

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

VANESSA MARIA FRANCISCO DE MOURA

Análise da região do anel ν de Urano

Guaratinguetá

2018

Vanessa Maria Francisco de Moura

Análise da região do anel ν de Urano

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

Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá
2018

M929a	Moura, Vanessa Maria Francisco de Análise da região do anel v de Urano / Vanessa Maria Francisco de Moura – Guaratinguetá, 2018. 29 f.: il. Bibliografia: f. 28-29 Trabalho de Graduação - Bacharelado em Física – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair 1. Planetas. 2. Satélites. 3. Projeteis. I. Título. CDU 523.4
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

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

VANESSA MARIA FRANCISCO DE MOURA

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

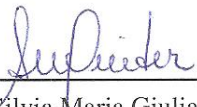
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
FÍSICA

Prof. Dr. Marco Aurélio Alvarenga Monteiro
Coordenador

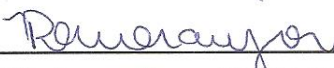
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Rafael Sfair
Orientador/UNESP-FEG



Profª. Drª. Silvia Maria Giuliatti Winter
UNESP-FEG



Profª. Drª. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo
UNESP-FEG

Novembro , 2018

Dedico este trabalho aos meus avós, Nico e Agnes, aos meus pais, Jefferson e Lidia e aos meus irmãos, Lucas e Bruno.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a algumas pessoas que auxiliaram de forma direta e indiretamente neste trabalho:

Primeiramente aos meus pais, Lidia e Jefferson, por toda a educação que me proporcionaram, todo o carinho, compreensão e apoio, desde o momento em que eu escolhi cursar Física. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

À minha família, por me incentivar e por acreditarem na minha capacidade. Tenho muito orgulho de ter vocês como minha família.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Sfair, que me acompanha a 1 ano e meio neste projeto e também pelas aulas de Astronomia e Mecânica Celeste, que me direcionaram à Dinâmica Orbital. Seus ensinamentos foram cruciais para a realização deste trabalho.

Ao meu professor do Ensino Médio, Marcelo Prado, com quem tive meu primeiro contato com a Astronomia. Você foi um dos responsáveis por eu escolher o curso de Física.

Ao meu namorado, Renan, por sempre me apoiar em todas as decisões e estar ao meu lado nos momentos que eu mais precisei. Obrigado por seu meu porto seguro.

À minha melhor amiga, Ana Luiza, pelo companheirismo dentro e fora da faculdade, por todas os trabalhos em grupo e parcerias de estudo. Vou levar nossa amizade pra vida inteira.

À minha amiga Gabriela, pela amizade, por todas as conversas e discussões motivadoras e pelos grupos de estudo. Sua amizade vai ficar pra sempre.

A todos os amigos da faculdade, que me ajudaram nesses 5 anos de curso. Em especial às minhas amigas, Milena e Nilce. Ainda brilharemos muito na Dinâmica Orbital.

Aos professores da graduação, por todo o conhecimento transmitido durante a minha formação. Em especial aos professores Elias, Silvia e Júlio, pelas melhores aulas que eu tive durante todo o curso.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

*“A jornada de mil quilômetros começa com o primeiro passo.”
(O Rei Leão)*

RESUMO

Desde 2012 é conhecido o mecanismo responsável pela existência do anel μ de Urano (Sfair & Giuliatti Winter, 2012). A manutenção desse anel é realizada por meio da ejeção de partículas de poeira do satélite Mab, devido a colisões deste satélite com projéteis interplanetários, com tamanhos da ordem de micrometros. Devido aos efeitos de radiação solar e do achatamento do planeta Urano, essas partículas evoluem ao longo do tempo populando o anel μ .

O intuito deste trabalho foi o de estudar o anel ν de Urano, já que o mecanismo responsável por manter este anel em torno de Urano ainda é desconhecido. Portanto, nosso propósito é investigar um possível mecanismo de manutenção da população do anel utilizando satélites hipotéticos imersos no anel. Além disso, iremos estimar a geração e remoção de partículas de poeira a partir de possíveis colisões entre os satélites hipotéticos e os satélites envolvidos (Portia e Rosalinda), ou entre projéteis interplanetários.

PALAVRAS-CHAVE: anel ν . Urano.

ABSTRACT

Since 2012, it's known the mechanism responsible for the existence of the Uranian ring (Sfair Giuliani Winter, 2012). The maintenance of this ring is accomplished through the ejection of dust particles from the Mab satellite, due to collisions of this satellite with interplanetary projectiles, with sizes of the order of micrometres. Due to the effects of solar radiation and flattening of the planet Uranus, these particles evolve over time populating the μ ring.

The purpose of this work was to study the naked ring of Uranus, since the mechanism responsible to maintain this ring around Uranus is still unknown. Therefore, our purpose is to investigate a possible mechanism of maintenance of the ring population using hypothetical satellites immersed in the ring. In addition, we will estimate the generation and removal of dust particles from possible collisions between hypothetical satellites and satellites (Portia and Rosalinda), or between interplanetary projectiles.

