

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 20/02/2021.

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

GUSTAVO OLIVEIRA MADEIRA

**Estudo da evolução orbital de partículas em ressonância de corotação e Lindblad e sob
influência de satélites coorbitais : aplicação aos arcos planetários**

Guaratinguetá

2019

Gustavo Oliveira Madeira

Estudo da evolução orbital de partículas em ressonância de corrotação e Lindblad e sob influência de satélites coorbitais : aplicação aos arcos planetários

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientadora: Prof^a Dra. Silvia Maria Giuliatti Winter

Guaratinguetá
2019

Madeira, Gustavo Oliveira
M181e Estudo da evolução orbital de partículas em ressonância de corotação e Lindblad e sob influência de satélites coorbitais: aplicação aos arcos planetários / Gustavo Oliveira Madeira– Guaratinguetá, 2019.
108 f : il.
Bibliografia: f. 106-108

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientadora: Prof^a Dr^a Silvia Maria Giuliatti Winter

1. Satélites 2. Órbitas 3. Perturbação (Astronomia) I. Título.

CDU 629.783(043)

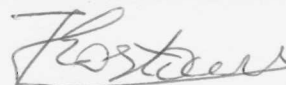
Ana Cristina Figueiredo Loureiro
Bibliotecária CRB-8/7094

GUSTAVO OLIVEIRA MADEIRA

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

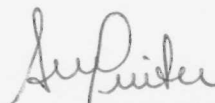
PROGRAMA: FÍSICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov
Coordenador

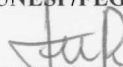
BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª. Dr.ª. SILVIA MARIA GIULIATTI WINTER
Orientadora / UNESP/FEG



Prof. Dr. ANDRÉ IZIDORO FERREIRA DA COSTA
UNESP/FEG



Prof. Dr. FERNANDO VIRGILIO ROIG
Observatório Nacional

DADOS CURRICULARES

GUSTAVO OLIVEIRA MADEIRA

NASCIMENTO 03/12/1994 - Cachoeira Paulista / SP

FILIAÇÃO José Márcio Madeira
Liliam Aparecida de Souza Oliveira

2012 / 2016 Bacharelado em Física
UNESP Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho, que não é mérito solitário mas de diversas pessoas. Agradeço meus pais pela minha formação moral e ética. Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro. Agradeço meus amigos pelas horas de lazer, em especial Luana Liberato, Victor Lattari e Tiago Francisco, que estiveram ao meu lado durante toda Graduação e Mestrado. Agradeço aos Profs. André Izidoro e Fernando Roig por suas críticas construtivas e se disponibilizarem a avaliar minha dissertação, ao Prof. Othon Winter, que como membro da minha banca de Qualificação fez diversas sugestões ao meu trabalho, e ao Prof. Rafael Sfair por me ajudar em diversos momentos. Agradeço aos professores e professoras que me ensinaram o que sei e influenciaram minha forma de ver o mundo. Por último agradeço minha orientadora, Professora Silvia Giuliatti Winter, por ser minha mentora há tantos anos e ter me feito o profissional que sou hoje.

Este trabalho contou com o apoio das seguintes entidades:

Processo 2016/24488-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) - código de financiamento 001.

*“Se vais entrar dentro de ti arma-te até aos dentes”
(Antônio Callado)*

RESUMO

Orbitando Saturno encontram-se Anthe, Methone e Aegaeon, três pequenos satélites coorbitais a arcos planetários e em ressonância de corrotação excêntrica com o satélite Mimas, do tipo 10:11 para o arco de Anthe, 14:15 para o arco de Methone e do tipo 7:6 para o arco do anel G (arco coorbital ao satélite Aegaeon). Neste trabalho é estudada a dinâmica de partículas micrométricas em ressonância de corrotação excêntrica, sob o efeito de forças perturbadoras (força de radiação solar e arrasto do plasma) e da influência gravitacional de pequenos satélites. A ressonância de corrotação excêntrica $m + 1:m$ é responsável por criar m sítios nos quais as partículas permanecem azimutalmente confinadas. Quando incluídos satélites hipotéticos nos sítios, as partículas rapidamente colidem como estes, de modo que os sítios ficam vazios em algumas centenas de anos. Ainda foi constatado que existe uma correlação entre o tempo de vida das partículas com o tamanho físico do satélite, sendo verificado um aumento do tempo de vida dos sítios com o raio do satélite, para satélites com raios da ordem de metros, passando a decrescer para satélites com raios da ordem de quilômetros. Tal resultado se deve ao fato dos satélites pequenos tenderem a apenas perturbar a órbita das partículas, as quais realizam maiores excursões em relação ao centro do sítio, enquanto satélites maiores confinam as partículas azimutalmente, de modo que estas permanecem em ressonância de corrotação com Mimas e com o satélite. Efeitos gerados no semi-eixo maior pela força de radiação solar e arrasto do plasma levam as partículas a saírem do confinamento e os efeitos na excentricidade promovem cruzamentos da trajetória das partículas com a órbita dos satélites, facilitando colisões. Supondo serem formados por partículas menores que $10 \mu m$, os sítios das ressonâncias de corrotação 7:6, 14:15 e 10:11 têm tempos de vida máximos menores que 140, 25 e 15 anos, respectivamente. O tempo para estes reporem o material por meio do processo de colisões com projéteis interplanetários é, no mínimo, uma ordem de grandeza maior que os tempos de vida obtidos. Logo, os arcos devem ser estruturas transientes. Analisando o arco do anel G, vê-se que partículas menores que $10 \mu m$ saem do arco ou colidem com Aegaeon em menos de 30 anos, enquanto as ejetadas da superfície deste satélite possuem tempos de vida máximos de 300 anos, de modo que o satélite não corresponde a fonte de material para o arco e para o anel. A dinâmica dos arcos do anel Adams de Netuno também foi analisada, supondo que estes são confinados azimutalmente por quatro satélites coorbitais. Verifica-se que dois dos arcos se encontram em ressonância de Lindblad excêntrica 42:43 com Galatea e dois não, de modo que as partículas fora da ressonância sofrem encontros próximos com os satélites e saem do confinamento. Incluindo a força de radiação solar, todas as partículas tendem a sair dos arcos, entretanto as provenientes dos dois primeiros arcos permanecem na região próxima.

