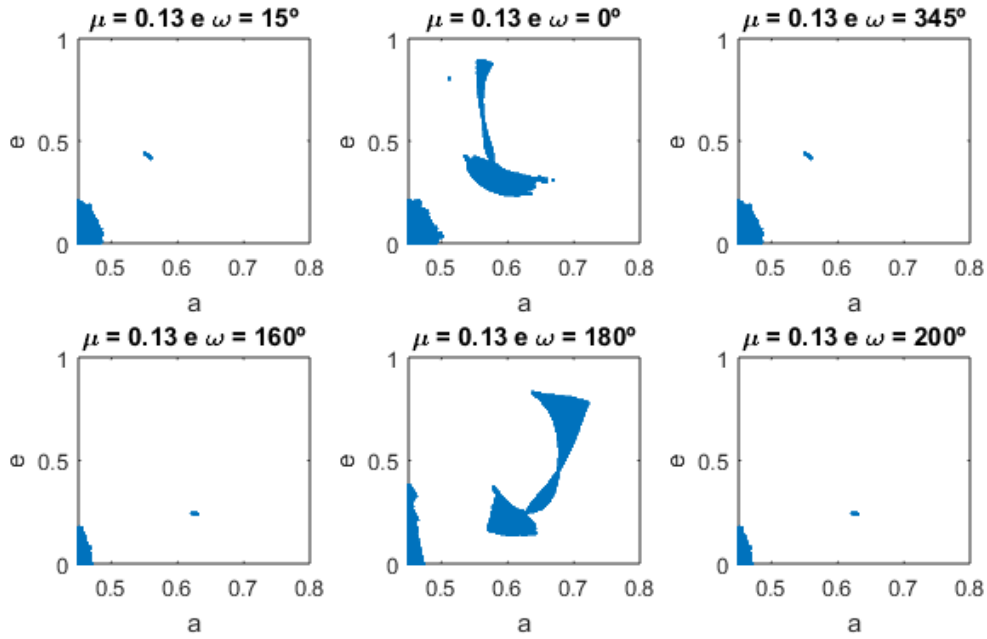
Fonte: Autoria Própria.

Figura 29 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.12$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



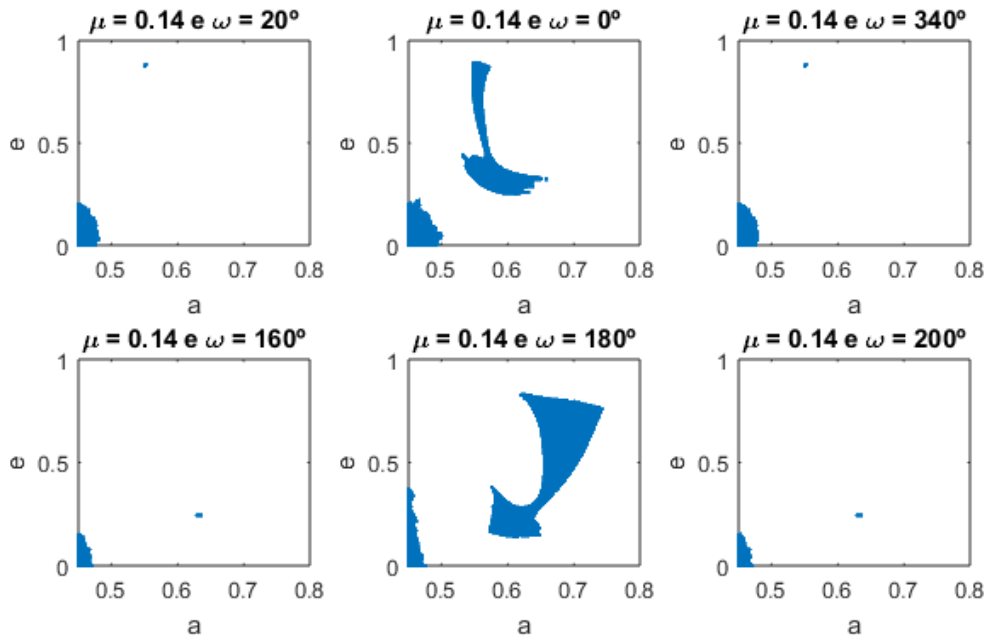
Fonte: Autoria Própria.

Figura 30 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.13$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 15$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



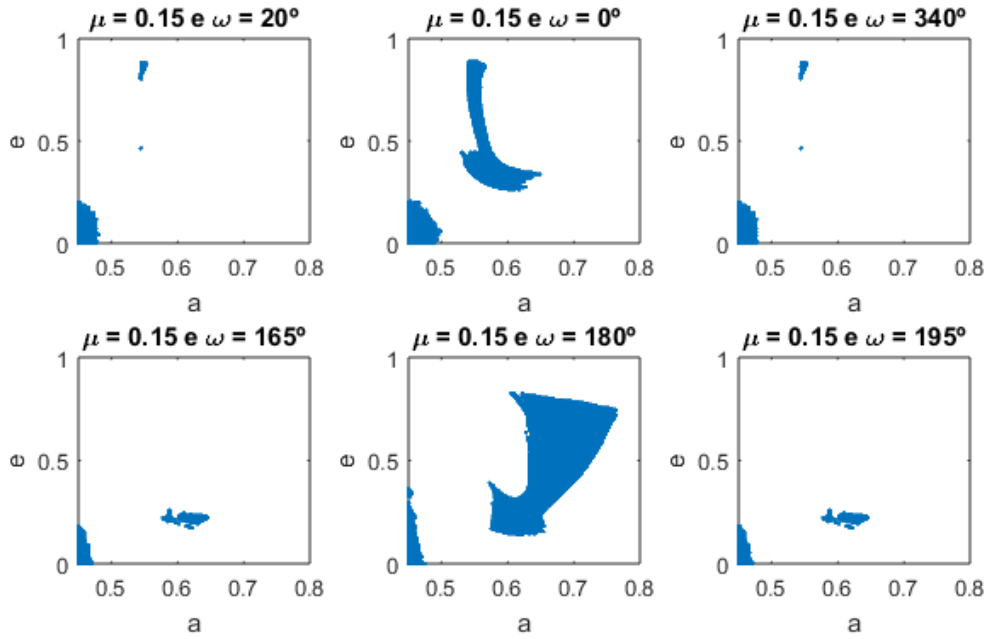
Fonte: Autoria Própria.