KEYWORDS: ring ν . Uranus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Sistema de Anéis de Urano.	14
Figura 2	Perfis radiais dos anéis ν (esquerda) e μ (direira).	15
Figura 3	Esquema do sistema de anéis planetários externos de Saturno (acima) e Urano (abaixo).	16
Figura 4	Gráficos das distribuições iniciais dos (a) e (b): 50 satélites hipotéticos, (c) e (d): 1000 satélites hipotéticos aleatoriamente na região estudada.	23
Figura 5	Gráfico da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano e os dois satélites separadamente, integrados em um tempo de 100 anos.	24
Figura 6	Gráfico da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano e os dois satélites juntos, integrados em um tempo de 100 anos.	25
Figura 7	Gráficos da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano, os dois satélites, 20 satélites hipotéticos (raios entre 0.5 e 5 km) e suas possíveis colisões, integrados em um tempo de 100 anos.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos anéis de Urano.	15
Tabela 2 – Elementos orbitais dos satélites internos de Urano, ordenados pela distância ao planeta.	17
Tabela 3 – Elementos orbitais dos satélites externos de Urano, ordenados pela distância ao planeta.	18
Tabela 4 – Elementos orbitais dos satélites grandes de Urano, ordenados pela distância ao planeta.	18
Tabela 5 – Intervalos dos elementos físicos e orbitais dos satélites hipotéticos.	22
Tabela 6 – Características físicas e elementos orbitais dos satélites utilizados nas simulações numéricas. Dentre eles temos massa (m), raio (R), semi-eixo maior (a), excentricidade (e), inclinação (I), longitude do nodo ascendente (Ω), argumento do pericentro (ω), longitude média (f).	22
Tabela 7 – Números de colisões entre as satelites hipotéticos e os satélites naturais (Portia e Rosalinda) para cada grupo de simulações numéricas.	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	URANO	13
2.1	INTRODUÇÃO	13
2.2	ANÉIS	14
2.2.1	Anel ν	14
2.3	SATÉLITES	16
2.3.1	Portia	18
2.3.2	Rosalinda	18
3	OBJETIVO	19
4	METODOLOGIA	20
5	RESULTADOS	22
5.1	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	22
5.1.1	Colisões	23
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Por três anos (de 2003 a 2005), Showalter & Lissauer (2006) observaram Urano e suas redondezas (anéis e satélites) a partir das imagens do Telescópio Espacial Hubble, e encontraram evidências da existência de dois novos anéis μ e ν . Os mesmos não foram visualizados na passagem da Voyager II pelo planeta em 1986, já que ninguém esperava que existissem anéis mais externos ao sistema principal limitado pelo anel ϵ . A confirmação da existência desse anel ocorreu a partir da reanálise das imagens obtidas pela sonda Voyager II.

A Voyager II foi a única missão que conseguiu aproximar-se de Urano e estudar seus parâmetros físicos e orbitais, por esse fato, há uma restrição de dados disponíveis sobre o planeta.

Os capítulos aqui apresentados foram separados de acordo com as etapas do trabalho. No capítulo 2 fizemos o levantamento bibliográfico do tema (Urano, Satélites e Anéis), no capítulo 3 há o desenvolvimento dos objetivos a serem alcançados, no capítulo 4 uma familiarização das ferramentas analíticas e computacionais utilizadas (método de Monte Carlo, REBOUND), no capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos no projeto e por fim, no capítulo 6 encontram-se as considerações finais.

2 URANO

2.1 INTRODUÇÃO

Alguns cientista já haviam analisado o astro no céu, mas sua caracterização foi feita erroneamente. Em 1690, John Flamsteed catalogou o astro como uma estrela chamada 34 Tauri. Perre Lemonnier realizou observações entre os anos 1750 e 1769, mas também cometeu o erro de classificá-lo como uma estrela. Analisando o céu por um intervalo de tempo, Herschel verificou que não se tratava de uma estrela, já que o corpo se movia no fundo de estrelas fixas, mas o classificou como um cometa. Mais tarde, a ideia de que Urano poderia ser um planeta foi ganhando força na comunidade científica, até que o astrônomo russo Anders Johan Lexell calculou sua órbita e concluiu que o astro era um planeta. Por fim, Herschel admitiu que a sua descoberta se tratava de um novo planeta do Sistema Solar.

Urano é o sétimo planeta do Sistema Solar, possui semi-eixo maior igual a 2.87×10^9 km (19.21 UA), excentricidade de 0.0457 e período orbital de 84 anos. É o quarto planeta mais massivo do nosso Sistema Solar com uma massa de 8.68×10^{25} kg, o terceiro maior planeta com um raio equatorial de 25559 km e com uma temperatura mínima de -220°C , é o mais frio dos planetas do Sistema Solar (Williams, 2005).