PALAVRAS-CHAVE: Arcos planetários. Anéis planetários. Ressonâncias orbitais. Forças dissipativas. Satélites.

ABSTRACT

Anthe, Methone and Aegaeon are three tiny saturnian moons. They are coorbital to planetary arcs and are trapped in corotation eccentric resonances with Mimas: 10:11 Anthe's arc, 14:15 Methone's arc and 7:6 G ring arc (Aegaeon's arc). In this work we studied the dynamics of the particles trapped in the corotation eccentric resonances under the effects of dissipative forces (solar radiation force and plasma drag) and coorbitals moonlets. The $m + 1:m$ corotation eccentric resonance creates m sites where the particles will be azimuthally confined for more than 100 thousand years. When satellites are located in the sites, the particles quickly collide with them and these sites are cleaned in a few hundred years. We verified an increase in the lifetime of the sites with the satellites' radii, for moons with radius of the order of meters, and a decrease in the lifetime with an increase of the satellites' radii, for kilometer-sized satellites. Satellites with radii of the order of meters only disturb the particles' orbits, so the particles perform large excursions in relation to the site's center. Satellites with kilometric radii azimuthally confine the particles, which remain in resonance with Mimas and with the coorbital satellite. The solar radiation force and plasma drag effects on the semimajor axis remove particles from the azimuthal confinement and the effects on the eccentricity favor collisions with the satellites. The sites of the 7:6, 14:15 and 10:11 corotation resonance, if composed by particles smaller than $10 \mu m$, have lifetimes of less than 140, 25 and 15 years, respectively. The time to the satellites replenish the site due the interplanetary projectiles collisions process are, at least, an order of magnitude greater than the sites' lifetimes. Thus, the arcs are transient structures. For the G ring arc, we obtain that particles smaller than $10 \mu m$ leave the arc or collide in less than 30 years and those ejected by Aegaeon collide in less than 300 years. So, Aegaeon is not the arc and ring source. We also analyzed the Neptune's ring arcs, assuming that they are azimuthally confined by coorbital moons. We verified that the *Fraternité* and *Egalité* arcs are in 42:43 Lindblad eccentric resonance with Galatea and the *Liberté* and *Courage* arcs do not. Due to this, the particles of the both last ones pass through close encounters with the satellites and leave the arcs. If we include the solar radiation force, all the particles leave the arcs, however the particles initially at *Fraternité* and *Egalité* remain in the close region. So we explain the dispersion of the arcs of Neptune.

KEYWORDS: Planetary arcs. Planetary rings. Orbital resonances. Dissipative forces. Satellites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Movimento de seis partículas em RCE 7:6 (em preto) e do satélite perturbador (em vermelho), no sistema girante com a frequência angular central da ressonância (n_c).	37
Figura 2	Variação do semi-eixo maior (a) e ângulo ressonante (ϕ) do satélite Aegaeon.	38
Figura 3	Movimento de duas partículas (em preto) com excentricidade inicial de 10^{-2} presas em RLE 14:15 com Mimas (em vermelho), no sistema girante com o movimento orbital de Mimas.	41
Figura 4	Sítios formados pela RCE 7:6, 14:15, 10:11 com Mimas, de cima para baixo. Em preto, estão as partículas que se encontram em RCE, enquanto as partículas em cinza estão fora do confinamento. Os pontos em vermelho, azul e verde se referem às partículas da Figura 6.	46
Figura 5	Confinamento azimuthal para as RCE 7:6, 14:15, 10:11 com Mimas, de cima para baixo. Em vermelho é apresentado o movimento de Mimas no sistema girante com a frequência da ressonância e em preto, o das partículas.	47
Figura 6	Variação temporal do semi-eixo maior de 7 partículas presas à RCE 7:6, 14:15, 10:11 com Mimas, de cima para baixo. Em azul e vermelho encontram-se as partículas inicialmente internas e externas, respectivamente, ao centro dos sítios, enquanto as partículas em verde foram iniciadas na posição central destes.	48
Figura 7	Variação temporal do ângulo ressonante de corrotação e de Lindblad, e excentricidade para uma partícula iniciada na RCE 14:15 com Mimas. O semi-eixo maior inicial da partícula é $a = 194226$ km e a defasagem na longitude média em relação ao centro do sítio é $\Delta\lambda = 0^\circ$	49
Figura 8	Variação temporal do ângulo ressonante de corrotação e de Lindblad, e excentricidade para uma partícula iniciada na RCE 14:15 com Mimas. O semi-eixo maior inicial da partícula é $a = 194240$ km e a defasagem na longitude média em relação ao centro do sítio é $\Delta\lambda = 2^\circ$	50
Figura 9	Variação temporal do ângulo ressonante de corrotação e de Lindblad, e excentricidade para uma partícula iniciada na RCE 10:11 com Mimas. O semi-eixo maior inicial da partícula é $a = 197646$ km e a defasagem na longitude média em relação ao centro do sítio é $\Delta\lambda = 0^\circ$	51
Figura 10	Variação temporal do ângulo ressonante de corrotação e de Lindblad, e excentricidade para uma partícula iniciada na RCE 7:6 com Mimas. O semi-eixo maior inicial da partícula é $a = 167477$ km e a defasagem na longitude média em relação ao centro do sítio é $\Delta\lambda = 0^\circ$	52

