RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 01/12/2022

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

DANIEL MARTIN GASLAC GALLARDO

Dinâmica dos pequenos corpos de Netuno e o sistema Kepler-90

Guaratinguetá
2021

Daniel Martin Gaslac Gallardo

Dinâmica dos pequenos corpos de Netuno e o sistema Kepler-90 :

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 grado de Doutor em FÍSICA .

Orientadora: Prof^a Dr^a. Silvia Maria Giuliatti Winter

Guaratinguetá
2021

Gallardo, Daniel Martin Gaslac
G163d Dinâmica dos pequenos corpos de Netuno e o sistema Kepler-90 / Daniel Martin Gaslac Gallardo – Guaratinguetá, 2021
144 f .: il.
Bibliografia: f. 126-131

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientadora: Profª Drª Silvia Maria Giuliatti Winter

1. Radiação solar. 2. Satélites Órbitas. 3. Planetas Órbitas. 4. Telescópios. I. Título.

CDU 551.521.1(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária-CRB-8/3595

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DANIEL MARTIN GASLAC GALLARDO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM FÍSICA"

PROGRAMA: FÍSICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto
Coordenador

B A N C A E X A M I N A D O R A:

Profª. Drª. SILVIA MARIA GIULIATTI WINTER
Orientador - UNESP
participou por videconferência

Prof. Dr. RAFAEL SFAIR DE OLIVEIRA
UNESP
participou por videconferência

Prof. Dr. VALERIO CARRUBA
UNESP
participou por videconferência

Prof. Dr. NELSON CALLEGARI JÚNIOR
IGCE / UNESP
participou por videconferência

Prof. Dr. ELBERT EINSTEIN NEHRER MACAU
UNIFESP
participou por videconferência

Dezembro *de 2021*

DADOS CURRICULARES

DANIEL MARTIN GASLAC GALLARDO

NASCIMENTO	09/11/1989 - La Victoria / Lima-Perú
FILIAÇÃO	Celestino Gaslac Culqui Ysabel Gallardo Suazo
2008 / 2013	Bacharelado em Física (Graduação) Universidad del Callao
2014 / 2016	Mestrado em Física (Pós Graduação) Universidade Estadual Paulista-UNESP

Esta tese é dedicada aos meus pais Celestino e Ysabel,
pelo apoio e conselhos dados..

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ysabel e Celestino, que dignamente me apresentaram à importância da família e o caminho da honestidade e persistência. E à minha família pelo estímulo e paciência a mim transmitidos. A Prof^{a}. Silvia Giuliatti , meu orientadora, pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de alguém que inspira sabedoria; meu respeito e admiração pela sua serenidade, capacidade de análise do perfil de seus alunos, e pelo seu dom no ensino da ciência, inibindo sempre a vaidade em prol da simplicidade e eficiência. A realização de um projeto de pesquisa como este só foi possível com o apoio de vários colaboradores. Aos membros do grupo de dinâmica orbital e planetologia da FEG UNESP, sem este apoio esta luta seria mais complicada. Especialmente à Jady, Nilce, Patricia e Giuliano. Em especial aos professores Othon, Ernesto, Rafael e Julio pelos conselhos e amizade nestes quatro anos de doutorado que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma. O meu reconhecimento e gratidão. Aos amigos Alonso, Mariela, Angel, Alessandro e Rosana, os precursores de tudo, que exemplificam a ética e competência profissionais, com dedicação e aprimoramento contínuos e também pelo incentivo e oportunidade de convívio pessoal. Especialmente quero agradecer à Kelly, por conseguir me auxiliar neste último ano e que conseguiu, de alguma maneira, me fazer recuperar a motivação e inspiração que eu já havia perdido. Meus eternos agradecimentos a ela que, sem saber, me ajudou nos momentos mais difíceis.

Este trabalho contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior

RESUMO

O sistema de anéis e satélites de Netuno foi descoberto (e o sistema de arcos de Netuno confirmado) durante a passagem da sonda espacial Voyager 2 em 1989 (SMITH et al., 1989). O sistema interno de Netuno possui um conjunto de sete satélites denominados Naiade, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa, Hipocampo, Proteus e Tritão, além dos anéis Galle, Le Verrier, Lassell, Arago, anel coorbital de Galatea, e Adams. Neste trabalho analisamos a estabilidade da região interna do sistema de Netuno através dos mapas de difusão para um conjunto de partículas-teste sob a influência gravitacional de todos os satélites do sistema interno. Forças dissipativas como a pressão de radiação solar (para partículas micrométricas) e o arrasto devido ao plasma serão incluídas no estudo dos anéis. As partículas estarão inicialmente em órbitas excêntricas, onde serão assumidos os valores de excentricidade geométrica no intervalo de 0 a 0.04. O anel de Galle é o mais próximo ao planeta e está longe dos satélites, sendo localizado em uma região estável. Enquanto a borda interna do anel de Lassel (com largura igual a 4000 km) apresenta uma região estável dependente do valor da excentricidade. O mesmo ocorre com os anéis Le Verrier e Adams, esses anéis são estáveis para pequenos valores de excentricidade. Esses anéis podem sobreviver à perturbação dos satélites próximos para valores de e < 0.012. Quando a força de radiação solar é considerada, os anéis compostos por partículas de 1 μm apresentam um tempo de vida de 10^4 anos, enquanto as partículas maiores (10 μm de raio) podem sobreviver até 10^5 anos.
Observações feitas pelo Telescópio Kepler durante quatro anos mostraram que existem sistemas multi-planetários, cujos planetas estão distribuídos de forma similar ao Sistema Solar (BORUCKI et al., 2010; BORUCKI et al., 2011). O sistema Kepler-90 apresenta um conjunto formado por oito planetas b, c, i, d, e, f, g e h, em distância crescente da estrela. Os planetas g e h são similares aos gigantes gasosos, enquanto os planetas d, e e f são similares às superterras. A configuração do sistema é similar ao Sistema Solar, pequenos planetas estão próximos e os maiores estão distantes da estrela, embora o planeta externo tenha uma distância orbital igual a 1 UA. Através da análise de frequência e simulações numéricas de longo período, analisamos a estabilidade das órbitas dos planetas para um conjunto de parâmetros, como a massa, o semieixo maior e excentricidade. Realizamos simulações numéricas para analisar três diferentes intervalos de excentricidade: o primeiro intervalo é de 0 a 1×10^{-3}, o segundo intervalo é de 1×10^{-3} a 1×10^{-2} e o terceiro intervalo é de 1×10^{-2} a 1×10^{-1}. Os valores de excentricidade, argumento do pericentro, longitude do nodo ascendente e longitude média foram escolhidos aleatoriamente em cada intervalo de excentricidade. Os resultados mostram que os planetas com excentricidades que pertencem aos dois primeiros intervalos são estáveis, enquanto a maioria dos planetas com excentricidade 1×10^{-2} a 1×10^{-1} são ejetados do sistema. A variação da excentricidade dos planetas nos dois primeiros intervalos indicam que o planeta h é dominante, sendo importante para a estabilidade do sistema Kepler-90. Identificamos as ressonâncias de movimento médio 5:4 e 3:2 dos planetas b e c e g e h, respectivamente. Simulamos numericamente um conjunto de partículas nos "sistemas Kepler-90", através do mapa de difusão, onde identificamos quatro regiões estáveis entre as órbitas dos planetas c-i, i-d, d-e, e além da órbita do planeta h sendo identificadas como regiões 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Os platôs associados às ressonâncias são identificadas com o planeta i e o planeta h. Os resultados mostraram que as partículas-teste estão em ressonância de movimento médio

2:3, 5:6, 7:8 e 9:10 com o planeta i, e 1:2, 3:4, 3:5, 3:7 e 3:8 com planeta h.

PALAVRAS-CHAVE: Mapa de difusão. Pressão de radiação Solar. Sistema de Netuno. Kepler-90.

ABSTRACT

Neptune rings and small satellites system was discovered during the passage of Voyager 2 in 1989. The Neptune inner system has a cluster of seven satellites Naiade, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa, Hippocampus, Proteus, and Triton and the rings Galle, Le Verrier, Lassell, Arago, Galatea's coorbital, and Adams. In this work we analyze the stability of the inner region of the Neptune system through diffusion maps for a set of test particles under the gravitational influence of all satellites. Dissipative forces such as the solar radiation force (for micrometric particles) and the drag due to the plasma are included in the study of the rings. The particles in both cases are initially in eccentricity orbits, the geometric eccentricity values range in the interval from 0 to 0.04. The Galle ring, which is close to the planet and away from the inner satellites, is located in a stable region. Whereas, the inner edge of the Lassel ring (width of about 4000 km) is in a stable region that depends on the value of the eccentricity. Le Verrier and Adams rings also are stable for small values of the eccentricity. These rings can survive for the perturbation of the satellites for values of e < 0.012. When the solar radiation force is included, rings composed of 1 μm particles have a lifetime of 10^4 years, while larger particles (10 μm radius) can survive up to 10^5 years.