O seu eixo de rotação é inclinado em relação a sua órbita em 97.86° . Uma das hipóteses para explicar esse fato é que ele tenha colidido com algum corpo muito grande, e por conta disso seu eixo de rotação passou a coincidir com o plano médio do Sistema Solar. A iluminação do Urano é influenciada pela inclinação, fazendo com que metade do planeta seja iluminado pelo Sol por 42 anos, enquanto a outra metade permaneça na escuridão total.

Com uma densidade de $1,271 \text{ kg/m}^3$, seu interior é composto basicamente de água, amônia e metano, enquanto que em sua atmosfera estão presentes hidrogênio, hélio e metano. Sua coloração azul-esverdeada é originada da absorção de luz vermelha pelo metano na atmosfera superior (Munsell, 2007).

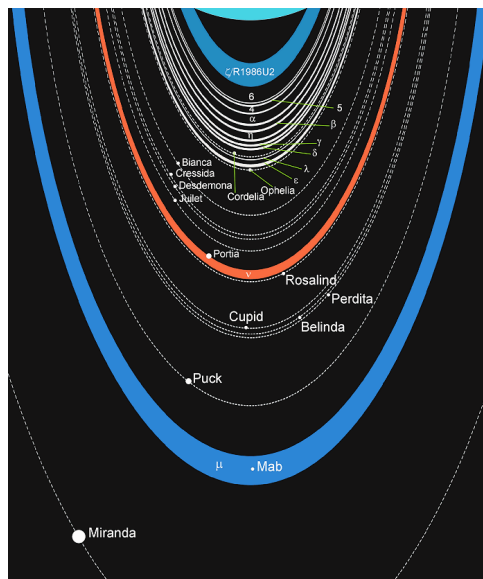
Os dados conhecidos de Urano são um tanto restritos, já que devido a distância com a Terra somente uma missão foi programada ao planeta. A sonda Voyager II foi lançada em Agosto de 1977, com o intuito de estudar os planetas gigantes do Sistema Solar (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Ao aproximar-se de Urano em 1986, a sonda revelou novos satélites e anéis, além de descobrir que o polo Sul do planeta está apontado para o Sol (Showalter & Lissauer, 2006).

Nas próximas seções, apresentaremos brevemente o sistema de anéis e os satélites naturais do planeta, destacando alguns satélites presentes na família de Portia e os anéis interno e externo a Portia e Rosalinda.

2.2 ANÉIS

Similarmente a Júpiter, Saturno e Netuno, o planeta Urano também possui um sistema de anéis. Foi o segundo planeta a ser descoberto contendo anéis e essa evidência auxiliou na conclusão de que a formação dos anéis não é uma particularidade de Saturno, mas pode ser encontrada em outros planetas. Ao todo, Urano compreende 13 anéis, sendo eles (em ordem do mais próximo ao mais afastado do planeta): 1986U2R, 6, 5, 4, α , β , η , γ , δ , λ , ϵ , μ e ν (Munsell, 2007), como mostra a Figura 1. Seu sistema de anéis possui uma complexidade menor do que o sistema de anéis de Saturno e maior do que o sistema de Júpiter e Netuno.

Figura 1 – Sistema de Anéis de Urano.



Fonte: Anéis de Urano (2018).

A descoberta dos 9 primeiros anéis foi realizada em 1977 pelos cientistas James L. Elliot, Edward W. Dunham e Douglas J. Minkc, a partir da ocultação de uma estrela por Urano. Outros dois anéis, foram detectados em 1986 pela Sonda Voyager. Os mais atuais até então descobertos foram encontrados quando Showalter & Lissauer (2006) analisavam o planeta Urano utilizando o HST (Hubble Space Telescope) por 3 anos (2003 – 2005).

Na tabela 1, estão representadas algumas propriedades físicas e orbitais do sistema de anéis de Urano.

Neste trabalho estudamos exclusivamente o anel ν de Urano, portanto a seguir faremos uma abordagem mais aprofundada sobre este anel, além de uma comparação com o anel μ .

2.2.1 Anel ν

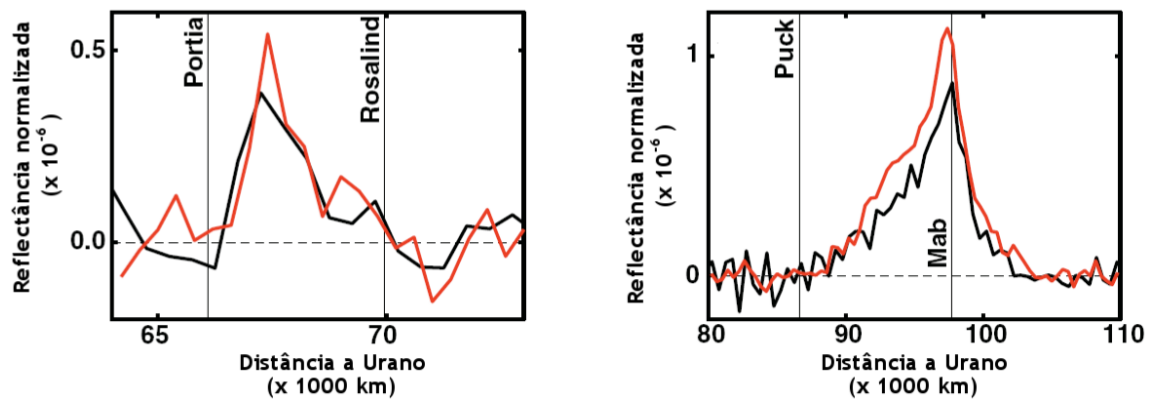
Em 2005, Showalter & Lissauer descobriram dois novos anéis, que se encontravam fora do sistema de anéis principais de Urano. Eles se estendem por uma distância de aproximadamente 66100 km a 103000 km do planeta (a partir do centro do planeta até a borda do último anel). O