Figura 11	Trajetoária de uma partícula inicialmente a $\Delta\lambda = 2^\circ$ do centro de um sítio da RCE 7:6, considerando um satélite (ponto em magenta) com razão de massa em relação a Mimas (α) de 10^{-8} , 10^{-5} e 10^{-2} , de cima para baixo. As unidades estão normalizadas pelo semi-eixo maior central da ressonância ($a_c = 167493.5$ km). Em preto e em azul encontram-se as trajetórias da partícula para os casos em que são incluídos apenas Mimas e apenas o satélite, respectivamente. Já as linhas em vermelho representam as trajetórias da partícula para os casos incluindo ambos os corpos.	53
Figura 12	Variação temporal do ângulo azimutal de uma partícula inicialmente a $\Delta\lambda = 2^\circ$ do centro de um sítio da RCE 7:6. A linha tracejada corresponde a posição do ponto de equilíbrio do sítio, enquanto as diferentes cores representam os valores de α assumidos.	54
Figura 13	Tempo de vida dos sítios das RCE 7:6, 14:15 e 10:11, em função do raio do satélite. Na paleta de cores é dada a porcentagem de partículas que permanecem em RCE.	56
Figura 14	Acelerações devido ao achatamento planetário (vermelho), Mimas (roxo), pressão de radiação solar (verde) e arrasto do plasma (azul) para partículas nas RCE 7:6, 14:15 e 10:11.	58
Figura 15	Variação temporal do semi-eixo maior, ângulo da ressonância de corrotação e excentricidade para uma partícula de $1 \mu m$. As cores vermelho e azul correspondem ao efeito gerado pela componente da Poynting-Robertson e da pressão de radiação, respectivamente, enquanto a cor preta corresponde ao caso com a força de radiação solar completa.	60
Figura 16	Variação temporal do a , $\phi^{(c)}$ e e para uma partícula de $10 \mu m$. As cores vermelho e azul correspondem ao efeito gerado pela componente da Poynting-Robertson e da pressão de radiação, respectivamente, enquanto a cor preta corresponde ao caso com a força de radiação solar completa.	61
Figura 17	Variação temporal do semi-eixo maior e ângulo ressonante da corrotação para uma partícula de $1 \mu m$ devido à componente de Poynting-Robertson.	62
Figura 18	Ilustração do movimento de uma partícula em ressonância de corrotação no sistema girante com (linha tracejada) e sem (linha cheia) o efeito do arrasto do plasma. Imagem modificada de Sun et al. (2017)	64
Figura 19	Variação temporal do ϕ , Δa e e de uma partícula de $10 \mu m$ com defasagem inicial de $\Delta a = 10$ km e $\Delta\lambda = -5^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 14:15. A cor preta e vermelha correspondem ao caso sem e com o arrasto do plasma, respectivamente.	65
Figura 20	Variação temporal do ϕ , Δa e e de uma partícula de $10 \mu m$ com defasagem inicial de $\Delta a = -30$ km e $\Delta\lambda = 0^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 14:15.	66

Figura 21	Variação temporal de ϕ , Δa e e de uma partícula de $10 \mu m$ com defasagem inicial de $\Delta a = -10 \text{ km}$ e $\Delta \lambda = 6^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 10:11. As cores vermelho, azul e preta correspondem aos casos com apenas o AP, FRS e com ambas perturbações, respectivamente.	67
Figura 22	Tempo de vida dos sítios ressonantes, quando incluído um satélite no sistema. O primeiro sítio corresponde ao que se encontra imerso o satélite enquanto os demais não possuem corpos maiores. As partículas de $1 \mu m$ estão em azul e as de $10 \mu m$ estão em roxo. Os casos não apresentados na figura correspondem àqueles em que os sítios possuem tempo de vida superior a 1000 anos.	68
Figura 23	Tempo de vida do sítio ressonante para os raios de satélite considerados, com as perturbações não gravitacionais. A coluna da esquerda corresponde às partículas de $1 \mu m$, enquanto a da direita às de $10 \mu m$. Na paleta de cores é dada a porcentagem de partículas que permanecem em RCE.	69
Figura 24	Tempo para produção de material (em preto) e para sua remoção, para os casos sem (em vermelho) e com perturbações. Para os casos perturbados, são consideradas partículas de $1 \mu m$ (em azul) e $10 \mu m$ (em roxo).	74
Figura 25	Semi-eixo maior e longitude média das partículas em RCE 14:15 nos tempos 0, 1, 3, 5, 10, 25, 50 e 75 anos. As partículas possuem raio de $10 \mu m$	76
Figura 26	Taxa de partículas confinadas azimutalmente nos sítios da RCE 7:6, 14:15 e 10:11 para diversos tempos de integração. Todas as partículas foram iniciadas no sítio “3”, estando as de raio de $1 \mu m$ na coluna da esquerda e as de $10 \mu m$ na coluna da direita.	77
Figura 27	Ângulo azimutal θ no sistema girante e ângulo ressonante ϕ de uma partícula iniciada com $\Delta a = -30 \text{ km}$ e $\Delta \lambda = 2^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 10:11. A partícula possui raio de $10 \mu m$	77
Figura 28	Ângulo azimutal θ no sistema girante e ângulo ressonante ϕ de uma partícula de $1 \mu m$ iniciada com $\Delta a = 16 \text{ km}$ e $\Delta \lambda = -2^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 7:6. A linha pontilhada representa a posição angular do satélite com raio de Aegaeon imerso no sítio “4” (caso 3).	78
Figura 29	Ângulo azimutal θ no sistema girante e ângulo ressonante ϕ de uma partícula de $10 \mu m$ iniciada com $\Delta a = -26 \text{ km}$ e $\Delta \lambda = 5^\circ$ em relação ao centro de um sítio da RCE 14:15. A linha pontilhada representa a posição angular do satélite com raio de Methone imerso no sítio “2” (caso 2).	79
Figura 30	Taxa de partículas de $1 \mu m$ em trânsito para os casos 1, 2 e 3. No painel esquerdo são apresentados os resultados com a inclusão do satélite com o raio de Aegaeon, enquanto no direito é incluído um satélite com o raio de Methone. As partículas estão inicialmente no sítio “3” da RCE 14:15.	79