Figura 31 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.14$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



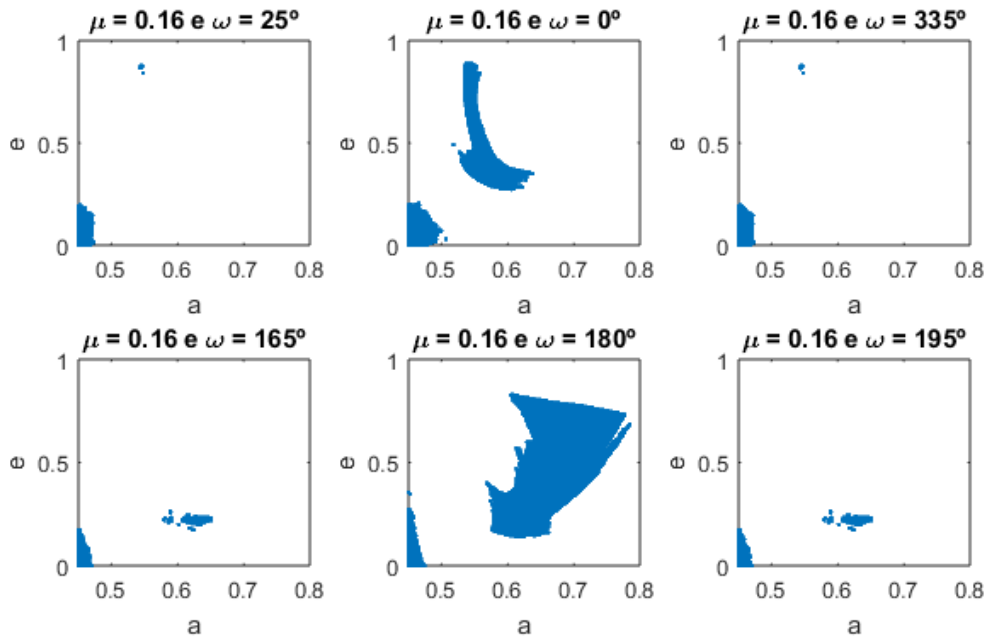
Fonte: Autoria Própria.

Figura 32 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.15$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 20$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



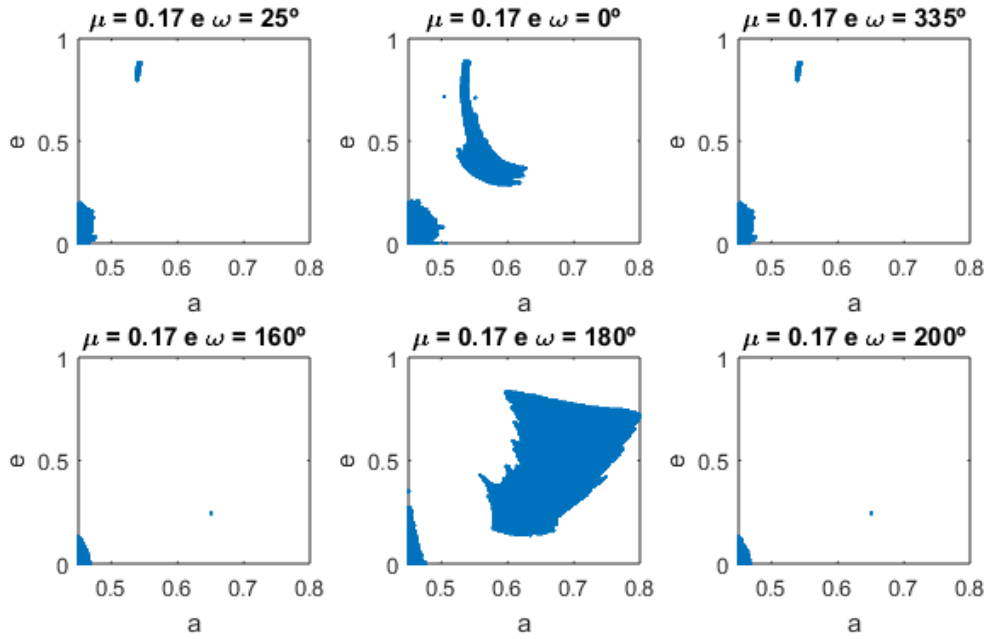
Fonte: Autoria Própria.

Figura 33 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.16$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



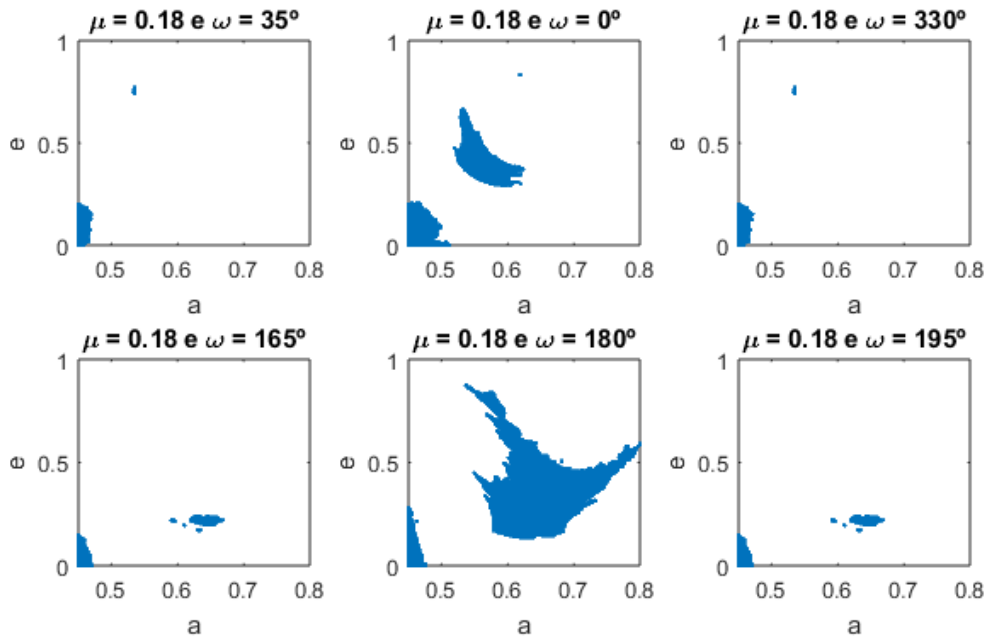
Fonte: Autoria Própria.