Tabela 1 – Propriedades dos anéis de Urano.

Anel	Raio (km)	Largura (km)	Excentricidade ($\times 10^{-3}$)	Inclinação ($^{\circ}$)
1986U2R/ ζ	37850 - 41350	3500	-	-
6	41837	1.6 - 2.2	1.0	0.062
5	42234	1.9 - 4.9	1.9	0.054
4	42570	2.4 - 4.4	1.1	0.032
α	44718	4.8 - 10.0	0.8	0.015
β	45661	6.1 - 11.4	0.4	0.005
η	47176	1.9 - 2.7	0?	0.001
γ	47627	3.6 - 4.7	0.1	0.002
δ	48300	4.1 - 6.1	0?	0.001
λ	50023	1 - 2	0?	0?
ϵ	51149	19.7 - 96.4	7.9	0.001
ν	66100 - 69900	3800	?	?
μ	86000 - 103000	17000	?	?

Fonte: De Pater (2010).

anel mais interno ν orbita Urano entre as órbitas dos satélites Portia e Rosalinda, enquanto que o mais externo μ orbita o planeta com o satélite Mab imerso em seu interior.

Figura 2 – Perfis radiais dos anéis ν (esquerda) e μ (direita).

Fonte: Showalter (2006).

A Figura 2 mostra os perfis triangulares dos anéis. A linha vermelha representa os dados do HST, enquanto que a linha preta representa os dados da Voyager II. Já as linhas verticais indicam as órbitas dos satélites.

Ambos os anéis apresentam perfis triangulares assimétricos. Enquanto que no anel ν o pico encontra-se deslocado do centro, no anel μ ele encontra-se centrado no satélite Mab.

Showalter e Lissauer (2006) fizeram uso do sistema de ótica adaptativa do telescópio Keck em comprimentos de onda do infravermelho próximo e mostraram que o anel ν é vermelho e o

anel μ é azul. As cores dos anéis estão relacionadas com a reflexão da luz nos grãos de poeira de diferentes tamanhos: os anéis de coloração azulada são caracterizados por grãos de poeira menores, distribuídos de forma inclinada, ou seja, as partículas maiores encontram-se onde há um menor número de partículas e o mesmo procedimento ocorre com as partículas menores. Já os anéis de coloração avermelhada são caracterizados por grãos de poeira maiores, distribuídos de forma plana.

São encontradas similaridades entre esses anéis com os de Saturno. No caso do anel ν podemos compará-lo ao anel G de Saturno, já que ambos estão quase a mesma distância do planeta em que orbitam (Figura 3), são vermelhos, possuem perfis triangulares com pico deslocado do meio do anel, e são desconhecidos corpos fontes que alimentem esses anéis. Essas similaridades nos permitem fazer algumas aproximações, já que o estudo de Saturno é mais avançado que o de Urano. Por exemplo, a nave espacial Pioneer 11 realizou algumas detecções que levaram os cientistas à ideia de que o anel G pode ter sido criado e mantido segundo a colisão de meteoróides com as partículas de poeira presentes no anel (de Pater et al. 2006). Com isso podemos supor que o mecanismo para formação e manutenção do anel ν de Urano é semelhante a esse.

Figura 3 – Esquema do sistema de anéis planetários externos de Saturno (acima) e Urano (abaixo).



Fonte: De Pater et al (2006).

2.3 SATÉLITES

Atualmente 27 satélites naturais (ou luas) orbitam ao redor de Urano. Seus nomes são derivados das obras de William Shakespeare e Alexander Pope e suas dimensões variam. Os quatro maiores são: Titânia, Oberon, Umbriel e Ariel, com um diâmetro de um pouco mais de 1000 km, enquanto que os menores possuem um diâmetro próximo a 10 km.

Devido as suas características e localizações eles estão separados em três grupos: treze satélites internos, nove satélites externos (irregulares) e cinco grandes satélites.