Figura 31	Taxa de partículas de $10 \mu m$ em trânsito para os casos 1, 2 e 3. No painel esquerdo são apresentados os resultados com a inclusão do satélite com o raio de Aegaeon, enquanto no direito é incluído um satélite com o raio de Methone. As partículas estão inicialmente no sítio “3” da RCE 14:15.	80
Figura 32	Variação temporal de $\phi^{(c)}$ e $\phi^{(l)}$ de Aegaeon, para os casos com e sem o satélite Tétis.	82
Figura 33	Variação temporal do ângulo característico ($\phi^{(t)}$) da ressonância Mimas-Tétis, dado por $\phi^{(t)} = 4\lambda_T - 2\lambda_M - \Omega_T - \Omega_M$, no qual T e M se refere a Tétis e Mimas, respectivamente.	83
Figura 34	Variação temporal do semi-eixo maior, excentricidade e inclinação de Aegaeon.	83
Figura 35	Movimento no sistema girante, para 10 anos de simulação, de Aegaeon e uma partícula com defasagem de $\Delta\lambda = -10^\circ$ do centro do arco.	84
Figura 36	Variação temporal da excentricidade devido a FRS para uma partícula iniciada a 10 km do centro da RCE 7:6 com Mimas.	85
Figura 37	Variação temporal do semi-eixo maior em relação ao centro da ressonância e ângulo ressonante para uma partícula de $10 \mu m$, inicialmente a $\Delta a = -5$ km e $\Delta\lambda = 0^\circ$ do centro do arco.	86
Figura 38	Variação temporal de Δa e ϕ para uma partícula de $10 \mu m$, inicialmente defasada de 25 km do centro do arco.	86
Figura 39	Movimento dos coorbitais e das partículas em torno dos pontos de equilíbrio do sistema. Os pontos vermelhos e pretos correspondem aos satélites e às partículas, respectivamente, enquanto os pontos de equilíbrios são as cruzes.	91
Figura 40	Variação azimutal no sistema girante dos satélites coorbitais e de um conjunto de partículas representativas.	92
Figura 41	Variação temporal de ϕ_{RLE} para os coorbitais.	93
Figura 42	Variação temporal de ϕ_{RCI} para os coorbitais.	94
Figura 43	Variação da excentricidade para o coorbital S_1	95
Figura 44	Variação temporal de ϕ_{RLE} para uma partícula de cada arco: Fraternidade, Igualdade, Liberdade e Coragem, a partir do topo.	96
Figura 45	Variação do ângulo ressonante, excentricidade e ângulo azimutal no sistema girante de uma partícula iniciada no arco Liberdade.	97
Figura 46	Evolução temporal de ϕ , e e θ de uma partícula iniciada no arco Liberdade, a qual colide com o satélite S_3 após 550 anos de simulação.	98
Figura 47	Evolução temporal do ângulo azimutal de uma partícula iniciada no arco Liberdade e no arco Igualdade. O movimento das partículas se encontra em preto, enquanto dos coorbitais são dados pelas linhas em vermelho.	98
Figura 48	Evolução temporal de ϕ e θ para uma partícula no caso nominal (em preto) e para o caso com ϖ dado aleatoriamente (em vermelho). As variações azimutais dos satélites coorbitais são dadas pelas linhas em azul.	99

Figura 49 Evolução temporal do ângulo azimutal de três partículas: uma classificada como “arco”, como “trânsito” e como “anel”. 100

Figura 50 Taxa de partículas confinadas no arcos (em preto), em trânsito (em verde) e que migram para o anel Adams (em azul). Cada coluna representa um arco (Fraternidade, Igualdade, Liberdade e Coragem), enquanto cada tamanho está representado por uma linha (1 μm , 5 μm , 10 μm , 50 μm e 100 μm). 101