Observations performed by the Kepler Telescope over four years have shown that multi-planetary systems exist, whose planets are distributed similar to our Solar System (BORUCKI et al., 2010; BORUCKI et al., 2011). The Kepler-90 system has eight planets b, c, i, d, e, f, g and h, in increasing distance from the star. Planets g and h are similar to the gas giants, while planets d, e and f are similar to super-Earths. This system is similar to the Solar System, small planets are close and larger ones are away from the star, although the outer planet has an orbital distance equals to 1 UA. The frequency map analysis and long period numerical simulations are used to analyze the stability of the planets' orbits, for a set of parameters such as, the mass, semi-major axis, and eccentricity. We perform numerical simulations to analyze three different intervals of eccentricity: the first interval is from 0 to 1×10^{-3}, the second interval is from 1×10^{-3} to 1×10^{-2}, and the third interval is from 1×10^{-2} to 1×10^{-1}. The values of the eccentricity, argument of pericenter, longitude of the ascending node, and mean longitude were chosen randomly in each eccentricity interval. The results show that the planets with eccentricities belonged to the first two intervals are stable, while most of the planets with eccentricities 1×10^{-2} to 1×10^{-1} are ejected from the system. The eccentricity variation of the planets in the first two intervals indicate that the planet h is dominant in the systems being important for the stability of the Kepler-90 system. We identify the 5:4 and 3:2 mean motion resonances between planets b and c and g and h, respectively. We numerically simulated a set of particles in the "Kepler-90 systems", through diffusion maps. We identify four stable regions between the orbits of planets c-i, i-d, d-e, and beyond the orbit of planet h being identified as regions 1, 2, 3 and 4, respectively. The plateaus associated with the resonances are identified with planet i and planet h. The results showed that the test particles are in mean motion resonances 2:3, 5:6, 7:8 and 9:10 with planet i, and 1:2, 3:4, 3:5, 3:7 and 3:8 with planet h.

KEYWORDS: Diffusion map. Pressure Solar radiation. Netuno inner system. Kepler-90.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Os resultados apresentados na Figura foram extraídos do artigo de Robutel e Laskar (2001). A figura mostra a curva de frequência, semieixo maior inicial vs $\frac{n}{n_8}$ das partículas com excentricidade igual a 0.15. Os platôs correspondem as RMMs com o planeta Netuno. 28

Figura 2 Esboço da localização dos satélites internos e a Tritão e os anéis do sistema de Netuno. Observamos que os maiores anéis, o Anel Galle e o Lassel, apresentam uma largura de ~ 2000 km e ~ 4000 km, respectivamente. 30

Figura 3 Arcos do anel Adams (Fraternidade, Igualdade, Liberdade e Coragem). 31

Figura 4 Evolução temporal dos elementos geométricos a, e e I dos satélites internos de Netuno quando não é considerado o satélite Tritão no sistema. O tempo de integração numérica foi de $\sim 1.2 \times 10^5$ anos. Na figura (a), (b) e (c) os satélites são identificados com os seguintes cores: roxo (Naiade), verde (Thalassa), azul-celeste (Despina), Laranja (Galatea), amarelo (Larissa), azul (Hipocampo) e vermelho (Proteus). 36

Figura 5 Evolução temporal dos elementos geométricos a, e e I dos satélites internos de Netuno incluindo o satélite Tritão no sistema. O tempo de integração numérica foi de $\sim 1.2 \times 10^5$ anos. Na figura (a), (b) e (c) os satélites são identificados com os seguintes cores: roxo (Naiade), verde (Thalassa), azul-celeste (Despina), Laranja (Galatea), amarelo (Larissa), azul (Hipocampo) e vermelho (Proteus). . 37

Figura 6 A figura apresenta o zoom da evolução temporal da inclinação geométrica dos satélites internos de Netuno incluindo o Tritão, no intervalo de tempo de 49.1×10^3 anos a 49.3×10^3 anos. Na figura (a), (b) e (c) os satélites são identificados com os seguintes cores: roxo (Naiade), verde (Thalassa), azul-celeste (Despina), Laranja (Galatea), amarelo (Larissa), azul (Hipocampo) e vermelho (Proteus). . 38

Figura 7 Mapa de análise de frequência na região do anel Galle, do satélite Naiade. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cuja nomenclatura são mostradas na parte superior. Os números localizados na parte superior apresentados em cor preta correspondem as RMMs de Galateia e a partícula. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Naiade. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 41

Figura 8 Mapa de difusão dos anéis Le Verrier-Lassell-Arago e os satélites Thalassa e Despina. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números apresentados em cor preto, azul-preto, laranja, marrom e azul pertencem as RMMs dos satélites Naiade, Thalassa, Galatea, Larissa, Proteus, e a partícula, respectivamente. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Thalassa e Despina. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 42

Figura 9 Mapa de difusão dos anéis coorbital de Galatea e Adams e o satélite Galatea. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números apresentados em cor laranja e marrom pertencem as RMMs dos satélites Galatea, Larissa e a partícula, respectivamente. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Galatea. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 43

Figura 10 Curva de frequência das partículas teste para todos os valores de excentricidade. Os platôs, indicados por uma flecha, representam as RMMs do satélite Galatea e a partícula. 44

Figura 11 Mapa de difusão do satélite Larissa e o conjunto de partículas teste. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números apresentados em cor preto, azul-preto, laranja e marrom pertencem as RMMs dos satélites Naiade, Thalassa, Galatea, Larissa e a partícula, respectivamente. A RMM de Despina e a partícula é identifica com o número 1:2d. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Larissa. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região corresponde às partículas ejetadas. 45

Figura 12 Mapa de difusão do satélite Hipocampo. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números apresentados em cor laranja, marrom, verde e azul pertencem as RMMs dos satélites, Galatea, Larissa, Hipocampo, Proteus, e a partícula, respectivamente. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Hipocampo. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 46

Figura 13 Mapa de difusão do satélite Proteus. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números apresentados em cor azul pertencem as RMMs do satélite Proteus e a partícula. As linhas inclinadas são os raios de apocentro e pericentro de Proteus. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou as partículas ejetadas do sistema. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 47

Figura 14 Curva de frequência na região do satélite Proteus. Os platôs, indicados por uma flecha, representam as RMMs do satélite Proteus e a partícula. 47

Figura 15 A figura mostra o tempo de difusão do sistema interno de Netuno no intervalo de $0.6D_{AA}$ a $2.2D_{AA}$. Os círculos em preto indicam a localização dos satélites. . . 48

Figura 16 Tempo de difusão dos anéis do sistema de Netuno. Os pontos em cor azul, preto, vermelho, roxa, verde e marrom indicam o valor médio t_D para cada valor de excentricidade (ver a figura da esquerda e direita). Na figura da esquerda mostra o decaimento do valor médio do tempo de difusão do anel Le Verrier (cor vermelha), no tanto, o anel Galle apresenta um comportamento quase constante e o anel Lassel apresenta uma variação de t_D, decaindo aproximadamente uma ordem de grandeza. A figura da direita mostra o decaimento do valor médio de t_D dos anéis Adams e Arago, no tanto, o anel Galatea apresenta um valor médio de t_D de $\sim 10^5$ anos. 49

Figura 17 Mapa de difusão do anel Le Verrier (no intervalo de semi-eixo maior geométrico de $0.84459D_{AA}$ a $0.84619D_{AA}$) e a borda do anel Lassel localizado no semi-eixo maior geométrico igual a $0.8453D_{AA}$. As linhas tracejadas verticais correspondem as RMMs cujos números são mostrados na parte superior. Esses números são as RMM de Despina e a partícula. A linha inclinada é o raio do pericentro de Despina. A paleta de cores define a intensidade de Log D, se está próximo de zero a órbita das partículas são irregulares e se Log D < -5 a órbita das partículas são regulares. A região branca corresponde às partículas teste que colidiram com os satélites ou Netuno, ou essa região branca corresponde às partículas ejetadas. 50
Figura 18 Curva de frequência com excentricidade iguais a 0 e 0.002. Os platôs, indicados por uma flecha, representam as RMMs do satélite Despina e a partícula. 51
Figura 19 Curva de frequência para partículas teste com excentricidade 0.004 a 0.01. Os platôs, indicados por uma zeta, representam as RMMs do satélite Despina e a partícula. 52
Figura 20 Evolução temporal do ângulo ressonante $\phi_{53:52}$ para diferentes valores de excentricidade. 52
Figura 21 Mapa de difusão $a\ vs\ \lambda$ do anel Le Verrier. A figura mostra a dinâmica global do anel Le Verrier (no intervalo de semi-eixo maior geométrico de $0.84459D_{AA}$ a $0.84619D_{AA}$) e a borda do anel Lassel para as partículas com um valor de excentricidade geométrico inicial igual a 1×10^{-4}. A linha tracejada vertical localizada no semieixo maior $0.84459D_{AA}$ indicam a borda do anel Le Verrier e a linha tracejada vertical localizada no semieixo maior $0.8453D_{AA}$ indica a borda do anel Lassel. Os lóbulos de cor verde representam às partículas que estão em RMM. Os números da parte superior da figura indicam a RMM de Despina e a partícula. 53
Figura 22 Curva de frequência do Anel Le Verrier para partículas com excentricidade igual a 1×10^{-4}. Os platôs, indicados pelos números, representam as RMMs do satélite Despina e a partícula. 54
Figura 23 A figura mostra a intensidade das forças que atuam no sistema de anéis de Netuno em função da distância. As localizações dos satélites e dos anéis são exibidos na figura como linhas tracejadas verticais. A curva referente a J_2 está representada como uma linha. A linha tracejada inclinada, localizada no médio da figura, representa o efeito gravitacional de Tritão e a linha tracejada horizontal representa o efeito da pressão de radiação solar. 55
Figura 24 Variação no tempo da excentricidade de uma partícula representativa de cada anel. O nome do anel é mostrado na parte superior de cada figura. Cada sub-figura possui dois gráficos, sem e com os efeitos da pressão da radiação solar. Os efeitos da pressão da radiação solar são responsáveis pelo pequeno aumento na excentricidade da partícula de 1μm. 56