No primeiro grupo, encontram-se os 13 satélites internos que estendem-se até Mab (Tabela 2.3.1). Todos possuem o albedo bem baixo, por isso são bem escuros. O maior de todos, Puck, foi descoberto pelas imagens da Voyager II e possui um diâmetro de 162 km. Cordélia e Ofélia são os mais internos e servem como pastores para o anel ϵ (Arnett, 1995). Mab é a lua mais externa desse grupo e tem como função fazer a manutenção do anel μ (Sfair & Giuliatti Winter, 2012). Dentro desse grupo, encontramos um subgrupo, conhecido como “Família de Portia”, composto pelos satélites: Bianca, Cressida, Desdemona, Julieta, Portia, Rosalinda, Cupido, Belinda e Perdita.

Tabela 2 – Elementos orbitais dos satélites internos de Urano, ordenados pela distância ao planeta.

Satélite	Semi-eixo maior (km)	Diâmetro (km)	Excentricidade ($\times 10^{-3}$)	Inclinação ($^{\circ}$)
Cordélia	49770.00	40	?	?
Ofélia	53790.00	42	?	?
Bianca	59165.56	54	0.274	0.1811
Créssida	61766.72	82	0.203	0.0379
Desdemona	62658.38	70	0.342	0.0982
Julieta	64358.23	106	0.052	0.0454
Portia	66097.29	140	0.512	0.0255
Rosalinda	69926.82	72	0.579	0.0934
Cupido	74392.38	18	?	?
Belinda	75255.61	90	0.277	0.0282
Perdita	76416.73	26	3.287	0.0676
Puck	86004.49	162	0.389	0.3214
Mab	97735.91	24	2.537	0.1335

Fonte: Showalter (2006, 2005).

No segundo grupo encontramos satélites mais distantes de Urano, que estendem-se de Francisco a Ferdinand (Tabela 3). Todos orbitam o planeta de maneira bem excêntrica e também possuem órbitas retrógradas (rotacionam no sentido contrário ao planeta), exceto o satélite Margaret, que possui uma órbita prógrada.

O terceiro grupo, é composto por Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon, os maiores satélites de Urano (Tabela 4). As superfícies são marcadas por crateras, devido à possíveis colisões. A superfície de Miranda é disforme, varia de altas montanhas a suaves planícies e seu interior é composto por gelo. Ariel é o satélite mais brilhante de Urano, enquanto Umbriel é o mais escuro dos satélites grandes (Howell, 2018). Ambos são compostos de gelo e rochas.

Os satélites Portia e Rosalinda estão diretamente relacionados com a região estudada, já que estes encontram-se na borda interna e externa do anel ν , respectivamente. Portanto, a seguir, vamos abordar algumas características destes satélites.

Tabela 3 – Elementos orbitais dos satélites externos de Urano, ordenados pela distância ao planeta.

Satélite	Semi-eixo maior ($\times 10^{-3}$ km)	Diâmetro (km)	Excentricidade ($\times 10^{-3}$)	Inclinação ($^{\circ}$)
Francisco	4276	22	0.1324	147.25
Caliban	7231	72	0.1812	141.53
Stephano	8004	32	0.2248	143.82
Trínculo	8504	18	0.2194	166.93
Sycorax	12179	150	0.5219	159.42
Margaret	14345	20	0.6772	57.37
Prospero	16256	50	0.4445	151.83
Setebos	17418	48	0.5908	158.24
Ferdinand	20901	20	0.3993	169.79

Fonte: Williams (1995).

Tabela 4 – Elementos orbitais dos satélites grandes de Urano, ordenados pela distância ao planeta.

Satélite	Semi-eixo maior ($\times 10^{-3}$ km)	Diâmetro (km)	Excentricidade ($\times 10^{-3}$)	Inclinação ($^{\circ}$)
Miranda	129.90	472	0.1324	4.34
Ariel	199.90	1158	0.1812	0.04
Umbriel	266.00	1169	0.2248	0.13
Titânia	436.30	1578	0.2194	0.08
Sycorax	583.50	1523	0.5219	0.07

Fonte: Williams (1995).

2.3.1 Portia

Portia foi descoberto pelas imagens da Voyager II em 1986. É o segundo maior dos satélites internos de Urano, com um diâmetro de aproximadamente 140 km, logo depois de Puck (162 km)(Tabela). Faz parte da família de Portia, e já que possui a maior massa e raio, em comparação com os outros membros, esta leva o seu nome.

Localiza-se a 66097 km de Urano e podemos ver pela Figura 1 que ele limita internamente o anel ν . Em 2006, quando estudavam Urano a partir das imagens do HST, Showalter & Lissauer verificaram que, por ser o maior da família, Portia apresentava a menor variação dos elementos orbitais, desde a época das imagens da Voyager.

2.3.2 Rosalinda

Rosalinda também foi descoberto em 1986 pelas imagens da sonda Voyager II. Está localizado a 69926 km do planeta, limita externamente o anel ν e faz parte dos satélites internos.

3 OBJETIVO

Em Sfair & Giuliatti Winter (2009), foi analisada a evolução orbital das partículas de poeira dos anéis μ e ν de Urano. A partir de simulações numéricas, mostraram o espalhamento das partículas e as colisões destas com os satélites vizinhos, movidos pela influência da força de radiação solar. Segundo as imagens do HST, os anéis se mantêm em um estado estacionário, portanto é necessário um mecanismo responsável em produzir material, preservando o estado do anel.