Figura 34 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.17$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



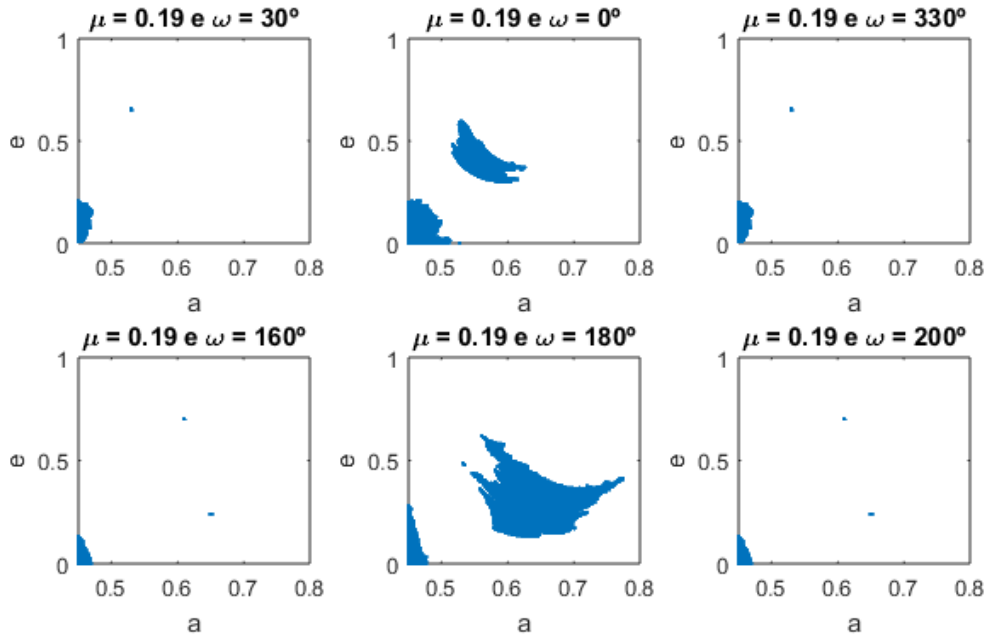
Fonte: Autoria Própria.

Figura 35 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.18$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



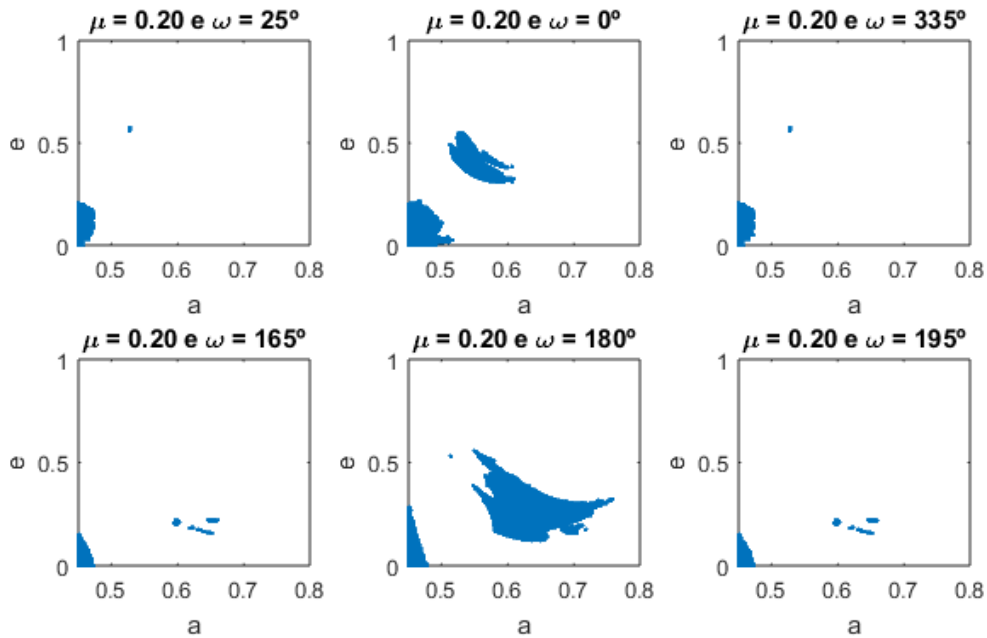
Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.19$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 20$ (parte inferior).



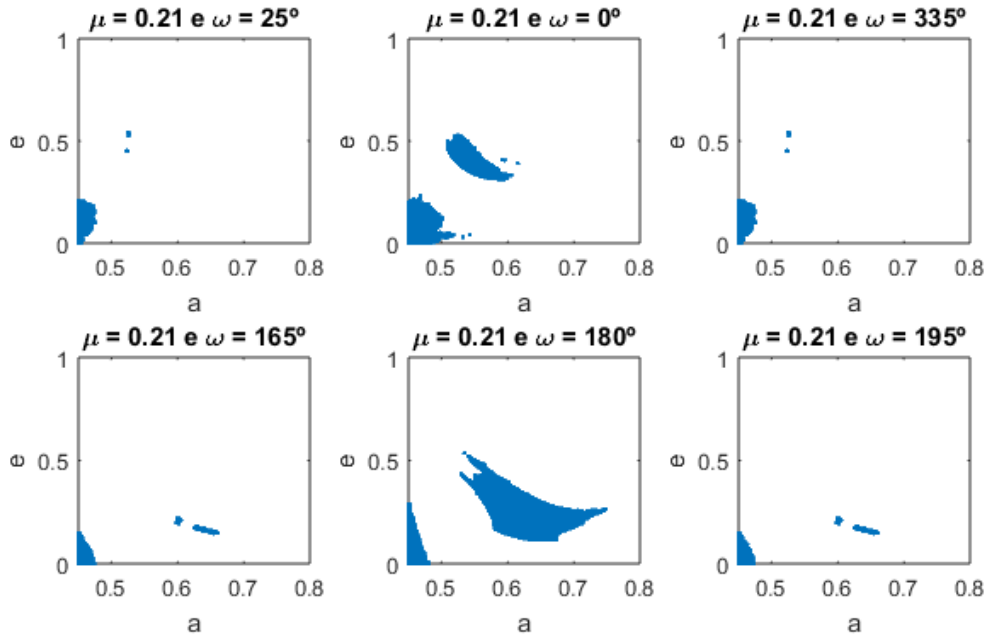
Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.20$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