Figura 25 Grade a vs R, satélites hipotéticos no sistema de Netuno, a paleta de cores indica o tempo de vida dos satélites hipotéticos. 59
Figura 26 Grade a vs R, satélites hipotéticos no sistema de Netuno. 60
Figura 27 Esboço da localização dos planetas do sistema Kepler-90. A figura mostra o tamanho do raio de cada planeta (R_p). 63
Figura 28 A figura mostra a estabilidade dos planetas nos três diferentes intervalos de excentricidade para os diferentes sistemas propostos do sistema Kepler-90. Cada símbolo apresentado na figura indica o Log D obtido para cada planeta. O Log D indica a intensidade da regularidade ou irregularidade da órbita dos planetas considerando que: se o Log D está suficientemente próximo à zero o planeta possuirá uma órbita irregular. Assumimos que os planetas com valores de Log $D < -3$ apresentam órbitas regulares, e caso contrário, os planetas apresentam órbitas irregulares. 70
Figura 29 As figuras mostram a variação do valor mínimo, máximo e a média da excentricidade dos planetas nos três intervalos de excentricidade. O primeiro gráfico está relacionado ao primeiro intervalo de excentricidade, a Figura (b) e a Figura (c) estão relacionadas ao segundo e terceiro intervalo de excentricidade, respectivamente. 71
Figura 30 Primeiro intervalo de excentricidade: os planetas apresentam diferentes valores de Log D cuja intensidade pode ser observada nas subfiguras. Cada subfigura é identificada para cada planeta em cada sistema proposto. 72
Figura 31 Os planetas que estão localizados no segundo intervalo de excentricidade apresentam gráficos similares aos observados na Figura 30, com exceção do planeta c. 73
Figura 32 As figuras mostram o valor mínimo, máximo e a média de Log D dos sistemas propostos nos dois primeiros intervalos de excentricidade. A Figura (a) está relacionada ao primeiro intervalo e a Figura (b) está relacionada ao segundo intervalo de excentricidade. As partes inferiores e superiores das linhas verticais apresentam o nome do planeta que obtiveram os valores mínimos e máximos de Log D. 75
Figura 33 Os valores mínimos, máximos e a média do Log D dos sistemas nominais que sobreviveram no terceiro intervalo de excentricidade. 76

Figura 34 Os histogramas mostram os planetas com órbitas mais sensíveis, o Log D_{max} representa os planetas com órbitas regulares e o Log D_{min} representa os planetas com órbitas que podem ser regulares ou irregulares, dependendo do tempo de integração. A Figura (a) apresenta os planetas do primeiro intervalo de excentricidade, a Figura (b) contém os planetas do segundo intervalo de excentricidade, a Figura (c) mostra a porcentagem dos planetas do primeiro intervalo de excentricidade que apresentam Log D_{min} e Log D_{max} quando o tempo de integração é de $10^5 T_h$, e finalmente a Figura (d) é similar à Figura (c) mas para o segundo intervalo de excentricidade. 77

Figura 35 As figuras mostram a evolução temporal dos ângulos $\phi_{5:4}$ e $\phi_{3:2}$ de um sistema selecionado do primeiro intervalo de excentricidade. A Figura(a) e a Figura(c) são um zoom no intervalo de tempo de 0 a 190 anos do ângulo ressonante $\phi_{5:4}$. Figura (b) e Figura (d) são a evolução temporal do ângulo ressonante $\phi_{5:4}$ para um tempo total de 1.2×10^4 anos. Os ângulos ressonantes $\phi_{5:4}^{(1)}$ e $\phi_{5:4}^{(2)}$ seguem a evolução da equação $5\lambda_c - 4\lambda_b - \varpi_b$ (Figura (a) e Figura (b)), e $5\lambda_c - 4\lambda_b - \varpi_c$ (Figura (c) e Figura (d)), respectivamente. Os gráficos (e) e (g) são um zoom no intervalo de tempo de 0 a 500 anos para o ângulo $\phi_{3:2}$. Figura (f) e Figura (h) mostram a evolução do ângulo $\phi_{3:2}$ para um tempo total de 1.2×10^4 anos. Figura (e) e Figura (f) mostra o comportamento de $\phi_{3:2}^{(1)} = 3\lambda_g - 2\lambda_h - \varpi_g$. Figura (g) e Figura (h) seguem a evolução da equação $\phi_{3:2}^{(2)} = 3\lambda_g - 2\lambda_h - \varpi_h$. 80

Figura 36 Os gráficos correspondem à evolução temporal dos ângulos $\phi_{5:4}$ e $\phi_{3:2}$ de outro sistema selecionado do primeiro intervalo de excentricidade. Apresentamos um zoom do comportamento dos ângulos nos mesmos intervalos de tempo que na Figura 35 para os ângulos $\phi_{5:4}^{(1)}$ (Figura (a)), $\phi_{5:4}^{(2)}$ (Figura (c)), $\phi_{3:2}^{(1)}$ (Figura (e)) e $\phi_{3:2}^{(2)}$ (Figura (g)). Os ângulos $\phi_{5:4}^{(1)}$, $\phi_{5:4}^{(2)}$, $\phi_{3:2}^{(1)}$ e $\phi_{3:2}^{(2)}$ seguem as mesmas equações que foram apresentadas na Figura 35. A Figura (d) mostra o comportamento intermitente por escala de tempo de curto e longo período para o ângulo $\phi_{5:4}^{(2)}$. . 81

Figura 37 Os ângulos ressonantes envolvidos nos gráficos para um sistema do segundo intervalo de excentricidade. Os gráficos apresentados são similares aos da Figura 36. A descrição do comportamento dos ângulos ressonantes são apresentados no texto. 84

Figura 38 Os gráficos (a) e (c) são um zoom no intervalo de tempo de 0 a 500 anos do ângulo ressonante $\phi_{3:2}$. A Figura (b) e Figura (d) mostram a evolução do ângulo ressonante $\phi_{3:2}$ para um tempo total de 1.2×10^4 anos. Os ângulos ressonantes seguem as equações $\phi_{3:2}^{(1)} = 3\lambda_g - 2\lambda_h - \varpi_g$ (Figura (a) e Figura (b)), e $\phi_{3:2}^{(2)} = 3\lambda_g - 2\lambda_h - \varpi_h$ (Figura (c) e Figura (d)), para o par planetário g-h. 85

Figura 39 Os mapas de difusão no espaço de fase a vs e correspondem aos sistemas do primeiro intervalo de excentricidade. Os resultados apresentados nas Figura (a) e Figura (b) mostram a dinâmica geral dos dois sistemas K90-1a e K90-2a. Cada retângulo é plotado e centrado nas condições iniciais das partículas teste. A paleta de cores indica os valores de Log D. As regiões de cor azul correspondem a regiões estáveis, se a cor é vermelha as regiões serão instáveis. As zonas brancas em ambas figuras corresponderam a partículas ejetadas dos sistemas ou que sofreram colisão com os planetas, ou com a estrela. 92
Figura 40 A figura mostra a dinâmica global dos dois sistemas nomeados K90-3a e K90-4a do primeiro intervalo de excentricidade (Figura (c) e Figura (d)). As figuras são similares à Figura 39. As zonas brancas em ambas figuras corresponderam as partículas ejetadas dos sistemas ou que sofreram colisão com os planetas, ou com a estrela. 93
Figura 41 A figura mostra o mapa de difusão no espaço de fase a vs e para o sistema K90-5a. 94
Figura 42 O histograma indica a porcentagem do número de partículas teste que colidem com os planetas ou com o corpo central dos sistemas K90-1a até K90-5a, e também as partículas que são ejetadas de cada sistema. Esses sistemas pertencem ao primeiro intervalo de excentricidade. Podemos identificar cada sistemas através da paleta de cores. 95
Figura 43 Os resultados apresentados na figura correspondem aos mapas de difusão no espaço de fase a vs e dos sistemas K90-1b e K90-2b, pertencentes ao segundo intervalo de excentricidade. O regime de cores indica se uma órbita é regular ou irregular no sistema proposto. As linhas tracejadas são as linhas de colisão de todos os planetas. As zonas brancas no mapa representam aquelas partículas teste que sofreram ejeção ou colidiram com os planetas ou com o corpo central. 97
Figura 44 Mapas de difusão no espaço de fase a vs e dos sistemas K90-3b e K90-4b no segundo intervalo de excentricidade. Figura (h) e Figura (i) seguem as mesmas regras indicadas na Figura 43. As zonas com cor azul são regiões estáveis e as zonas de cor vermelha são regiões instáveis. 98
Figura 45 Mapa de difusão no espaço de fase a vs e para o sistema nominal K90-5b. . . . 99
Figura 46 O histograma indica a porcentagem do número de partículas teste que colidem com os planetas ou com o corpo central dos sistemas K90-1b até K90-5b, e também as partículas que são ejetadas de cada sistema. Esses sistemas pertencem ao segundo intervalo de excentricidade. Podemos identificar cada sistemas através da paleta de cores. 100
Figura 47 Apresentamos o comportamento do Log $(t_D)_{médio}$ das partículas que sobreviveram o tempo total de integração numérica para cada valor de excentricidade. As quatro regiões estáveis são apresentadas nas Figura (a) (região 1), Figura (b) (região 2), Figura (c) (região 3) e Figura (d) (região 4) que apareceram nos sistemas do primeiro intervalo de excentricidade. 101

Figura 48 Figura (a), Figura (b), Figura (c) e Figura (d) mostram o valor médio do tempo de difusão das partículas que apresentam órbitas regulares e irregulares nas quatro regiões estáveis, as quais são caracterizadas pelo $\log_{10}(t_D)_{médio}$ para cada valor de excentricidade. As condições iniciais dos planetas nos sistemas pertencem ao segundo intervalo de excentricidade. 102