Sfair & Giuliatti Winter (2012) mostraram que o pico triangular radial do anel μ coincide com a órbita do satélite Mab, e que colisões entre o satélite e projéteis interplanetários produzem partículas de poeira, que evoluem com o tempo e se distribuem na região, pela influência do achatamento do planeta e da força de radiação solar.

Diferentemente do anel μ , não é conhecido no anel ν algum corpo responsável por realizar tal manutenção. Portanto, nossa ideia para a manutenção do anel ν é a existência de satélites hipotéticos imersos no anel. Estes podem colidir entre si e com os satélites de Urano (Portia e Rosalinda), além de colidirem com projéteis interplanetários produzindo partículas de poeira que formam a população do anel.

Temos como objetivo, verificar a estabilidade dos satélites hipotéticos na região do anel e estimar a contribuição destes satélites nos processos de geração e remoção de partículas de poeira, buscando a manutenção da população do anel em um estado estacionário.

4 METODOLOGIA

Primeiramente utilizamos uma rotina de números aleatórios em linguagem C++, para obter algumas características físicas e orbitais (a , m , e) de 50 satélites hipotéticos isolados, de raios entre 1 a 5 km e semi-eixo maior entre 66100 a 69900 km, intervalo correspondente a corpos não detectáveis na região do anel ν . Vimos que estes encontravam-se bem espalhadas pelo anel e repetimos o mesmo procedimento para 1000 satélites hipotéticos, deixando a distribuição mais definida. Em seguida, para analisar a órbita de Portia e Rosalinda ao redor de Urano, construímos um programa, inserindo inicialmente os valores orbitais e o raio dos satélites, presentes na Tabela 6 e a massa de Urano, em um sistema contendo Urano como corpo central sendo orbitado individualmente por Portia e Rosalinda. A fim de estudar e interferência de um satélite em relação a outro simulamos um sistema envolvendo os três corpos (Portia, Rosalinda e Urano) ao mesmo tempo. Integramos todos os sistemas por um período de 100 anos, já que (Sfair & Giuliatti Winter, 2009) verificaram que o tempo de vida das partículas de poeira são de aproximadamente 100 anos.

Obtivemos os elementos orbitais e parâmetros físicos de 1500 satélites hipotéticos (com os raios variando de 0.1 a 5 km) por meio de integrações numéricas utilizando o integrador IAS15 do pacote REBOUND (Rein & Spiegel, 2015), que tem como finalidade integrar o movimento dos corpos influenciados pela gravidade.

Nesse ponto, nosso intuito era determinar as dimensões, as massas e a distribuição de satélites hipotéticos na região do anel ν . Para isso foi necessário a utilização do método de Monte Carlo (método estatístico baseado em amostragens aleatórias, a fim de obter resultados próximos aos reais), levando em conta a não perturbação dos satélites vizinhos Portia e Rosalinda, e considerando as restrições observacionais das imagens obtidas pelo HST. Aqui, nosso sistema era similar ao estudado acima, mas além de ter Urano como corpo central e os dois satélites orbitando o planeta, tínhamos 20 satélites hipotéticos também orbitando o corpo central. Restringimos a existência de satélites hipotéticos somente na região interna ao anel μ , portanto os semi-eixos dos satélites hipotéticos em questão só variaram no intervalo de 66100 a 69900 km (borda interna e externa do anel, respectivamente).

Para dar início as integrações, estabelecemos alguns parâmetros: declaramos os satélites hipotéticos como esferas, portanto para calcular a massa de cada uma utilizamos a equação do volume da esfera, tomando a densidade de 1200 kg/m^3 , igual a do satélite Miranda; dado que Urano apresenta um achatamento em seus pólos foi necessário levar em conta o termo da expansão multipolar do campo gravitacional ($J_2 = 16298 \times 10^{-6}$).

Ao longo da integração era possível haver interações entre os satélites hipotéticos e também entre os satélites hipotéticos e os satélites naturais, portanto inserimos possíveis colisões entre satélite hipotético e satélite hipotético ou entre satélite hipotético e satélite natural (Portia e Rosalinda). Ao ocorrer uma colisão, foram registrados os corpos que colidiram e o momento da

colisão. Colocamos como condição inicial, que ao ocorrer uma colisão entre dois corpos, estes se uniriam, tornando apenas um só corpo. Similar à uma colisão inelástica, antes da colisão os corpos possuem suas massas, raios e velocidades individuais. Após a colisão, os corpos se unem, e a massa, raio e velocidade desse novo corpo é dado pela média desses parâmetros dos corpos que colidiram.

5 RESULTADOS

5.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

A partir do gerador de números aleatórios, vimos que tanto os 50 quanto os 1000 satélites hipotéticos apresentam-se bem distribuídas no anel ν . Devido ao maior número de satélites hipotéticos, a distribuição torna-se mais definida quando utilizamos 1000 satélites hipotéticos, como visto na Figura 4. Aqui os satélites hipotéticos encontram-se isoladas, sem interagir com Portia e Rosalinda ou com planeta, respeitando os intervalos da Tabela 5.