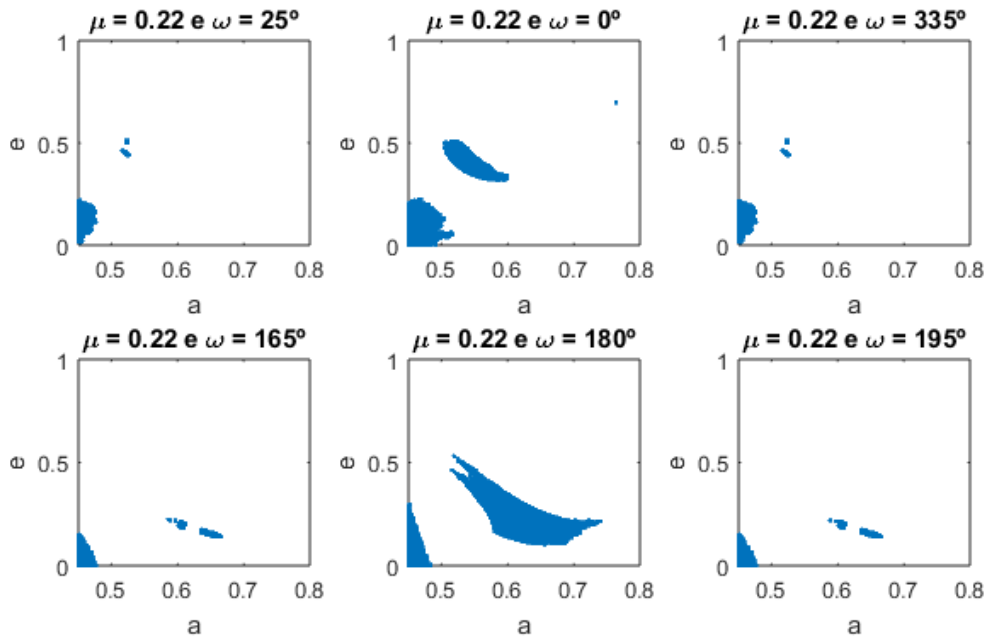
Fonte: Autoria Própria.

Figura 38 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.21$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



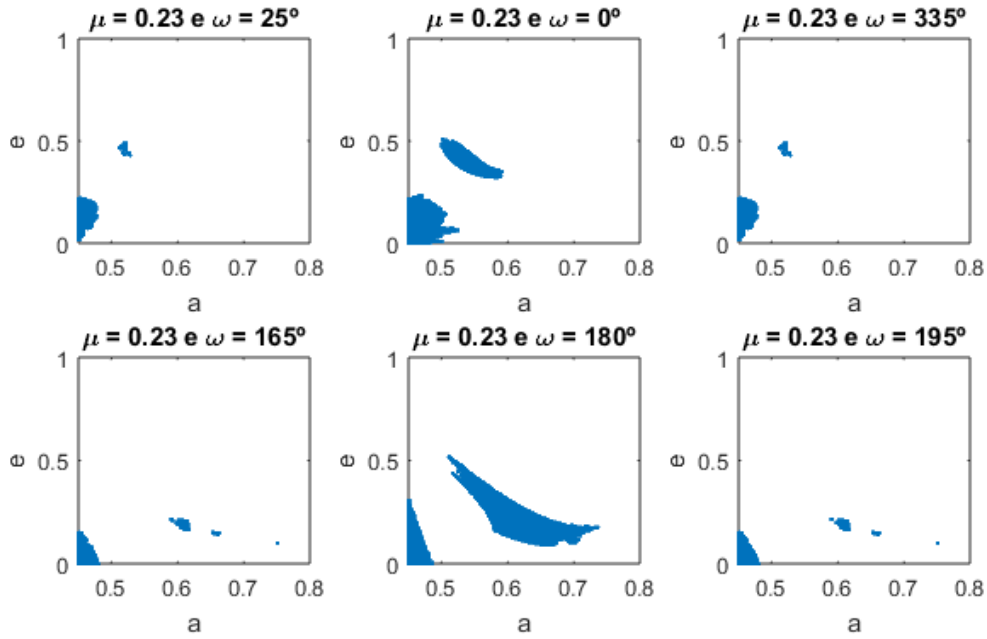
Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.22$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



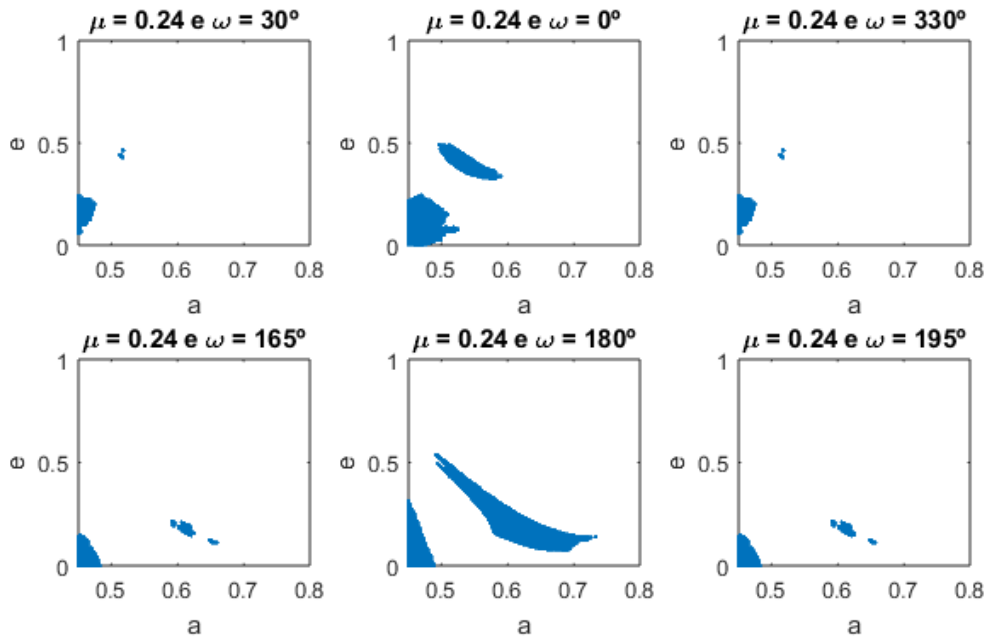
Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.23$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 25$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



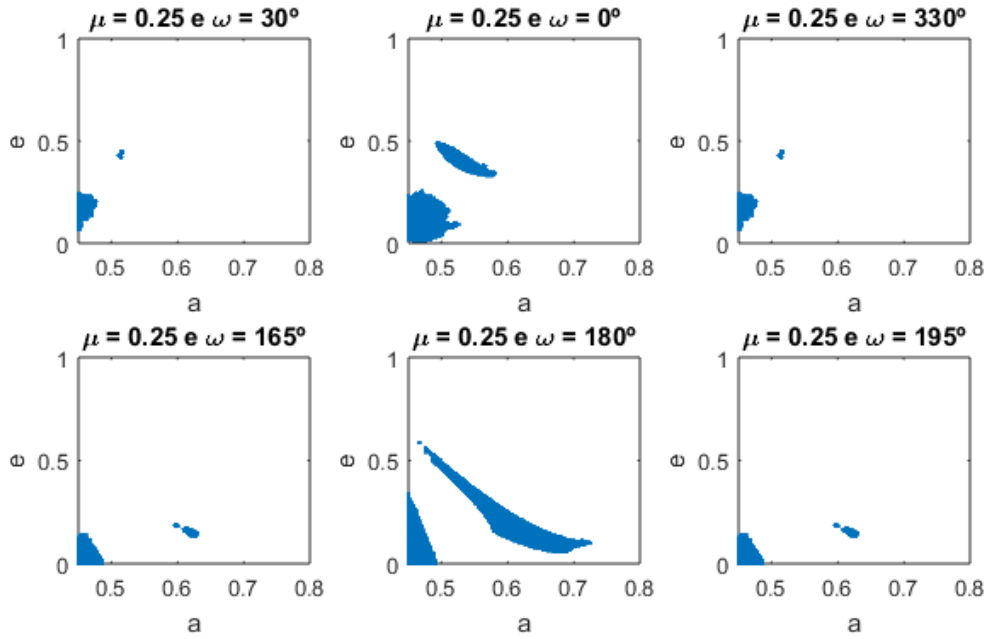
Fonte: Autoria Própria.