Figura 49 Mapa de difusão no espaço de fase a vs e entre a órbita do planeta c e 0.1555 UA. Os elementos orbitais dos planetas correspondem ao sistema K90-1b que pertence ao segundo intervalo de excentricidade. As cores correspondem à paleta de cores que segue os valores de Log D. O gráfico segue o mesmo regime mostrado na Figura 45. A linha tracejada corresponde ao raio do pericentro do planeta c e o raio de apocentro do planeta i. 104

Figura 50 Mapa de difusão no espaço de fase a vs e entre as órbitas das partículas localizadas no intervalo de semieixo maior 0.1556 UA até 0.226 UA. As cores correspondem à paleta de cores que seguem os valores de Log D. A linha tracejada corresponde aos raios do pericentro e apocentro do planeta i. 105

Figura 51 Os ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{1:2b}$, $\varphi^{(2)}_{1:2b}$ (figuras do lado esquerdo) libram em torno de zero e 180° com amplitudes constantes, respectivamente. Os ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{1:2c}$ e $\varphi^{(2)}_{1:2c}$, apresentados na figura do lado direito, libra e circula e libra, respectivamente. 106

Figura 52 Apresentamos a evolução temporal dos ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{5:4i}$, $\varphi^{(2)}_{5:4i}$ que libram em torno de zero e 240°, respectivamente. De mesmo modo, a figura a direita apresenta o comportamento temporal dos ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{9:7i}$, $\varphi^{(2)}_{9:7i}$ que libram em torno de 180° e 300°, respectivamente. 106

Figura 53 Apresentamos a evolução temporal dos ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{3:2i}$, $\varphi^{(2)}_{3:2b}$, $\varphi^{(1)}_{4:3i}$ e $\varphi^{(2)}_{4:3i}$ cujas amplitudes são maiores que as amplitudes das outras partículas que libram nos ângulos ressonantes apresentados anteriormente. Note que o ângulo ressonante $\varphi^{(1)}_{3:2i}$ e $\varphi^{(2)}_{3:2i}$ (figuras a esquerda) libram em torno de zero e 240°, respectivamente. No caso dos ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{4:3i}$ e $\varphi^{(2)}_{4:3i}$ (figuras a direita) também libram em torno de zero e 240°, respectivamente. 107

Figura 54 Os ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{9:8i}$ e $\varphi^{(2)}_{9:8i}$ libram em torno de 180° e 60°, respectivamente. Isto também ocorre para os ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{10:9i}$ e $\varphi^{(2)}_{10:9i}$. Os 4 ângulos ressonantes $\varphi^{(1)}_{9:8i}$, $\varphi^{(2)}_{9:8i}$, $\varphi^{(1)}_{10:9i}$ e $\varphi^{(2)}_{10:9i}$ apresentam amplitudes de $\sim$60°. 107

Figura 55 Curva de frequência na região do planeta h para o primeiro intervalo de excentricidade. Cada figura representa um "sistema Kepler-90". Plotamos a razão entre o movimento médio das partículas teste (n_p) e o movimento médio do planeta h vs o semieixo maior inicial das partículas teste. Os platôs correspondem às RMM localizadas na curva correspondendo as ressonâncias 1:1 e 3:4 com o planeta h, localizadas nos semieixos maiores igual a 0.996 UA e 1.22 UA, respectivamente. Todos os valores de excentricidade foram incluídos na figura. 109

Figura 56 Curva de frequência na região do planeta h para o segundo intervalo de excentricidade. A curva de frequência está definida de acordo com o indicado na Figura 55. Os platôs foram identificados nos sistemas para as partículas em RMM 3:4 com o planeta h. Observamos que as partículas em RMM 1:1 com o planeta h não estão sempre no mesmo intervalo de excentricidade. Todos os valores de excentricidade foram incluídos na figura. 110
Figura 57 Mapa de difusão no espaço de fase a vs e além da órbita do planeta h. Os dados dos planetas correspondem aos valores indicados no segundo intervalo de excentricidade. O gráfico segue o mesmo regime sinalado na Figura 45 para o tratamento das partículas teste. As linhas tracejadas são as linhas dos raios do pericentro do planeta g e do planeta h. 111
Figura 58 Os resultados apresentados nessa figura mostram o comportamento da curva de frequência além da órbita do planeta h, cujos dados dos elementos orbitais dos planetas foram extraídos do segundo intervalo de excentricidade. Plotamos a razão entre o movimento médio das partículas teste (n_p) e o movimento médio do planeta h vs o semieixo maior inicial das partículas. Os platôs apareceram no intervalo de excentricidade de 0 a 0.06 correspondendo às RMMs 3:5 e 1:2 com o planeta h. 112
Figura 59 As curvas de frequência no intervalo de excentricidade das partículas de 0.08 a 0.30. O regime que cumpre a curva de frequência é similar ao indicado na Figura 58. Os platôs correspondem as RMMs 3:5 e 1:2 com o planeta h. Esses platôs podem ser visualizados em todas as sub figuras da Figura 59. 113
Figura 60 Os ângulos ressonantes $\varphi_{1:2h}$, $\varphi_{3:4h}$ e $\varphi_{3:5h}$ que aparecem na Figura 59 libram em torno de 180°, com amplitudes de 130°, 60° e 100°, respectivamente. As amplitudes são constantes até o tempo final da integração numérica de 9×10^3 anos. 114
Figura 61 O histograma apresenta a quantidade de asteroides localizados no Cinturão Principal em relação ao semieixo maior no intervalo de 1.5 UA a 4.5 UA. A nomenclatura das ressonâncias de movimento médio estão localizadas na parte superior da figura. As lacunas podem ser visualizadas na figura. 115
Figura 62 Mapa de difusão no espaço fase a vs e. A nomenclatura das RMMs está localizada na parte superior das figuras e as RMMs são identificadas com linhas tracejadas verticais. As linhas tracejadas inclinadas mostram os raios do pericentro do planeta b e do apocentro do planeta i. 116
Figura 63 Plotamos os mapas, semieixo maior vs excentricidade (Figura (a) e (b)) e semieixo maior vs inclinação (Figura (c) e (d)) dos planetas menores do Cinturão de Kuiper, através dos dados observacionais extraídos da lista de objetos transnetunianos da website Center (2021a). 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros físicos do planeta Netuno 29
Tabela 2 – Parâmetros físicos dos satélites internos próximos ao planeta Netuno 29
Tabela 3 – Parâmetros dos anéis de Netuno 31
Tabela 4 – As componentes da posição (x, y, z) e velocidade (v_x, v_y, v_z) dos satélites de Netuno. Esses valores foram extraídos de NASA (2017c) para a data 2017-02-01. . . 35
Tabela 5 – Elementos geométricos dos satélites do sistema interno de Netuno obtidos da Tabela 3.1. 35
Tabela 6 – Valores numéricos das frequências principais dos satélites obtidos através de Šidlichovskỳ e Nesvornỳ (1997). 50
Tabela 7 – Tempo de vida das partículas de 1μm e 10μm, devido ao efeito do arrasto de Poynting-Robertson 57
Tabela 8 – Tempo de vida das partículas de 1μm e 10μm, devido ao efeito do arrasto por plasma. 57
Tabela 9 – Variação da excentricidade geométrica em função do tempo dos satélites internos, cujo tempo de integração é de $\sim 10^5$ anos 58
Tabela 10 – Parâmetros físicos dos planetas e a estrela do sistema Kepler-90. Os valores foram extraídos de Cabrera et al. (2014). 64
Tabela 11 – Dados para a equação (3) para os planetas com valores de semieixo maior ≤ 0.1 UA e para valores de $a > 0.1$ UA. As variáveis M_0, b, w e p são constantes. 65
Tabela 12 – Parâmetros físicos dos planetas e a estrela do sistema Kepler-90. Os valores foram extraídos de Contreras e Boley (2018), Shallue e Vanderburg (2018). 66
Tabela 13 – Raios dos planetas que foram estimadas por Robnik e Seljak (2020). Calculamos os valores da massa dos planetas utilizando o método de raio-massa definido na equação (1). 66
Tabela 14 – Semieixo maior, excentricidade e inclinação dos planetas do sistema Kepler-90. Os valores foram extraídos de Contreras e Boley (2018) e Shallue e Vanderburg (2018). 67
Tabela 15 – Porcentagens das ressonâncias de movimento médio e sob o efeito das ressonâncias entre os planetas b e c, e g e h, no primeiro intervalo de excentricidade. 79
Tabela 16 – Similar à Tabela 15 para o segundo intervalo de excentricidade. 79
Tabela 17 – Largura da região coorbital dos planetas. 95
Tabela 18 – Elementos orbitais dos sistemas nominais selecionados para o sistema Kepler-90 tomados do primeiro intervalo de excentricidade. 142
Tabela 19 – Elementos orbitais dos sistemas nominais selecionados para o sistema Kepler-90 tomados do segundo intervalo de excentricidade. 143

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22

2 MÉTODO DE ANÁLISE DE FREQUÊNCIA 25
2.1 MAPA DE DIFUSÃO 26
2.2 DIFUSÃO 27
2.3 RESSONÂNCIA DE MOVIMENTOS MÉDIOS (RMM) 28

3 SISTEMA DE NETUNO 29
3.1 NETUNO, ANÉIS E SATÉLITES INTERNOS A TRITÃO 29
3.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS 34
3.3 EVOLUÇÃO ORBITAL DOS SATÉLITES DO SISTEMA INTERNO DE NETUNO 36
3.4 ESTUDO DA REGIÃO INTERNA DO SISTEMA DE NETUNO 39
3.4.1 Dinâmica do sistema interno 39
3.4.1.1 Região do anel Galle e satélite Naiade 41
3.4.1.2 Região dos anéis Le Verrier-Lassell-Arago e os satélites Thalassa e Despina . . . 42
3.4.1.3 Região do anel coorbital de Galatea, Adams e os satélites Galatea e Larissa 43
3.4.1.4 Região dos satélites Hipocampo e Proteus 45
3.5 TEMPO DE DIFUSÃO DO SISTEMA GLOBAL 48
3.6 RMM NO ANEL LE VERRIER 51
3.7 FORÇAS DISSIPATIVAS NOS ANÉIS DE NETUNO 55
3.8 SATÉLITES HIPOTÉTICOS NO SISTEMA INTERNO DE NETUNO 58
3.9 DISCUSSÃO DO CAPÍTULO 61