Tabela 5 – Intervalos dos elementos físicos e orbitais dos satélites hipotéticos.

Raio (m)		Semi-eixo maior ($\times 10^3 m$)		Excentricidade	
Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1000	5000	66100	69900	0	0.1

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Realizamos simulações numéricas para obter os elementos orbitais e estudamos as órbitas dos satélites envolvidos (Portia e Rosalinda). Verificamos, através de gráficos que, no primeiro caso (envolvendo um dos satélites e Urano), os elementos orbitais (a , e , I , ω , Ω) de Portia e Rosalinda se mantiveram constante (Figura 5), enquanto que no segundo caso (levando em conta os dois satélites e Urano), devido a troca de momento angular dos satélites, o semi-eixo maior permaneceu constante, mas a excentricidade sofreu uma alteração da ordem de 10^{-5} (Figura 6).

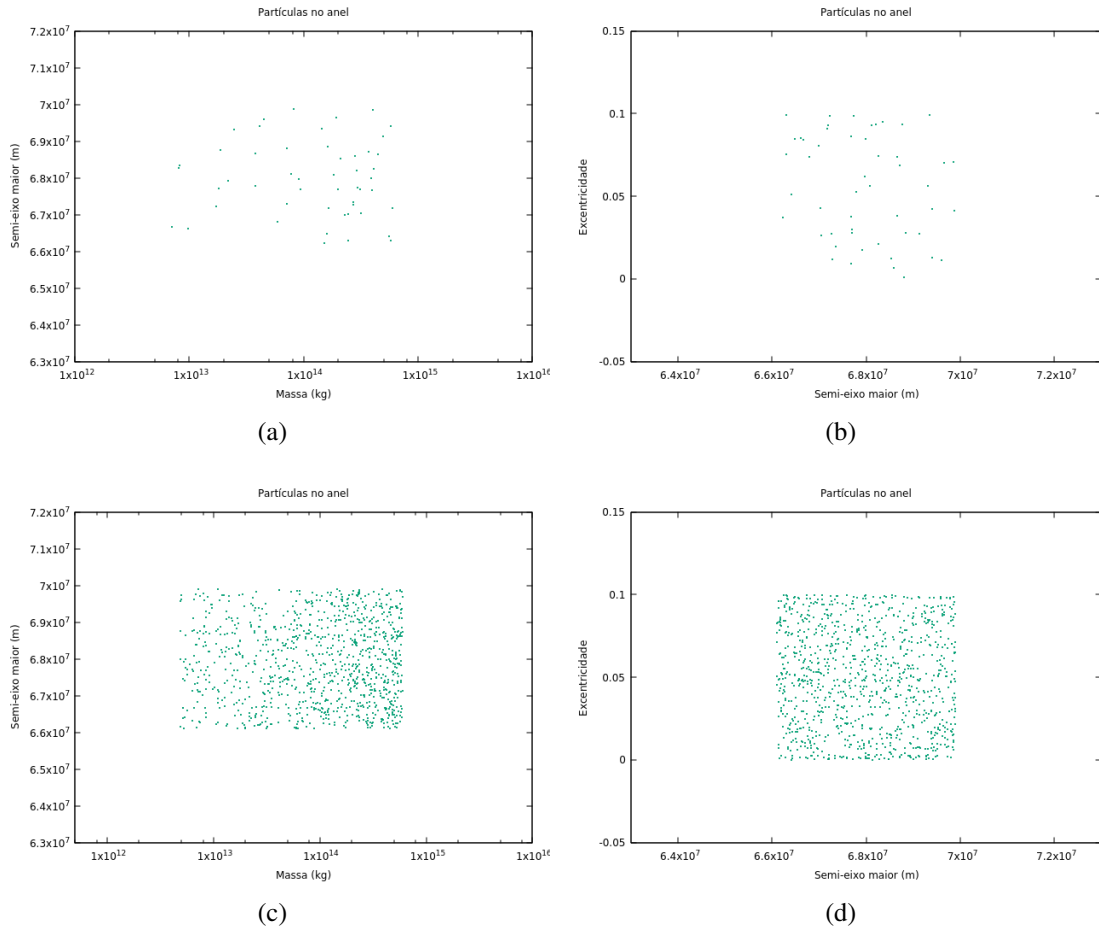
Realizamos então uma nova simulação incluindo os satélites Portia e Rosalinda, utilizando os elementos orbitais, massas e raios apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Características físicas e elementos orbitais dos satélites utilizados nas simulações numéricas. Dentre eles temos massa (m), raio (R), semi-eixo maior (a), excentricidade (e), inclinação (I), longitude do nodo ascendente (Ω), argumento do pericentro (ω), longitude média (f).