Figura 41 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.24$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



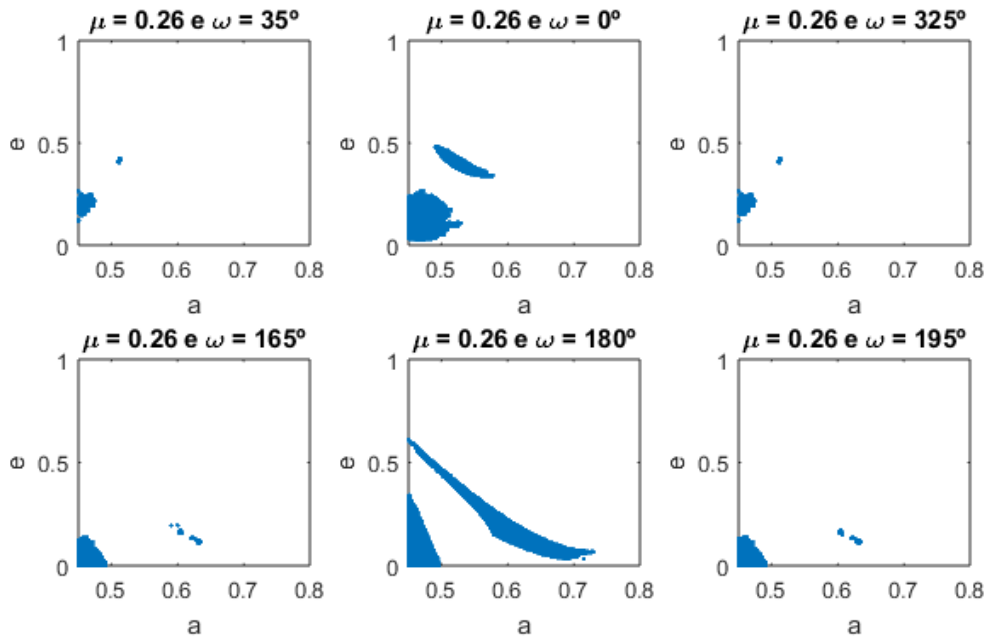
Fonte: Autoria Própria.

Figura 42 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.25$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 30$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



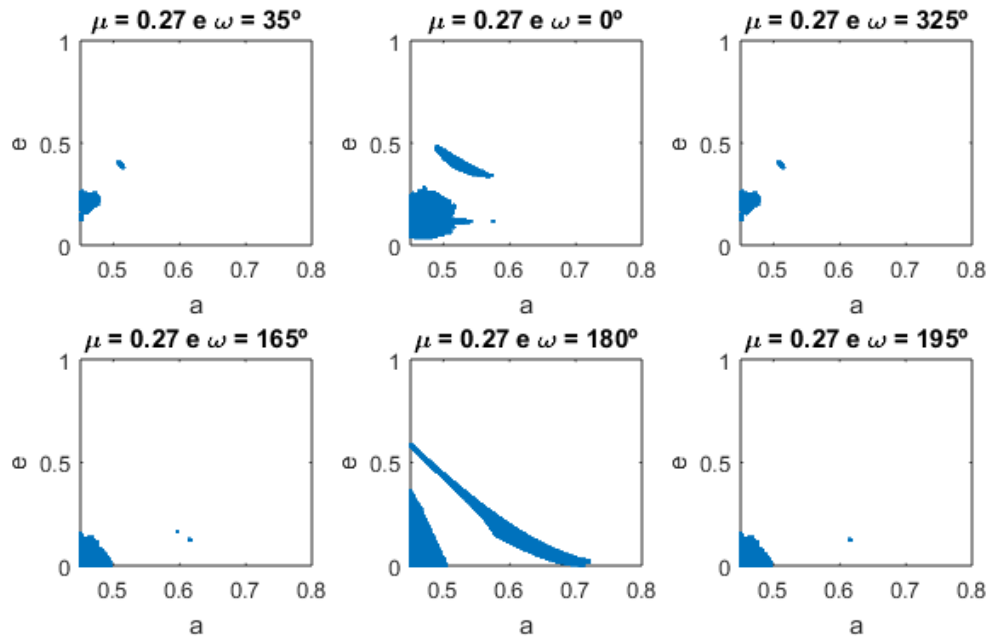
Fonte: Autoria Própria.

Figura 43 – Diagrama de condições iniciais ($a \times e$) para a binária de $\mu = 0.26$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 44 – Diagrama de condições iniciais (a x e) para a binária de $\mu = 0.27$, sendo as partículas com $I = 0^\circ$ e $\omega = 0 \pm 35$ (parte superior) e $\omega = 180 \pm 15$ (parte inferior).



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÃO

A *sailboat* é uma região peculiar estável de órbitas do tipo S, situada aproximadamente no meio da distância entre os dois corpos mais massivos de um sistema binário. Sua estabilidade confirmada através do método de superfície de Poincaré (WINTER et al., 2014).

Neste trabalho foi explorado a estabilidade da *sailboat* de acordo com a variação da excentricidade do corpo secundário, da inclinação (I) e do argumento do pericentro (ω) das partículas, para diversos parâmetros de massa, através da criação de sistemas binários hipotéticos.

Os resultados mostram que a *sailboat* existe em qualquer sistema binários com $\mu = [0.05, 0.27]$. Para o menor valor de μ investigado ($\mu = 0.05$), a *sailboat* está a uma distância entre $0.5d$ e $0.75d$, com excentricidade máxima próxima a de 0.9 . À medida que aumenta a razão de massa do sistema, a *sailboat* perde excentricidade e se aproxima do corpo primário.