4 SISTEMA KEPLER-90 62
4.1 ESTUDO DINÂMICO DO SISTEMA KEPLER-90 64
4.1.1 Estabilidade dos planetas 69
4.1.2 RMM dos planetas 79
4.2 DISCUSSÃO DO CAPÍTULO 88

5 ANÁLISE DE UM CONJUNTO DE PARTÍCULAS TESTE NO SISTEMA KEPLER-90 90
5.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS 91
5.2 RMM ENTRE AS ÓRBITAS DOS PLANETAS C E I 104
5.3 RMM ALÉM DA ÓRBITA DO PLANETA H 108
5.3.1 Dinâmica das partículas teste além da órbita do planeta h 111
5.4 ESTRUTURA DAS REGIÕES 1 E 4 DO SISTEMA KEPLER-90 114
5.5 DISCUSSÕES DO CAPÍTULO 120

6 DISCUSSÃO GERAL 122

REFERÊNCIAS 126

APÊNDICE A – ALGORITMO FMFT 132
A.1 ALGORITMO MFT 132
A.2 ALGORITMO FMFT 135

APÊNDICE B – ELEMENTOS GEOMÉTRICOS 137
B.1 VETOR POSIÇÃO PARA ELEMENTOS GEOMÉTRICOS 138
B.2 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS PARA VETOR POSIÇÃO 140

APÊNDICE C – ELEMENTOS ORBITAIS DOS SISTEMAS NOMINAIS . 142

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO 144

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho estudamos dois sistemas diferentes, a região interna do sistema de Netuno e o sistema Kepler-90.

Netuno, um planeta gasoso, é o último planeta do Sistema Solar, sendo o menor planeta entre os outros planetas gigantes. As sondas Voyager trouxeram descobertas e informações importantes sobre os anéis de Júpiter, Saturno , Urano e Netuno. Lançada em 20 de agosto de 1977, a missão Voyager 2 teve como objetivo aproximar-se dos planetas gigantes Urano e Netuno e extrair a maior quantidade de informação dos planetas e seus satélites.

Após a descoberta dos seis satélites internos e anéis de Netuno em 1989 pela sonda espacial Voyager 2 (SMITH et al., 1989), foi descoberto outro satélite interno chamado Hipocampo. Através do Telescópio Espacial Hubble foi possível obter melhores imagens do sistema interno de Netuno. Showalter et al. (2013) descobriram um novo satélite através do Telescópio Espacial em 2013, inicialmente denominado S/N2004 N1 e agora é conhecido como o satélite Hipocampo (SHOWALTER et al., 2019). Esse pequeno satélite orbita entre os satélites Larissa e Proteus.

É importante ressaltar que a descoberta desses satélites Naiade, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa, Hipocampo e Proteus e os anéis planetários Galle, Le Verrier, Lasell, Arago, anel coorbital de Galatea, e o anel Adams no sistema interno de Netuno, reforça a importância de se ter mais informação de regiões estáveis que existem no sistema, como também o comportamento geral das órbitas das partículas dos anéis.

Miner, Wessen e Cuzzi (2007) sugeriram que o satélite Despina aparentemente não afeta gravitacionalmente o anel Le Verrier, apesar de que a ressonância de Lindblad 53:52 está localizada no centro do anel Le Verrier. Eles concluíram que a falta de não-homogeneidade azimutal ou estrutura radial pode excluir os efeitos gravitacionais do satélite Despina. Pater et al. (2018) mostraram que o brilho dos anéis Le Verrier e Adams provavelmente apresentam partículas com propriedades físicas similares.

Showalter et al. (2019) estimaram os elementos orbitais dos sete satélites, sendo incluído também o satélite Tritão, através de dados extraídos do Telescópio Espacial Hubble. Eles sugeriram que o satélite Hipocampo é produto de uma colisão de um corpo externo com o satélite Proteus, sendo Hipocampo um fragmento desse evento catastrófico. Brozović et al. (2019) estudaram a estabilidade orbital dos satélites internos identificando a ressonância de movimentos médios 73:69 entre os satélites Naiade e Thalassa ($73\lambda_{Thalassa}$-$69\lambda_{Naiade}$-$4\Omega_{Naiade}$). Eles sugeriram que os satélites Hipocampo e Proteus estão em ressonância de movimentos médios 11:13.

Após a descoberta do primeiro exoplaneta por Mayor e Queloz (1995), muitos exoplanetas e sistemas multi-planetários foram descobertos através de diversas técnicas e Telescópios, tal como o Telescópio Espacial Kepler. Observações feitas pelo Telescópio Kepler durante quatro anos, mostraram que existem sistemas multi-planetários, cujos planetas estão distribuídos de forma similar ao Sistema Solar (BORUCKI et al., 2010; BORUCKI et al., 2011).

O sistema multi-planetário KOI-351 é identificado como o sistema Kepler-90. Esse sistema contém oito planetas em torno da estrela KOI-351, onde os planetas internos b e c estão próximos da estrela, os

planetas i, d, e e f são intermediários e os planetas g e h são os mais externos, sendo que o planeta h está a uma distância orbital de 1 UA. Os raios dos planetas b e c são da ordem de $1.3R_{\oplus}$, enquanto que os planetas g e h são similares aos planetas gigantes do Sistema Solar e os planetas d, e e f são similares às super-terras (CABRERA et al., 2014).

Cabrera et al. (2014) estudaram a estabilidade do sistema Kepler-90 através de um conjunto de simulações numéricas por um tempo de 10^7 anos, embora nesse trabalho, os planetas b e c podem ser ignorados nas simulações numéricas. Além disso, nesse trabalho foi adotada uma série de estimativas com relação a massa dos planetas. Eles confirmaram que o sistema é um sistema hierárquico e que os planetas b e c estão em ressonância de movimentos médios 5:4.

Contreras e Boley (2018) mostraram, através de simulações numéricas, que o sistema Kepler-90 é estável, embora tenham assumido a excentricidade dos planetas igual a zero. Eles também estimaram a massa e o semieixo maior de cada planeta. Eles identificaram que os planetas b e c estão em ressonância de movimentos médios 5:4 e os planetas g e h estão em ressonância de movimentos médios 3:2. Além disso, Shallue e Vanderburg (2018) identificaram o planeta i localizado entre as órbitas dos planetas c e d.

Liang, Robnik e Seljak (2021) realizaram simulações numéricas de longo período para estudar a evolução orbital do planeta g e do planeta h, e observaram que os ângulos ressonantes, ϕ_g e ϕ_h, associados à ressonância 3:2 de movimentos médios desses planetas, em alguns períodos de tempo libra e em outros circula.

É importante ressaltar que a descoberta do planeta i, e a não estimativa dos valores de excentricidade dos planetas b, c, i, d, e, f, g e h reforça a importância de estudar a estabilidade do sistema assumindo diferentes intervalos de excentricidade para os planetas.

Portanto, o objetivo geral do trabalho é identificar as regiões de estabilidade de dois sistemas, o sistema de Netuno e Kepler-90, utilizando o método de análise de frequência.

O primeiro objetivo específico deste trabalho é estudar a evolução orbital de um conjunto de partículas na região interna do sistema de Netuno através da análise de frequência, onde estão os satélites (Naiade, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa, Hipocampo e Proteus) e seus anéis (Galle, Le Verrier, Lassel, Arago, anel coorbital de Galatea e o Adams) para diferentes valores de excentricidade das partículas. Também serão analisados os efeitos da pressão de radiação solar em partículas pequenas (da ordem de μm), que compõem os anéis de Netuno.

O segundo objetivo específico deste trabalho é estudar a dinâmica dos planetas b, c, i, d, e, f, g e h do sistema Kepler-90 através do método de análise de frequência para três intervalos diferentes de excentricidade. Também estudaremos a dinâmica de um conjunto de partículas na região de semieixo maior de 0.06 UA a 2 UA para diferentes valores de excentricidade.

No Capítulo 2 apresentamos a metodologia que é utilizada em ambos sistemas.

No Capítulo 3 apresentamos uma revisão bibliográfica sobre os sete satélites internos e os cinco anéis do sistema interno de Netuno. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos utilizando o método descrito no Capítulo 2.

No Capítulo 4 apresentamos uma revisão bibliográfica sobre os oito planetas do sistema Kepler-90. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao assumir três intervalos de excentricidade para

os oito planetas.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos ao incluir conjuntos de partículas teste nos dez "sistemas Kepler-90" que foram selecionados aleatoriamente do capítulo 3. Neste capítulo selecionamos um sistema representativo e analisamos as regiões entre as órbitas dos planetas c e i, e além da órbita do planeta h.

No Capítulo 6 é apresentada uma discussão geral.

6 DISCUSSÃO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estudar a estabilidade de dois sistemas, o sistema de Netuno e o sistema Kepler-90, através do método de análise de frequência.