Figura 51 Taxa total de partículas confinadas no arcos (em preto), em trânsito (em verde) e que migram para o anel Adams (em azul) para os arcos Fraternidade, Igualdade, Liberdade e Coragem. 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Ângulos das RCE ($\phi^{(c)}$) e RLE ($\phi^{(l)}$).	44
Tabela 2	– Dados calculados para as ressonâncias 7:6, 14:15 e 10:11 e semi-eixo maior geométrico (a_s) de Aegaeon (7:6), Anthe (10:11) e Methone (14:15).	44
Tabela 3	– Raios considerados para os satélites no centro dos sítios. A tabela também apresenta o rótulo com que cada tamanho de satélite será mencionado no texto.	55
Tabela 4	– Tempo em anos para a saída de 90% das partículas da ressonância devido a PRob, PRad e a FRS.	60
Tabela 5	– Tempo em anos para a saída de 90% das partículas da ressonância para os casos com a FRS e com a FRS+AP.	64
Tabela 6	– Taxa de produção de massa (kg/s) devido a colisões com grãos de poeira interplanetária.	72
Tabela 7	– Massa, densidade e elementos osculadores dos satélites Aegaeon, Mimas e Tétis, no tempo 2454700.5 JD.	81
Tabela 8	– Porcentagem de partículas que saem da ressonância e tempo para 90% das partículas do arco saírem da RCE 7:6 com Mimas ou colidirem com Aegaeon.	85
Tabela 9	– Sumário dos resultados obtidos para diferentes tamanhos de partículas e velocidades de ejeção. A tabela apresenta a porcentagem de partículas que permanecem em ressonância (arco) e as que saem desta (anel), assim o tempo de vida (t_{90}) em anos de cada sistema.	87
Tabela 10	– Semi-eixo maior central e largura das ressonâncias propostas em Porco (1991).	89
Tabela 11	– Massa e separação angular dos satélites coorbitais.	90
Tabela 12	– Porcentagem de partículas confinadas em cada arco e em ressonância de Lindblad.	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	PERTURBAÇÕES EM ANÉIS E ARCOS PLANETÁRIOS	19
2.1	NÃO-ESFERICIDADE E DISTRIBUIÇÃO NÃO-HOMOGENEA DE MASSA DO CORPO CENTRAL	19
2.1.1	De vetor posição para elementos geométricos	21
2.1.2	De elementos geométricos para vetor posição	23
2.2	FORÇA DE RADIAÇÃO SOLAR	24
2.2.1	Efeito das componentes no semi-eixo maior e excentricidade	25
2.3	ARRASTO DO PLASMA	27
2.3.1	Efeito no semi-eixo maior e excentricidade	28
3	RESSONÂNCIAS DE CORROTAÇÃO E LINDBLAD	30
3.1	RESSONÂNCIAS EM ANÉIS E ARCOS PLANETÁRIOS	31
3.1.1	Localização das ressonâncias	32
3.2	RESSONÂNCIA DE CORROTAÇÃO EXCÊNTRICA	33
3.2.1	Modelo do pêndulo	34
3.2.2	Aproximação de Huygens	36
3.3	RESSONÂNCIA DE LINDBLAD EXCÊNTRICA	38
3.4	EFEITO ACOPLADO DAS RESSONÂNCIAS DE CORROTAÇÃO E LINDBLAD	42
4	EFEITO DE PERTURBAÇÕES NAS PARTÍCULAS EM RESSONÂNCIA	44
4.1	EFEITO DE PEQUENOS SATÉLITES IMERSOS NOS SÍTIOS	49
4.1.1	Efeito de um satélite imerso no sítio	49
4.1.2	Sítio com pequenas luas imersas	55
4.2	EFEITO DAS PERTURBAÇÕES NAS PARTÍCULAS EM RESSONÂNCIA	57
4.2.1	Força de radiação solar	59
4.2.2	Arrasto do plasma	61
4.2.3	Sistema de sítios com um satélite	66
4.2.4	Sítio com pequenas luas imersas	68
4.3	PRODUÇÃO DE POEIRA DEVIDO AOS PEQUENOS SATÉLITES	70
4.4	TRÂNSITO DE PARTÍCULAS ENTRE OS SÍTIOS RESSONANTES	73
5	DESTINO DAS PARTÍCULAS DO ARCO DO ANEL G	81
5.1	EVOLUÇÃO ORBITAL DAS PARTÍCULAS DO ARCO	82
5.2	EVOLUÇÃO ORBITAL DAS PARTÍCULAS EJETADAS DA SUPERFÍCIE DE AEGAEON	85

6	ARCOS DOS ANEL ADAMS DE NETUNO	89
6.1	DINÂMICA DOS SATÉLITES COORBITAIS	90
6.2	RESSONÂNCIA DE LINDBLAD EXCÊNTRICA COM GALATEA	92
6.3	FORÇA DE RADIAÇÃO SOLAR	100
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

Apesar de observados pela primeira vez em 1984 por meio de uma ocultação estelar, a existência dos arcos planetários só foi confirmada em 1989, quando a sonda espacial Voyager 2 detectou quatro dessas estruturas no anel Adams de Netuno, as quais receberam o nome de Fraternidade, Igualdade, Liberdade e Coragem. Tais estruturas, correspondentes a segmentos de anéis com maior brilho e densidade de partículas, deveriam ser desfeitas em poucos meses quando só considerado o movimento kepleriano das partículas que as constituem, de modo que se faz necessária a presença de mecanismos de confinamento para explicar a estabilidade desses sistemas (RENNER et al., 2014).

Em Porco (1991) é apresentada a hipótese de que os arcos de Netuno seriam confinados pelo satélite Galatea por meio de ressonâncias de corrotação e de Lindblad, dos tipos 84:86 e 42:43, respectivamente. A ressonância de corrotação ocorre quando a órbita da partícula no sistema girante com a frequência ressonante é fechada, de modo que o corpo é confinado azimutalmente, enquanto a ressonância de Lindblad ocorre quando sua órbita é fechada no sistema girante com o satélite perturbador, confinando-a radialmente (SICARDY, 1991). O modelo apresentado em Porco (1991) foi tomado por uma década como o que melhor reproduzia a dinâmica observada nos arcos, até que observações recentes mostraram que estes não estão na ressonância de corrotação proposta. Deste então, novos modelos vêm sendo sugeridos como, por exemplo, o modelo de satélites coorbitais apresentado em Renner et al. (2014).