Em $\mu = 0.28$ duas novas regiões surgem, elas se unem com a *sailboat* com um pequena aumento da razão de massa. A partir de $\mu = 0.32$, apenas uma única região permanece estável nos sistemas binários, e conforme μ cresce, esta região se encolhe.

Pequenas mudanças na excentricidade do corpo secundário são suficientes para eliminar a estabilidade das partículas, além dela possuir um decaimento quase que exponencial em relação a excentricidade máxima e razão de massa do sistema binário.

Na região da *sailboat* as partículas mais excêntricas resistem mais as mudanças da excentricidade do corpo secundário.

Esta região também mostrou ser mais sensível a variação do argumento do pericentro do que com a inclinação das partículas. A *sailboat* existe em dois diferentes intervalos de ω ao redor de $\omega = 0^\circ$ e 180° (onde sua extensão é máxima), enquanto em relação a inclinação ela existe para valores $I \geq 90^\circ$, e contém um decaimento linear em relação aos valores de inclinação máxima e a razão de máxima do sistema binário.

Independentemente da razão de massa da binária, com o aumentando da inclinação das partículas, as que possuem baixas excentricidades se tornam instáveis. Sendo a *sailboat* uma região que possui partículas bem excêntricas, em comparação com a região 1, ela consegue resistir mais ao efeito do aumento da inclinação.

Ao estudar os efeitos das mudanças no argumento pericentro sobre a *sailboat*, percebe-se que os intervalos de $\Delta\omega^\circ$ oscilam conforme a razão de massa. De modo geral esta região é mais estensa para $\omega = 180^\circ$ do que $\omega = 0^\circ$, atingindo maiores excentricidades e também maiores distâncias em relação ao corpo primário.

Esta região possui um comportamento antagônico com o aumento de μ para esses dois valores de ω , ela continua se encolhendo e perdendo sua excentricidade no caso de $\omega = 0^\circ$, porém o contrário acontece em $\omega = 180^\circ$, onde a *sailboat* se expande e ganha partículas mais excêntricas.

Em conclusão este projeto analisou a robustez da *sailboat* perante a diferentes parâmetros de massa e elementos orbitais. Duas possíveis aplicações apresentadas neste projeto estão em sistemas de estrelas binárias, e planetas anões e seus satélites. Se um sistema binário apresentar as características

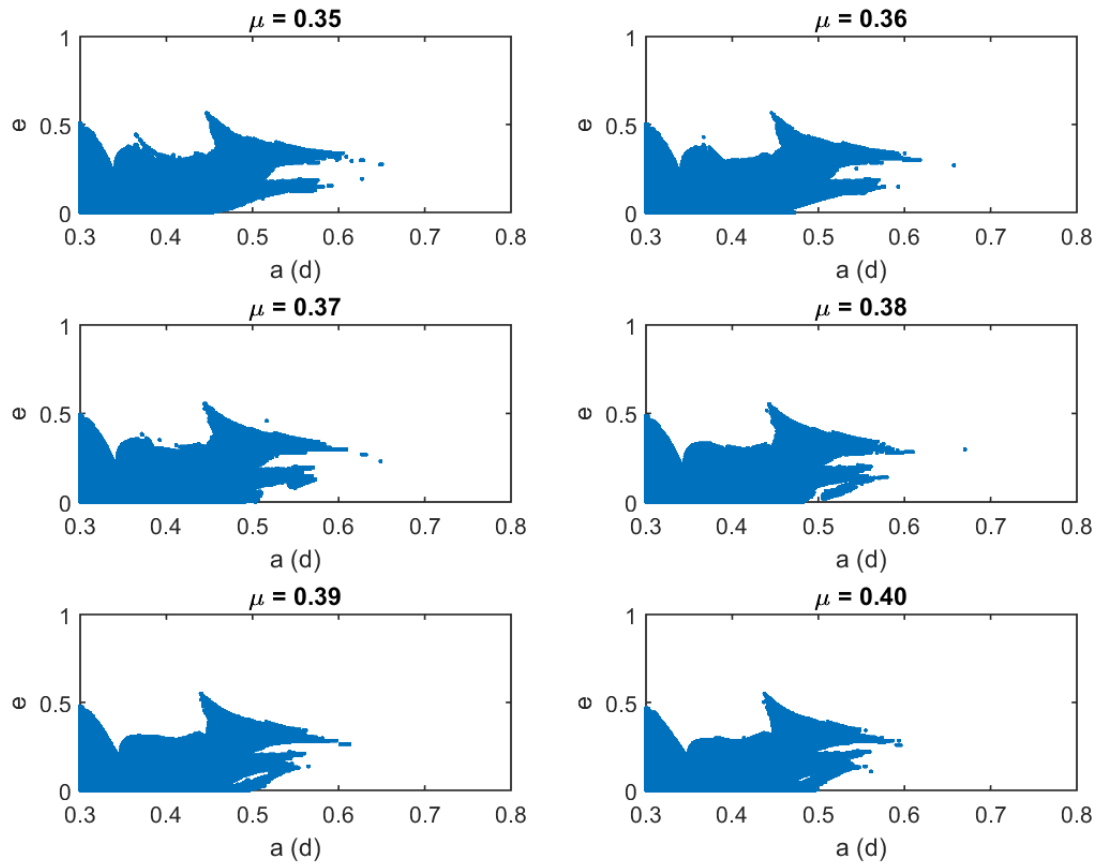
para conter esta região peculiar, como exemplificado no capítulo 2. Por ser uma região de estável a *sailboat* pode conter partículas ou corpos menores remanescentes de um processo colisional, sendo assim de tais sistema poderiam ter exoplanetas ou pequenos satélites naturais situados nesta região.