No capítulo 3, a região interna do sistema de Netuno é analisada incluindo os efeitos gravitacionais de Naiade, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa, Hipocampo, Proteus e Tritão, sobre um conjunto de partículas teste com diferentes valores de excentricidade. Simulamos partículas que valores iniciais em elementos orbitais geométricos, sendo portanto transformados para elementos orbitais osculadores, seguindo as equações apresentadas por Renner e Sicardy (2006). Depois, essas partículas foram simuladas numericamente. Nos diagramas a $\times$ e, as partículas teste estão organizadas na grade retangular do espaço-fase a vs e, essas partículas são apresentadas em elementos orbitais geométricos, onde cada retângulo representa o valor inicial das partículas. Observamos regiões em que as partículas teste permanecem após $\sim 10^4 T_L$ no intervalo de semieixo maior de $0.6 D_{AA}$ a $1.4 D_{AA}$, e $\sim 10^4 T_P$, e no intervalo de semieixo maior de $1.4 D_{AA}$ a $2.2 D_{AA}$. Ao incluir o satélite Hipocampo, encontramos partículas que permanecem entre as órbitas de Hipocampo e Proteus, essas partículas apresentam um tempo de difusão de $\sim 10^6$ anos. Observamos que os satélites Despina, Galatea, Larissa e Proteus "limpam" a região em torno deles, permanecendo partículas coorbitais a esses satélites. As partículas que estão em torno dos satélites Naiade e Thalassa apresentam órbitas irregulares cujos valores de Log D são próximos de zero.

Verificamos que o tempo de difusão das partículas teste nos anéis Galle e Lassel tem tempo de difusão de 10^9 anos a 10^{11} anos para todos os valores de excentricidade. O anel Le Verrier está no intervalo de tempo de difusão de 10^4 anos a 10^7 anos para valores de excentricidade de 0 a 0.012. No entanto, quando diminuímos o passo do semieixo maior, aparecem partículas em ressonância para maiores valores de excentricidade. Essas partículas sobreviveram, no intervalo de excentricidade de 0 a 0.025, com um tempo de difusão de 10^6 anos.

O anel Arago é estável, cujo tempo de difusão das partículas teste é de 10^8 anos até 10^{11} anos, para partículas teste com valores de excentricidade de 0 e 0.004. O tempo de difusão do anel co-orbital de Galatea está no intervalo de 10^4 anos a 10^7 anos.

Mostramos que as RMMs 52:53 e 53:54 com o satélite Despina, sugeridas por Miner, Wessen e Cuzzi (2007), são encontradas no anel Le Verrier. Além disso, também encontramos um conjunto de partículas que estão em RMM. Essas partículas possuem valores de excentricidade iguais a zero. Identificamos que a RMM 51:52 com o satélite Despina está localizada na borda do anel Lassell, cujos ângulos ressonantes das partículas libram em torno de 180° (ver a Figura 17 e Figura 20). O conjunto de partículas teste em RMM 52:53 e 53:54 podem ser a causa do pico de intensidade do brilho na borda interna do anel Le Verrier, seguindo o dado observacional apresentado por Pater et al. (2018).

Os resultados apresentados para os anéis indicam que eles são estáveis. Realizamos um estudo detalhado do sistema interno incluindo o efeito da força de radiação Solar e o arrasto de plasma.

A pressão da radiação solar é importante para partículas pequenas localizadas nos anéis de Júpiter, Saturno, Urano e até mesmo no sistema de Plutão (embora Plutão não possui um sistema de anéis).

No sistema de Netuno essa força dissipativa causa apenas pequenas variações nas excentricidades das partículas do anel. As excentricidades das partículas são da ordem de 10^{-3} devido às perturbações gravitacionais dos satélites, incluindo a pressão de radiação essas permanecem com a mesma ordem de grandeza. As partículas não cruzam as órbitas dos satélites quando esses novos valores de excentricidade são assumidos.

O tempo de vida das partículas dos anéis é provavelmente devido a diminuição do semieixo maior causado pelos efeitos seculares da componente do arrasto de Poynting-Robertson. O tempo de vida dos anéis que possuem partículas do tamanho de 1 μm é de $\sim 10^4$ anos, e 10^5 anos quando as partículas são maiores (10 μm de raio). O arrasto do plasma pode ser uma força dissipativa importante, mas precisamos de mais informações para analisar os efeitos nas partículas dos anéis de Netuno.

Concluímos que o principal efeito que pode diminuir a população de grãos de poeira de tamanho μ m nos anéis do sistema de Netuno é o efeito do arrasto de Poynting-Robertson. Além disso, verificamos que o sistema interno de Netuno possui uma região ampla, entre as órbitas dos satélites Larissa e Hipocampo, que pode abrigar um conjunto de objetos de tamanho menores que 6 km de raio.

Outro objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica do sistema Kepler-90 para três intervalos diferentes de valores de excentricidade para cada planeta. O primeiro intervalo de excentricidade é de 0 até 10^{-3}, o segundo intervalo de excentricidade é de 10^{-3} até 10^{-2} e o terceiro intervalo de excentricidade é de 10^{-2} até 10^{-1}. Os valores de excentricidade, argumento do pericentro (ω), longitude do nodo ascendente (Ω) e a longitude media (λ) foram escolhidos aleatoriamente em cada intervalo de excentricidade. As condições iniciais de a e i dos planetas do sistema Kepler-90 foram extraídos de Contreras e Boley (2018) e Shallue e Vanderburg (2018) cujas condições iniciais foram extraídas da Tabela 12 e da Tabela 14.

O tempo de integração das simulações numéricas foi de $10^4\ T_h$. Após as simulações numéricas, aplicamos o algoritmo computacional de análise de frequência (ŠIDLICHOVSKÝ; NESVORNÝ, 1997) para cada arquivo de saída para cada planeta nos três intervalos de excentricidade.

100% dos sistemas pertencentes ao primeiro intervalo de excentricidade permanecem até o tempo final da integração numérica. Identificamos a RMM 5:4, onde a evolução temporal dos ângulos $\phi_{5:4}^{(1)}$ e $\phi_{5:4}^{(2)}$ dos planetas b com c classificamos como em RMM e sob o efeito da RMM. No entanto, encontramos que em 2% e 7% dos sistemas, os ângulos ressonantes $\phi_{5:4}^{(1)}$ e $\phi_{5:4}^{(2)}$ libram, e em 98% e 93% dos sistemas os ângulos $\phi_{5:4}^{(1)}$ e $\phi_{5:4}^{(2)}$ estão sob o efeito da RMM, respectivamente. Além disso, encontramos que na RMM 3:2 dos planetas g e h, os ângulos $\phi_{3:2}^{(1)}$ e $\phi_{3:2}^{(2)}$ também são classificados da mesma forma. Observamos que em 10% e 25% dos sistemas, os ângulos ressonantes $\phi_{3:2}^{(1)}$ e $\phi_{3:2}^{(2)}$ libram, e em 90% e 75% dos sistemas os ângulos $\phi_{3:2}^{(1)}$ e $\phi_{3:2}^{(2)}$ estão sob o efeito da RMM, respectivamente.

No segundo intervalo de excentricidade todos os sistemas sobreviveram até 1.2×10^4 anos. Quando o tempo da simulação numérica é maior que $10^4 T_h$, ou seja, o tempo de integração é de $10^5 T_h$, 99% dos sistemas sobreviveram. O comportamento dos ângulos $\phi_{5:4}^{(1)}$ e $\phi_{5:4}^{(2)}$ dos planetas b e c libram e circulam em determinados intervalos de tempo, sendo um comportamento intermitente em escala de tempo curta, longa ou curta & longa. Encontramos que em $\sim$92% dos sistemas, os planetas g e h estão sob efeito da RMM 3:2 (ver a Tabela16).

No terceiro intervalo de excentricidade, somente 6% dos sistemas permanecem até $10^4 T_h$, a instabilidade nos sistemas surge quando o tempo da simulação numérica é acrescentado até $10^5\ T_h$. Os sistemas mostram instabilidade devido à colisão ou ejeção dos planetas, quando apresentam valores de Log D próximos a zero.

Verificamos que a massa dos planetas g e h nos três intervalos de excentricidade são importantes para a estabilidade dos sistemas analisados, sendo que o planeta h apresenta uma variação de excentricidade pequena comparada aos outros planetas, por ser o mais massivo dos 8 planetas.

Se o sistema Kepler-90 apresenta valores de excentricidade nos dois primeiros intervalos de excentricidade, observamos que os planetas b e c e g e h estão sob efeito das RMM 5:4 e RMM 3:2, respectivamente.

Os resultados apresentados anteriormente mostram que não aparecem cadeias ressonantes entre os quatro planetas i, d, e e f, ao contrário, identificamos que existem planetas que estão próximos da RMM 3:1 dos planetas i e e, da RMM 11:5 dos planetas d e f e da RMM 15:11 dos planetas e e f. A cadeia ressonante estimada por Contreras e Boley (2018) é identificada entre os planetas d, e e f, cujo ângulo ressonante circula nos dois primeiros intervalos de excentricidade.

Também analisamos as regiões estáveis dos "sistemas Kepler-90" incluindo o efeito gravitacional dos planetas b, c, i, d, e, f, g e h, sobre um conjunto de partículas teste com diferentes valores de excentricidade. Selecionamos aleatoriamente cinco "sistemas Kepler-90" que sobreviveram nos dois primeiros intervalos de excentricidade. Observamos que entre as órbitas dos "planetas e" e h não encontramos regiões estáveis. Somente encontramos partículas com baixa excentricidade próximas aos planetas e, f, g e h. Isto pode ser devido ao valor máximo de variação de excentricidade que alcançam os planetas, ver a Figura 29(a) e Figura 29(b). Por exemplo, o valor máximo de variação de excentricidade que alcançam os planetas no primeiro intervalo de excentricidade sugere que o planeta h perturba os planetas e em consequência as partículas teste. Os planetas d, e, f, g e h limpam as regiões entre suas órbitas. Também encontramos regiões estáveis entre as órbitas dos planetas c e i, i e d, d e e e além da órbita do planeta h (ver a Figura 39 até Figura 45 e a Figura 57).