No início do século XXI, a sonda espacial Cassini observou a existência de arcos planetários também em Saturno, estando um destes localizado no anel G, levando o nome de arco do anel G (HEDMAN et al., 2007). Outros dois se localizam no anel E, chamados de arco de Methone e de Anthe (HEDMAN et al., 2009). Conforme proposto na literatura, o arco de Methone se encontra confinado por uma ressonância de corrotação excêntrica e por uma ressonância de Lindblad excêntrica, ambas do tipo 14:15 com o satélite Mimas, enquanto os arcos do anel G e de Anthe estão confinados, devido a Mimas, pela ressonância de corrotação excêntrica 7:6 e 10:11, respectivamente, estando também próximos à ressonâncias de Lindblad. Observa-se, ademais, a existência de pequenos satélites confinados nessas estruturas, de modo que as luas Anthe ($r = 0.5$ km), Methone ($r = 1.45$ km) e Aegaeon ($r = 0.25$ km) se encontram imersas nos arcos de Anthe, de Methone e do anel G, respectivamente.

Uma vez que os arcos saturnianos são formados principalmente por partículas micrométricas, propõe-se em Hedman et al. (2010) que as luas imersas nos arcos agiriam como fontes desse material, o qual permaneceria confinado devido às ressonâncias citadas. Entretanto, trabalhos recentes como Sun et al. (2017) e Madeira et al. (2018) mostram que os arcos não permanecem estáveis quando considerados os efeitos das forças perturbadoras.

Em Madeira et al. (2018) é encontrado que o arco do anel G tem seu tempo de vida reduzido para menos de 40 anos quando considerados os efeitos da força de radiação solar, de modo que o satélite Aegaeon não possui o papel de fonte de partículas, mas de sumidouro destas. Visto isto, nesse trabalho será investigada a dinâmica das partículas confinadas pela ressonância de corrotação excêntrica e sob efeito da ressonância de Lindblad excêntrica, nas regiões em que se encontram os arcos saturnianos,

considerando a força de radiação solar, arrasto do plasma e a presença de pequenos satélites confinados nos sítios das ressonâncias de corrotação. Também é analisada a dinâmica do arco do anel G e dinâmica dos arcos de Netuno, seguindo o modelo de coorbitais proposto em Renner et al. (2014).

No capítulo 2, os efeitos gerados pela não-esfericidade do corpo central, força de radiação solar e arrasto do plasma são apresentados teoricamente.

No capítulo 3, as ressonâncias de corrotação e Lindblad são estudadas analiticamente, desenvolvendo-se a teoria necessária para seu tratamento.

No capítulo 4, a dinâmica das partículas confinadas por ressonâncias de corrotação em Saturno é estudada, verificando como esta é afetada pela presença de satélites imersos nos sítios, força de radiação solar e arrasto do plasma.

No capítulo 5, é estudada a dinâmica do arco do anel G de Saturno e os efeitos que Aegaeon exerce nas partículas confinadas pela ressonância 7:6 com Mimas.

No capítulo 6, o modelo de satélite coorbitais apresentado em Renner et al. (2014) para o caso dos arcos de Netuno é estudado, sendo analisado como o sistema é alterado com a inclusão da força de radiação solar.

No capítulo 7, são apresentadas as considerações finais do trabalho.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Arcos planetários são estruturas cuja existência depende de mecanismos que confinem os corpos nestas regiões. Para os arcos localizados em Saturno (arco do anel G, de Anthe e de Methone), verifica-se que estes estão localizados em regiões de ressonâncias de corrotação excêntrica com o satélite Mimas, sendo comum a estes o fato de possuírem uma população de partículas micrométricas e abrigarem uma pequena lua. O intuito deste trabalho foi analisar a dinâmica de partículas micrométricas confinadas por ressonâncias de corrotação excêntrica, verificando como esta é alterada devido a ação de forças perturbadoras e ao efeito gravitacional de pequenos satélites. Tal estudo visou melhor entender a evolução dos arcos planetários e determinar possíveis razões para a existência de apenas um arco em cada região de ressonância, enquanto a teoria permite um número maior destes.

No capítulo 2 os efeitos da não-esfericidade do corpo central foram abordados, sendo definidos os elementos orbitais geométricos, necessários para o entendimento das ressonâncias de corrotação e Lindblad. Também foram abordados teoricamente os efeitos no semi-eixo maior e excentricidade da força de radiação solar e arrasto do plasma, sendo estas perturbações relevantes para a dinâmica de corpos com raio da ordem de micrometros.

A teoria relacionada a ressonância de corrotação foi desenvolvida no capítulo 3, verificando que esta confina as partículas azimuthalmente. Estudo análogo foi realizado, também, para a ressonância de Lindblad, que devido a proximidade com a corrotação afeta a dinâmica dos arcos.

No capítulo 4 foi estudada a dinâmica das partículas localizadas nos sítios das ressonâncias de corrotação excêntrica 7:6 (arco do anel G), 14:15 (arco de Methone) e 10:11 (arco de Anthe) com o satélite Mimas. Foi analisada como a proximidade com ressonâncias de Lindblad afeta o movimento das partículas, encontrando-se que apesar desta excitar as órbitas dos corpos, as partículas permanecem confinadas por mais de 100 mil anos. Na seção 4.1, a influência de satélites localizados no centro dos sítios foi verificada, encontrando-se que as partículas apresentam três regimes distintos de movimento, dependendo do raio do satélite considerado.