REFERÊNCIAS

- Bondarenko, I. I.; Perevozkina, E. L. Catalogue of Photometric, Geometric, and Absolute elements of contact binary stars of the early spectral type. **Odesskij Gosudarstvennyi Universitet im. I. I. Mechnikova Izvestiya Astronomicheskoy Observatorii**, v. 9, p. 20, 1996. Disponível em: <<http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1996IzOde...9...20B>>.
- Brancewicz, H. K.; Dworak, T. Z. A catalogue of parameters for eclipsing binaries. , v. 30, p. 501–524, 1980. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1980AcA....30..501B>>.
- British Astronomical Association. **Eclipsing Binary Observing Guide**. London, England: Burlington House, 2015.
- BROWN, M. E. The density of mid-sized kuiper belt object 2002 ux25 and the formation of the dwarf planets. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 778, n. 2, p. L34, 2013.
- Buie, M. W. et al. Orbits and Photometry of Pluto's Satellites: Charon, S/2005 P1, and S/2005 P2. , v. 132, p. 290–298, jul. 2006. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006AJ....132..290B>>.
- EVERHART, E. An efficient integrator that uses gauss-radau spacings. In: CARUSI, A.; VALSECCHI, G. B. (Ed.). **Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution**. [S.l.: s.n.], 1985. v. 115, p. 185.
- GRUNDY, W. et al. The mutual orbit, mass, and density of the large transneptunian binary system varda and ilmarë. **Icarus**, Elsevier, v. 257, p. 130–138, 2015.
- Holman, M. J.; Wiegert, P. A. Long-Term Stability of Planets in Binary Systems. , v. 117, p. 621–628, jan. 1999. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999AJ....117..621H>>.
- Johnston, W. R. **Asteroids with Satellites**. 2016. Disponível em: <<http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>>.
- Surkova, L. P.; Svechnikov, M. A. VizieR Online Data Catalog: Semi-detached eclipsing binaries (Surkova+, 2004). **VizieR Online Data Catalog**, v. 5115, jan. 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004yCat.5115....0S>>.
- Svechnikov, M. A.; Perevozkina, E. L. VizieR Online Data Catalog: Catalog of DMS-type eclipsing binaries (Svechnikov+, 1999). **VizieR Online Data Catalog**, v. 5121, p. 5, out. 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004yCat.5121....0S>>.
- Winter, O. C.; Vieira Neto, E. Time analysis for temporary gravitational capture. Stable orbits. , v. 377, p. 1119–1127, out. 2001. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001A%26A...377.1119W>>.
- Winter, S. M. G. et al. Exploring S-type orbits in the Pluto-Charon binary system. , v. 404, p. 442–450, maio 2010. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.404..442W>>.
- WINTER, S. M. G. et al. Stable regions around pluto. , v. 430, p. 1892–1900, apr 2013. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013MNRAS.430.1892G>>.
- WINTER, S. M. G. et al. A peculiar stable region around pluto. , v. 439, p. 3300–3307, apr 2014. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014MNRAS.439.3300G>>.
- WINTER, S. M. G. et al. The sailboat island and the new horizons trajectory. , v. 246, p. 339–344, jan 2015. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015Icar..246..339G>>.

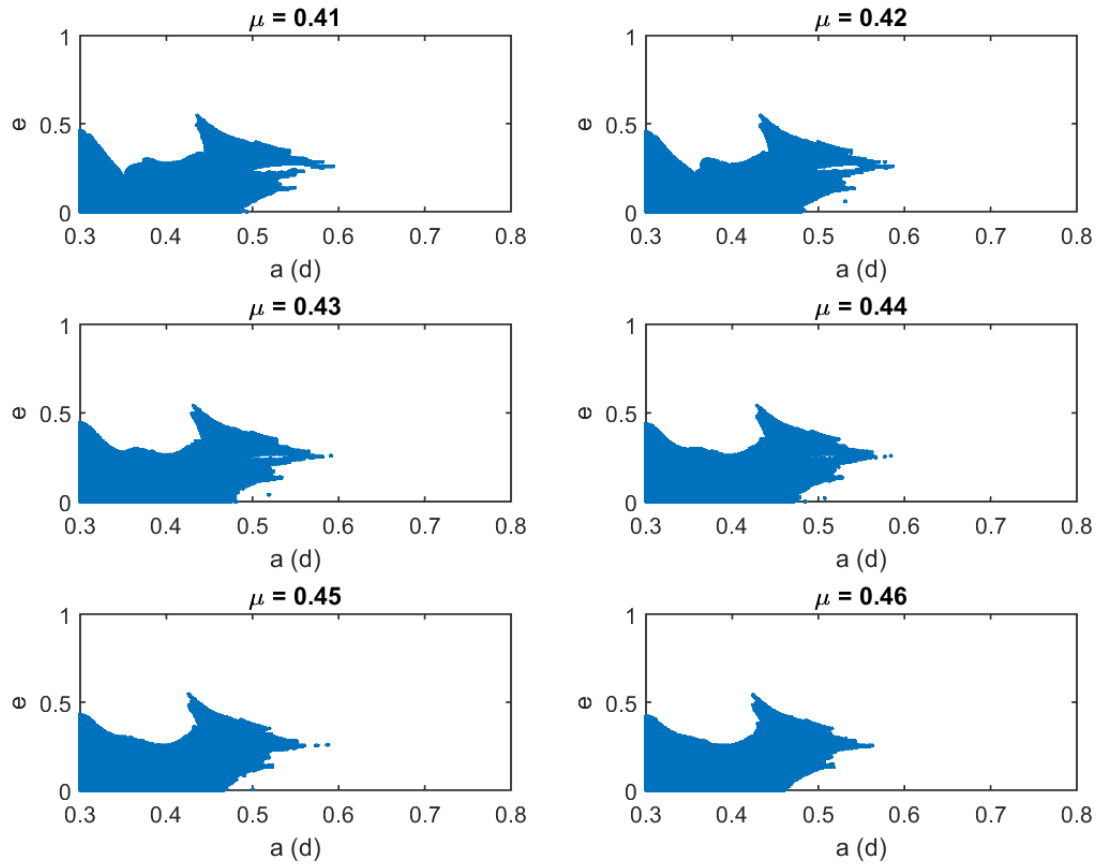
APÊNDICE A – DIAGRAMA DE CONDIÇÕES INICIAIS ($A \times E$), PARA OS SISTEMAS BINÁRIOS HIPOTÉTICOS COM $\mu = [0.35, 0.7]$

Figura 45 – Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.35 até 0.40.