As regiões coorbitais não são sempre identificadas além da órbita do planeta e, no primeiro intervalo de excentricidade. Na Figura 39 (a), notamos partículas coorbitais aos planetas g e h. Isto pode ser devido ao valor inicial da anomalia média (M_0) dos planetas g e h. Neste caso o valor de M_0 desses planetas difere de $\sim$30° (ver o Apêndice C, Tabela 18). Na Figura 43 (g), notamos que os planetas g e h não apresentam partículas coorbitais, seus valores de M_0 estão próximos (ver o Apêndice C, Tabela 19).

Analisamos as regiões estáveis que estão localizadas entre as órbitas dos planetas c e i, e além da órbita do planeta h. Identificamos onze RMMs entre as órbitas dos planetas b e i que são as RMMs 3:2, 4:3, 5:4, 6:5, 7:6, 9:8, 10:9, 9:7 e 13:10. Também identificamos a RMM 1:2 com o planeta b e a RMM 1:2 com o planeta c. Além da órbita do planeta h, região estável, encontramos partículas teste em RMM. Essas ressonâncias foram identificadas nas curvas de frequências para os diferentes valores de excentricidade (ver a Figura 58 e Figura 59). Identificamos cinco RMM além da órbita do planeta h as quais são a RMM 1:2, 3:4, 3:5, 3:7 e 3:8.

A região 1 está localizada entre as órbitas dos planetas c e i. Identificamos que essa região apresenta falhas que podem estar associadas às RMMs. Essas falhas estão presentes nos semieixos maiores que correspondem às RMMs 1:2 com o planeta c, 1:2 com o planeta b e 2:1 e 3:2 com o planeta i. Além disso, encontramos partículas em RMMs 4:5, 9:7, 5:4, 6:5 e 7:6 com o planeta i. Notar que a região 1 é estável nos dez "sistemas Kepler-90".

Além da órbita do planeta h, identificada como região 4, verificamos que o planeta h abriga o maior conjunto de partículas teste em RMM 1:2, quando comparado aos outros conjuntos de partículas que estão em outras RMMs.

Concluímos que o planeta h influencia a configuração final da região 4, porque é o mais próximo e o mais massivo dos planetas do sistema Kepler-90. Além disso, fizemos um breve comparação entre o Cinturão Principal de asteroides e a região interna localizada entre os planetas b e i. Nessa região também aparecem falhas que podem estar associadas as ressonâncias, similar às Falhas de Kirkwood (observada para valores de Log D < -8). O planeta h, assim como Netuno, influencia a região externa. Localizamos regiões onde objetos podem estar em ressonância com o planeta h, similar aos objetos localizados no Cinturão de Kuiper.

Como trabalhos futuros podemos destacar a análise do campo magnético de Netuno com o intuito de verificar o efeito do arrasto de plasma nos anéis do planeta. No caso do sistema Kepler-90 são necessárias maiores informações dos parâmetros físicos dos planetas, dados esses que provavelmente serão fornecidos pelo Telescópio James Webb, ajudarão a obter maiores informações sobre a formação do sistema.

REFERÊNCIAS

AGOL, E. et al. Refining the transit-timing and photometric analysis of trappist-1: Masses, radii, densities, dynamics, and ephemerides. **The Planetary Science Journal**, IOP Publishing, v. 2, n. 1, p. 1, 2021.

BORDERIES, N.; LONGARETTI, P. Description and behavior of streamlines in planetary rings. **Icarus**, Elsevier, v. 72, n. 3, p. 593–603, 1987.

BORUCKI, W. J. et al. Kepler planet-detection mission: introduction and first results. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 327, n. 5968, p. 977–980, 2010.

BORUCKI, W. J. et al. Characteristics of planetary candidates observed by kepler. ii. analysis of the first four months of data. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 736, n. 1, p. 19, 2011.

BOTTKE, W. F. et al. Linking the collisional history of the main asteroid belt to its dynamical excitation and depletion. **Icarus**, v. 179, n. 1, p. 63–94, 2005. ISSN 0019-1035. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103505001958.

BROZOVIĆ, M. et al. Orbits and resonances of the regular moons of neptune. **Icarus**, Elsevier, p. 113462, 2019.

BULIRSCH, R.; STOER, J. Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods. **Numerische Mathematik**, Springer, v. 8, n. 1, p. 1–13, 1966.

CABRERA, J. et al. The planetary system to kic 11442793: a compact analogue to the solar system. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 781, n. 1, p. 18, 2014.

CENTER, M. P. **List Of Transneptunian Objects**. 2021. Disponível em: https://minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html. Acesso em: 29 sep. 2021.

CENTER, M. P. **Minor Planet Names: Alphabetical List**. 2021. Disponível em: https://minorplanetcenter.net//iau/lists/MPNames.html. Acesso em: 29 sep. 2021.

CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 304, n. 4, p. 793–799, 04 1999. ISSN 0035-8711. Disponível em: https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x.

CHARNOZ, S. et al. The origin of planetary ring systems. **arXiv preprint arXiv:1703.09741**, 2017.

CHIRIKOV, B. V. A universal instability of many-dimensional oscillator systems. **Physics reports**, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 263–379, 1979.

CLOUTIS, E. A.; IZAWA, M. R.; BECK, P. Reflectance spectroscopy of chondrites. In: **Primitive Meteorites and Asteroids**. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 273–343.

CONTRERAS, A. G.; BOLEY, A. 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**, IOP Publishing, v. 155, n. 3, p. 139, 2018.

CORREIA, A. et al. The harps search for southern extra-solar planets-xix. characterization and dynamics of the gj 876 planetary system. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 511, p. A21, 2010.

CORREIA, A. et al. The coralie survey for southern extra-solar planets-xiii. a pair of planets around hd 202206 or a circumbinary planet? **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 440, n. 2, p. 751–758, 2005.

CORREIA, A. et al. The harps search for southern extra-solar planets-xvi. hd 45364, a pair of planets in a 3: 2 mean motion resonance. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 496, n. 2, p. 521–526, 2009.

COUETDIC, J. et al. Dynamical stability analysis of the hd 202206 system and constraints to the planetary orbits. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 519, p. A10, 2010.

DATABASE, E. O. **Repositorio de base de dados do sistema Kepler-90**. 2020. Disponível em: http://exoplanets.org/detail/KIC_11442793_b,KIC_11442793_c,KIC_11442793_d,KIC_11442793_e,KIC_11442793_f,KIC_11442793_g,KIC_11442793_h. Acesso em: 01 ene. 2020.

DATABASE, E. O. **Repositorio de base de dados para sistemas extrasolares**. 2020. Disponível em: http://exoplanets.org/table. Acesso em: 01 ene. 2020.

DERMOTT, S. F. et al. Dynamical evolution of the inner asteroid belt. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 505, n. 2, p. 1917–1939, 2021.

DERMOTT, S. F.; MURRAY, C. D. Nature of the kirkwood gaps in the asteroid belt. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 301, n. 5897, p. 201–205, 1983.

DUCROT, E. et al. Trappist-1: Global results of the spitzer exploration science program red worlds. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 640, p. A112, 2020.

ESPOSITO, L. **Planetary rings: a post-equinox view**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. v. 15.

ESPOSITO, L. W. Planetary rings. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 65, n. 12, p. 1741, 2002.

EXOPLANET, N. **Exoplanetas y sistemas extrasolares confirmados**. 2021. Disponível em: https://exoplanets.nasa.gov/. Acesso em: 27 sep. 2021.

GASLAC, D. G. et al. Analysing the region of the rings and small satellites of neptune. **Astrophysics and Space Science**, Springer, v. 365, n. 1, p. 1–10, 2020.

GEORGAKARAKOS, N.; DOBBS-DIXON, I. Do the planets in the hd 34445 system really exist? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 488, n. 3, p. 3818–3825, 2019.

GEROYANNIS, V. S. A numerical method for computing optimum radii of host stars and orbits of planets, with application to kepler-11, kepler-90, kepler-215, hd 10180, hd 34445, and trappist-1. **arXiv preprint arXiv:2009.09732**, 2020.

GLADMAN, B. Nomenclature in kuiper belt. **Highlights of Astronomy**, Cambridge University Press, v. 12, p. 193–198, 2002.

GLADMAN, B.; MARSDEN, B. G.; VANLAERHOVEN, C. Nomenclature in the outer solar system. **The Solar System Beyond Neptune**, Citeseer, v. 43, 2008.

GRIMM, S. L. et al. The nature of the trappist-1 exoplanets. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 613, p. A68, 2018.

HADDEN, S.; LITHWICK, Y. A criterion for the onset of chaos in systems of two eccentric planets. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 156, n. 3, p. 95, 2018.

HAN, E. et al. Exoplanet orbit database. II. updates to exoplanets.org. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 126, n. 943, p. 827–837, sep 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1086/678447.

HEDMAN, M. M. et al. Of horseshoes and heliotropes: Dynamics of dust in the encke gap. **Icarus**, Elsevier, v. 223, n. 1, p. 252–276, 2013.

JACOBSON, R. A. The orbits of the neptunian satellites and the orientation of the pole of neptune. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 137, n. 5, p. 4322, 2009.

JEWITT, D.; LUU, J.; TRUJILLO, C. Large kuiper belt objects: the mauna kea 8k ccd survey. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 115, n. 5, p. 2125, 1998.

KARKOSCHKA, E. Sizes, shapes, and albedos of the inner satellites of neptune. **Icarus**, Elsevier, v. 162, n. 2, p. 400–407, 2003.

KIRKWOOD, D. **Meteoric astronomy: a treatise on shooting-stars, fire-balls, and aerolites**. [S.l.]: JB Lippincott & Company, 1867.