Devido à trocas de momento angular com satélites com raios da ordem de metros, as partículas apresentam aumento na amplitude de movimento em torno do ponto de equilíbrio do sistema (primeiro regime), enquanto que para satélites quilométricos, o momento angular trocado é suficiente para que a partícula troque o sentido de movimento no sistema girante ao se aproximar do satélite. Na presença de satélites com raio da ordem de poucos quilômetros, as partículas permanecem se movimentando entre este e a borda do sítio, estando em ressonância de corrotação excêntrica com Mimas e em ressonância de corrotação 1:1 com o satélite (segundo regime). Para satélites com raio da ordem de dezenas de quilômetros, a aceleração gerada por este supera a gerada por Mimas e a partícula passa a ser confinada em uma órbita do tipo ferradura (terceiro regime).

Como consequência dos diferentes regimes de movimento, tem-se que o tempo de vida dos sítios aumenta com o raio do satélite para o primeiro regime, enquanto decresce com o aumento do corpo para o segundo. Com isto, encontra-se que os sítios das RCE 7:6, 14:15 e 10:11 possuem tempos de vida máximo de, aproximadamente, 300, 140 e 250 anos, devido a presença dos satélites imersos.

Na seção 4.2, os efeitos da força de radiação solar foram analisados, encontrando que as alterações no semi-eixo maior geradas por esta perturbação retiram as partículas da ressonância. Ao adicionar os efeitos do arrasto do plasma, o que foi feito apenas para as RCE 14:15 e 10:11, viu-se que as partículas saem ainda mais rapidamente do confinamento. Incluindo satélites imersos nos sítios, encontrou-se o mesmo padrão de aumento e depois queda do tempo de vida dos sítios, entretanto os tempos de vida para estes casos são menores, uma vez que o efeito das perturbações na excentricidade propicia colisões com os satélites.

Na seção 4.3, foram calculadas as taxas de produção de material pelos satélites imersos devido a colisões com projéteis interplanetários, sendo computado o tempo necessário para preencher os sítios de partículas. Como resultado, encontrou-se que estes são, ao menos, uma ordem de grandeza maiores que os tempos de vida obtidos. Foi verificada, na seção 4.4, a possibilidade de um sítio agir como fonte de material para outro. Obteve-se que as partículas, ao saírem de seus sítios de origem, tendem a serem capturadas pela ressonância de corrotação em sítios adjacentes no sentido anti-horário. Apesar disto, em poucas décadas, os grãos se distribuem uniformemente entre todos os sítios do sistema.

Deste modo, concluiu-se que os arcos são estruturas transientes. Concluiu-se também que, se cada um dos sítios coorbitais aos arcos planetários possuir um ou mais satélites menores que as luas observadas nos arcos, estes seriam limpos mais rapidamente, supondo um cenário em que todos estivessem preenchidos. Isto poderia explicar a existência de apenas um arco em cada região, apesar desta ser uma hipótese pouco provável, uma vez que seria necessário um mecanismo que explicasse a existência destes satélites.

No capítulo 5 foi estudado o caso específico do arco do anel G, encontrando-se que devido ao efeito da força de radiação solar e do satélite imerso no arco, Aegaeon, as partículas menores que $10 \mu m$ são removidas do sistema em menos de 30 anos. Analisando a dinâmica das partículas ejetadas da superfície do satélite, tem-se que estas permanecem menos de 300 anos na região do arco, de modo que Aegaeon não corresponde a fonte de material para o arco e para o anel.

Já no capítulo 6 foi analisada a dinâmica dos arcos do anel Adams de Netuno, os quais se encontram na região delimitada pela ressonância de Lindblad excêntrica 42:43 com Galatea. Assumindo o modelo de satélites coorbitais apresentado em Renner et al. (2014), obteve-se que os arcos se encontram nos pontos de equilíbrio do sistema de coorbitais, de modo que podem ser confinados azimutalmente por estes.