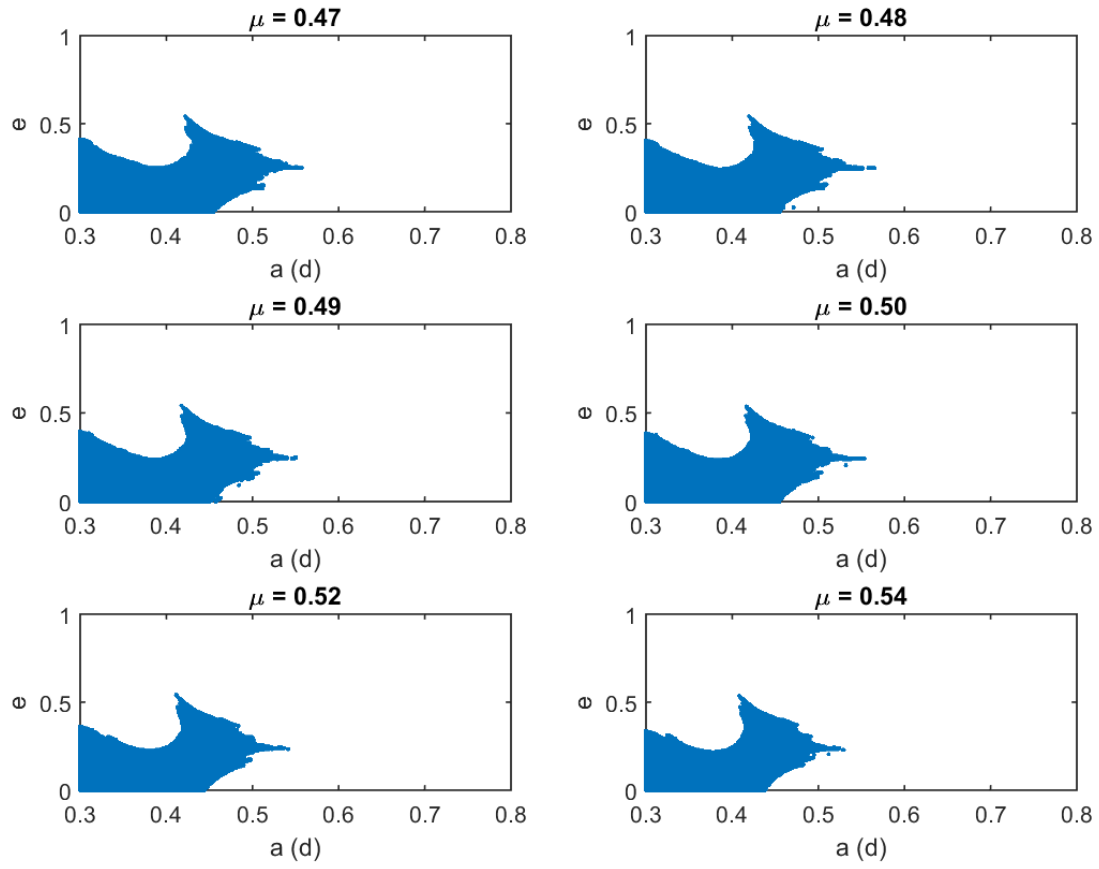
Fonte: Autoria Própria.

Figura 46 – Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.41 até 0.46.



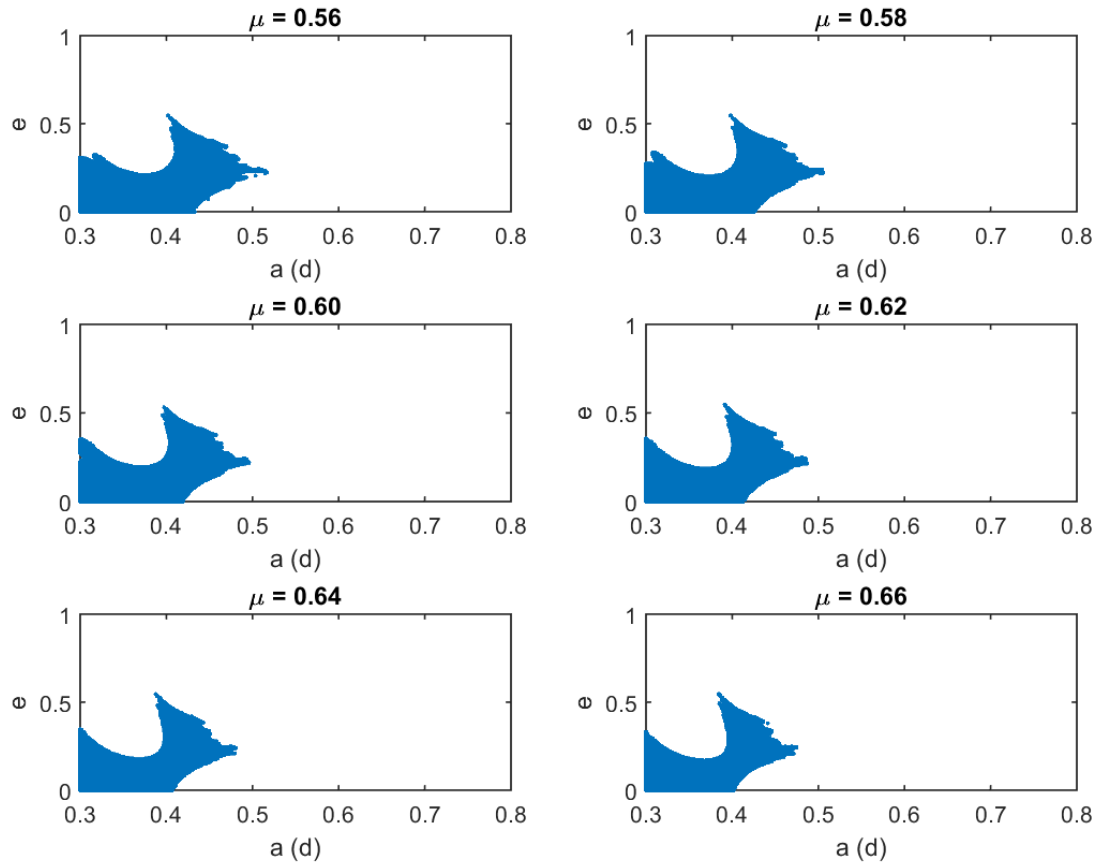
Fonte: Autoria Própria.

Figura 47 – Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.47 até 0.54.



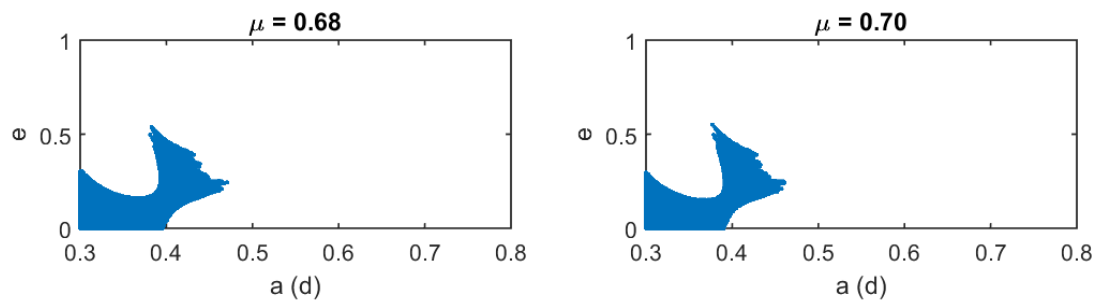
Fonte: Autoria Própria.

Figura 48 – Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.56 até 0.66.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 49 – Região de estabilidade (em azul) para sistemas binários hipotéticos com razão de massa entre 0.68 e 0.70.



Fonte: Autoria Própria.