LASKAR, J. The chaotic motion of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones. **Icarus**, Elsevier, v. 88, n. 2, p. 266–291, 1990.

LASKAR, J. Frequency analysis of a dynamical system. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 56, n. 1-2, p. 191–196, 1993.

LASKAR, J. Large-scale chaos in the solar system. **Astronomy and Astrophysics**, v. 287, p. L9–L12, 1994.

LASKAR, J.; FROESCHLÉ, C.; CELLETTI, A. The measure of chaos by the numerical analysis of the fundamental frequencies. application to the standard mapping. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 56, n. 2-3, p. 253–269, 1992.

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

LISSAUER, J. J. et al. Validation of kepler's multiple planet candidates. ii. refined statistical framework and descriptions of systems of special interest. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 784, n. 1, p. 44, 2014.

LISSAUER, J. J. et al. Architecture and dynamics of kepler's candidate multiple transiting planet systems. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 197, n. 1, p. 8, 2011.

LOVIS, C. et al. The harps search for southern extra-solar planets-xxviii. up to seven planets orbiting hd 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 528, p. A112, 2011.

LUGER, R. et al. A seven-planet resonant chain in trappist-1. **Nature Astronomy**, Nature Publishing Group, v. 1, n. 6, p. 1–8, 2017.

LYONS, J. R. Metal ions in the atmosphere of neptune. **Science**, JSTOR, p. 648–651, 1995.

MACDONALD, M. G. et al. A dynamical analysis of the kepler-80 system of five transiting planets. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 152, n. 4, p. 105, 2016.

MAHAJAN, N.; WU, Y. Stability of the kepler-11 system and its origin. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 795, n. 1, p. 32, 2014.

MALHOTRA, R. Resonant kuiper belt objects: a review. **Geoscience letters**, SpringerOpen, v. 6, n. 1, p. 1–9, 2019.

MALHOTRA, R. et al. Neptune's 5: 2 resonance in the kuiper belt. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 156, n. 2, p. 55, 2018.

MARZARI, F. et al. Origin and evolution of the vesta asteroid family. **Astronomy and Astrophysics**, v. 316, p. 248–262, 1996.

MARZARI, F.; SCHOLL, H.; TRICARICO, P. Frequency map analysis of the 3/1 resonance between planets b and c in the 55 cancri system. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 442, n. 1, p. 359–364, 2005.

MARZARI, F.; TRICARICO, P.; SCHOLL, H. Saturn trojans: stability regions in the phase space. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 579, n. 2, p. 905, 2002.

MARZARI, F.; TRICARICO, P.; SCHOLL, H. The matros project: stability of uranus and neptune trojans. the case of 2001 qr322. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 410, n. 2, p. 725–734, 2003.

MARZARI, F.; TRICARICO, P.; SCHOLL, H. Stability of jupiter trojans investigated using frequency map analysis: the matros project. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 345, n. 4, p. 1091–1100, 2003.

MAYOR, M.; QUELOZ, D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 378, n. 6555, p. 355–359, 1995.

MIGASZEWSKI, C.; SŁONINA, M.; GOŹDZIEWSKI, K. A dynamical analysis of the kepler-11 planetary system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 427, n. 1, p. 770–789, 2012.

MIGNARD, F. Effects of radiation forces on dust particles in planetary rings. In: **IAU Colloq. 75: Planetary Rings**. [S.l.: s.n.], 1984. p. 333–366.

MINER, E. D.; WESSEN, R. R.; CUZZI, J. N. **Planetary ring systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

MOONS, M. Review of the dynamics in the kirkwood gaps. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 65, n. 1, p. 175–204, 1996.

MORDASINI, C. et al. Characterization of exoplanets from their formation-ii. the planetary mass-radius relationship. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 547, p. A112, 2012.

MUÑOZ-GUTIÉRREZ, M. et al. Long-term dynamical stability in the outer solar system i: The regular and chaotic evolution of the 34 largest trans-neptunian objects. **arXiv preprint arXiv:2107.00240**, 2021.

MUNÕZ-GUTIÉRREZ, M. A.; WINTER, S. G. Long-term evolution and stability of saturnian small satellites: Aegaeon, methone, anthe and pallene. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 470, n. 3, p. 3750–3764, 2017.

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

NASA. **Parâmetro físico de Netuno**. 2017. Disponível em: https://ssd.jpl.nasa.gov/?planet_phys_par. Acesso em: 01 feb. 2017.

NASA. **Parâmetro físico dos satélites de Netuno**. 2017. Disponível em: https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par. Acesso em: 01 feb. 2017.

NASA. **Posição e velocidade dos satélites de Netuno**. 2017. Disponível em: http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi. Acesso em: 01 feb. 2017.

NASA. **Asteroid Classifications**. 2021. Disponível em: https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-depth/. Acesso em: 29 sep. 2021.

NESVORNY. **Programa do algoritmo da transformada de Fourier de frequência modificada**. 2018. Disponível em: https://minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html. Acesso em: 09 ene. 2018.

NESVORNÝ, D. Dynamical evolution of the early solar system. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Annual Reviews, v. 56, p. 137–174, 2018.

NESVORNÝ, D.; MORBIDELLI, A. Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 116, n. 6, p. 3029, 1998.

PATER, I. D. et al. The rings of neptune. In: ____. **Planetary Ring Systems: Properties, Structure, and Evolution**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2018. (Cambridge Planetary Science), p. 112–124.

PATER, I. de et al. The dynamic neptunian ring arcs: evidence for a gradual disappearance of liberté and resonant jump of courage. **Icarus**, Elsevier, v. 174, n. 1, p. 263–272, 2005.

PORCO, C. et al. Neptune and triton. **Univ. of Arizona Press, Tucson. This Page Intentionally Left Blank**, 1995.

PRESS, W. H. et al. **Numerical recipes in Fortran 77: volume 1, volume 1 of Fortran numerical recipes: the art of scientific computing**. [S.l.]: Cambridge university press, 1992.

RAGOZZINE, D.; TEAM, K. The very compact five exoplanet system koi-500: Mass constraints from ttvs, resonances, and implications. In: **AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts# 44**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 44.

RENNER, S.; SICARDY, B. Use of the geometric elements in numerical simulations. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 94, n. 2, p. 237–248, 2006.

RENNER, S. et al. Neptune's ring arcs: Vlt/naco near-infrared observations and a model to explain their stability. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 563, p. A133, 2014.

ROBERTS, A. C.; MUÑOZ-GUTIÉRREZ, M. A. Dynamics of small bodies in orbits between jupiter and saturn. **Icarus**, Elsevier, p. 114201, 2020.

ROBNIK, J.; SELJAK, U. Kepler data analysis: Non-gaussian noise and fourier gaussian process analysis of stellar variability. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 159, n. 5, p. 224, 2020.

ROBNIK, J.; SELJAK, U. Matched filtering with non-gaussian noise for planet transit detections. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 504, n. 4, p. 5829–5839, 2021.

ROBUTEL, P.; LASKAR, J. Frequency map and global dynamics in the solar system i: Short period dynamics of massless particles. **Icarus**, Elsevier, v. 152, n. 1, p. 4–28, 2001.

SANTOS, P. M. P. d. Análise da estabilidade da região externa do sistema plutão-caronte após a descoberta dos novos satélites nix e hidra: aplicação à sonda new horizons. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2010.

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**, IOP Publishing, v. 155, n. 2, p. 94, 2018.

SHEPPARD, S. S. et al. A new high perihelion trans-plutonian inner oort cloud object: 2015 tg387. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 157, n. 4, p. 139, 2019.

SHOWALTER, M. et al. A three-body resonance confines the ring-arcs of neptune. In: **AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 49.

SHOWALTER, M. et al. New satellite of neptune: S/2004 n 1. **Central Bureau Electronic Telegrams**, v. 3586, 2013.

SHOWALTER, M. et al. The seventh inner moon of neptune. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 566, n. 7744, p. 350, 2019.

SHOWALTER, M. R. et al. The neptune system revisited: New results on moons and rings from the hubble space telescope. In: **AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 45.

ŠIDLICHOVSKÝ, M.; NESVORNÝ, D. Frequency modified fourier transform and its application to asteroids. In: **The Dynamical Behaviour of our Planetary System**. [S.l.]: Springer, 1997. p. 137–148.

SMITH, B. A. et al. Voyager 2 at neptune: Imaging science results. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 246, n. 4936, p. 1422–1449, 1989.

THOMAS, P. The shape of triton from limb profiles. **Icarus**, Elsevier, v. 148, n. 2, p. 587–588, 2000.

WALKER, G. H.; FORD, J. Amplitude instability and ergodic behavior for conservative nonlinear oscillator systems. **Physical Review**, APS, v. 188, n. 1, p. 416, 1969.

WEISS, L. M.; MARCY, G. W. The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 earth radii. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 783, n. 1, p. L6, 2014.

WINTER, S. G.; MADEIRA, G.; SFAIR, R. Neptune's ring arcs confined by coorbital satellites: dust orbital evolution through solar radiation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 496, n. 1, p. 590–597, 2020.

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

WRIGHT, J. T. et al. The exoplanet orbit database. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, IOP Publishing, v. 123, n. 902, p. 412, 2011.

ZHANG, K.; HAMILTON, D. P. Orbital resonances in the inner neptunian system: I. the 2: 1 proteus–larissa mean-motion resonance. **Icarus**, Elsevier, v. 188, n. 2, p. 386–399, 2007.

ZHANG, K.; HAMILTON, D. P. Orbital resonances in the inner neptunian system: Ii. resonant history of proteus, larissa, galatea, and despina. **Icarus**, Elsevier, v. 193, n. 1, p. 267–282, 2008.