Ao adicionar os efeitos gerados pela ressonância de Lindblad, obteve-se que os arcos Fraternidade e Igualdade se mantêm em ressonância, enquanto os demais não. Como consequência, as partículas dos arcos Liberdade e Coragem sofrem encontros próximos com os coorbitais, saindo destes. Incluindo a força de radiação solar, verifica-se a saída de partículas de todos os arcos, entretanto àquelas provenientes dos dois primeiros permanecem na região próxima a estes, enquanto as iniciadas nos dois últimos arcos vão para outras regiões. Deste modo, por este modelo, a dispersão observada nos arcos de Netuno pode ser explicada.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, N.; NETO, E. V.; FORYTA, D. Formation of the g-ring arc. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 461, n. 2, p. 1868–1874, 2016.
- ARAUJO, N. C. S. **Um estudo da dinâmica de captura em ressonância de corrotação**. Dissertação (Mestrado em Física) — Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 66p, 2013.
- ARAUJO, N. C. S. **Um estudo de objetos perturbados e capturados pela ressonância de corrotação e Lindblad**. Tese (Doutorado em Física) — Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 127f, 2017.
- BANASZKIEWICZ, M.; FAHR, H. J.; SCHERER, K. Evolution of dust particle orbits under the influence of solar wind outflow asymmetries and the formation of the zodiacal dust cloud. **Icarus**, Elsevier, v. 107, n. 2, p. 358–374, 1994.
- BORDERIES, N.; LONGARETTI, P. Description and behavior of streamlines in planetary rings. **Icarus**, Elsevier, v. 72, n. 3, p. 593–603, 1987.
- BROUWER, D.; CLEMENCE, G. M. **Methods of celestial mechanics**. [S.l.]: Elsevier, 1967.
- CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 304, n. 4, p. 793–799, 1999.
- CLAUDIO, G.; SUPPES, P. et al. The high-precision computation of the period of the simple pendulum. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 31, n. 2, p. 2701–1, 2009.
- COLWELL, J. E.; ESPOSITO, L. W. Origins of the rings of uranus and neptune: 2. initial conditions and ring moon populations. **Journal of Geophysical Research: Planets**, Wiley Online Library, v. 98, n. E4, p. 7387–7401, 1993.
- COOPER, N. et al. Astrometry and dynamics of anthe (s/2007 s 4), a new satellite of saturn. **Icarus**, Elsevier, v. 195, n. 2, p. 765–777, 2008.
- ELLIS, K. M.; MURRAY, C. D. The disturbing function in solar system dynamics. **Icarus**, Elsevier, v. 147, n. 1, p. 129–144, 2000.
- FRANCO, N. B. **Cálculo numérico**. [S.l.]: Pearson, 2006.
- HAMILTON, D. P. Motion of dust in a planetary magnetosphere: Orbit-averaged equations for oblateness, electromagnetic, and radiation forces with application to saturn's e ring. **Icarus**, Elsevier, v. 101, n. 2, p. 244–264, 1993.
- HEDMAN, M. et al. Aegaeon (saturn liii), a g-ring object. **Icarus**, Elsevier, v. 207, n. 1, p. 433–447, 2010.
- HEDMAN, M. et al. Three tenuous rings/arcs for three tiny moons. **Icarus**, Elsevier, v. 199, n. 2, p. 378–386, 2009.
- HEDMAN, M. M. et al. The source of saturn's g ring. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 317, n. 5838, p. 653–656, 2007.

- KOSCHNY, D.; GRÜN, E. Impacts into ice–silicate mixtures: Crater morphologies, volumes, depth-to-diameter ratios, and yield. **Icarus**, Elsevier, v. 154, n. 2, p. 391–401, 2001.
- KRIVOV, A. V. et al. Impact-generated dust clouds around planetary satellites: spherically symmetric case. **Planetary and Space Science**, Elsevier, v. 51, n. 3, p. 251–269, 2003.
- MADEIRA, G. et al. Production and fate of the g ring arc particles due to aegaeon (saturn liii). **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press on behalf of the Royal Astronomical Society, v. 475, n. 4, p. 5474, 2018.
- MAUK, B. et al. Fundamental plasma processes in saturn’s magnetosphere. In: **Saturn from Cassini-Huygens**. [S.l.]: Springer, 2009. p. 281–331.
- 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.
- MOUTAMID, M. E.; SICARDY, B.; RENNER, S. Coupling between corotation and lindblad resonances in the elliptic planar three-body problem. **arXiv preprint arXiv:1312.5961**, 2013.
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar system dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 1999.
- NAMOUNI, F.; PORCO, C. The confinement of neptune’s ring arcs by the moon galatea. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 417, n. 6884, p. 45–47, 2002.
- OWEN, W.; VAUGHAN, R.; SYNNOTT, S. Orbits of the six new satellites of neptune. **The Astronomical Journal**, v. 101, p. 1511–1515, 1991.
- PATER, I. D.; LISSAUER, J. J. **Planetary sciences**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.
- PATER, I. de et al. The dynamic neptunian ring arcs: evidence for a gradual disappearance of libéré and resonant jump of courage. **Icarus**, Elsevier, v. 174, n. 1, p. 263–272, 2005.
- POPPE, A. R. An improved model for interplanetary dust fluxes in the outer solar system. **Icarus**, Elsevier, v. 264, p. 369–386, 2016.
- PORCO, C. C. An explanation for neptune’s ring arcs. **Science**, The American Association for the Advancement of Science, v. 253, n. 5023, p. 995, 1991.
- PORCO, C. C.; NICHOLSON, P. D. Eccentric features in saturn’s outer c ring. **Icarus**, Elsevier, v. 72, n. 2, p. 437–467, 1987.
- RENNER, S.; SICARDY, B. Stationary configurations for co-orbital satellites with small arbitrary masses. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 88, n. 4, p. 397–414, 2004.
- 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.
- SFAIR, R.; GIULIATTI-WINTER, S. Orbital evolution of the μ and ν dust ring particles of uranus. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 505, n. 2, p. 845–852, 2009.
- SFAIR, R.; GIULIATTI-WINTER, S. The role of mab as a source for the μ ring of uranus. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 543, p. A17, 2012.

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.

SICARDY, B. Numerical exploration of planetary arc dynamics. **Icarus**, Elsevier, v. 89, n. 2, p. 197–219, 1991.

SILVA, P. A. d. **Dinâmica de uma partícula coorbital a um sistema de satélites**. Dissertação (Mestrado em Física) — Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 167f, 2003.

SPAHN, F. et al. E ring dust sources: Implications from cassini's dust measurements. **Planetary and Space Science**, Elsevier, v. 54, n. 9-10, p. 1024–1032, 2006.

SUN, K.-L.; SCHMIDT, J.; SPAHN, F. Particle dynamics in the central ringlet of saturn's encke gap. **arXiv preprint arXiv:1510.07730**, 2015.

SUN, K.-L. et al. Dust in the arcs of methone and anthe. **Icarus**, Elsevier, v. 284, p. 206–215, 2017.

THOMAS, P. et al. The inner small satellites of saturn: A variety of worlds. **Icarus**, Elsevier, v. 226, n. 1, p. 999–1019, 2013.