Satélite	Portia	Rosalinda
m (kg)	1.7×10^{18}	2.5×10^{17}
R ($\times 10^3 m$)	70	36
a ($\times 10^3 m$)	66097.2873	69926.8179
e ($\times 10^{-3}$)	0.512	0.579
I ($^\circ$)	0.0255	0.0934
Ω ($^\circ$)	77.708	157.640
ω ($^\circ$)	84.413	257.284
f ($^\circ$)	218.486	223.990

Fonte: Showalter (2005).

Figura 4 – Gráficos das distribuições iniciais dos (a) e (b): 50 satélites hipotéticos, (c) e (d): 1000 satélites hipotéticos aleatoriamente na região estudada.



Fonte: Produção do Próprio Autor.

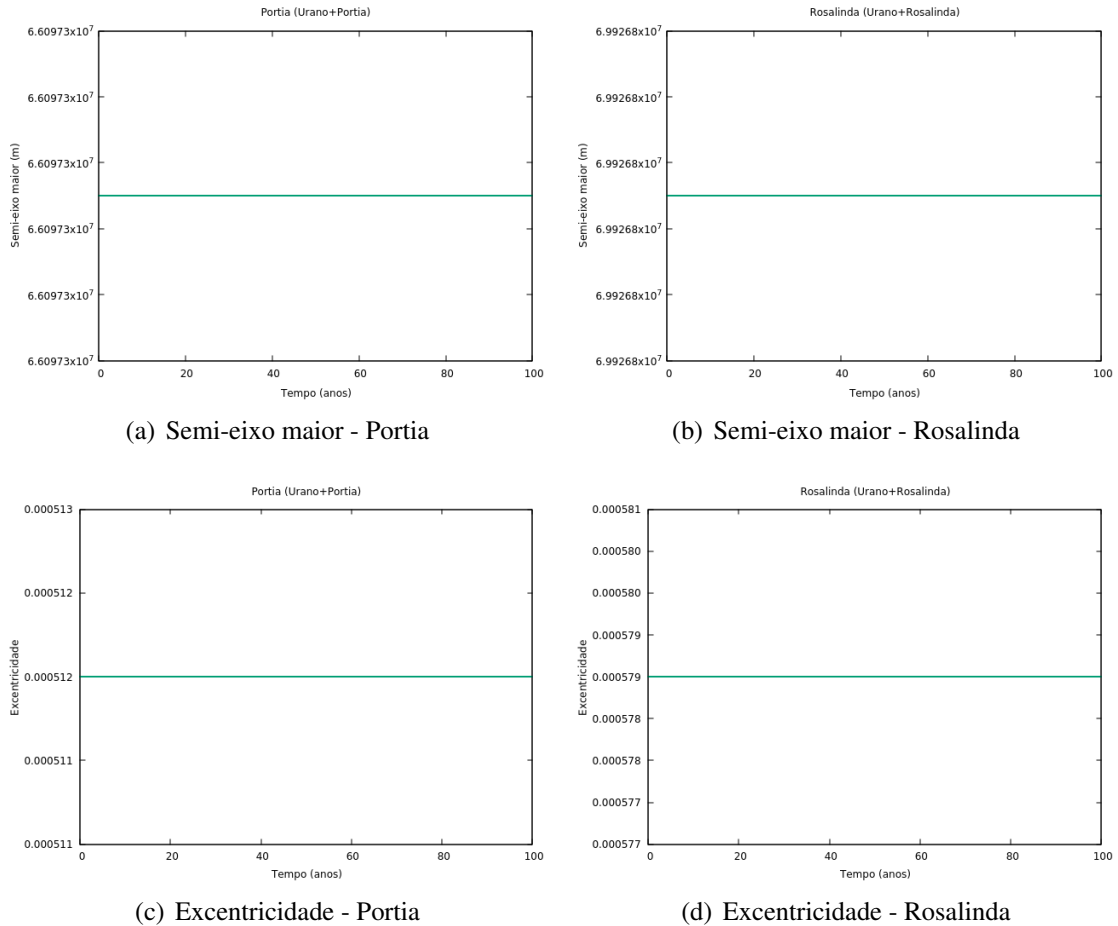
Os dados das dimensões e distribuições de tamanho dos satélites hipotéticos são desconhecidas, mas sabe-se que os corpos que formam os anéis ν e μ possuem um tamanho da ordem de micrometros (de Pater et al. 2006).

5.1.1 Colisões

Utilizando o integrador IAS15 do pacote Rebound (Rein & Spiegel, 2015) realizamos 1500 simulações numéricas (separadas em 3 grupos de 500 simulações com diferentes intervalos de raios), em um tempo de 100 anos de um sistema envolvendo Urano, Portia, Rosalinda e 20 satélites hipotéticos. Levamos em conta a influência do achatamento de Urano, utilizando o primeiro termo da expansão multipolar do campo gravitacional (J_2) e as possíveis colisões entre os corpos. Os parâmetros inicialmente inseridos e os obtidos nas simulações obedecem o sistema internacional de unidades.

O sistema de anéis principais de Urano não possui nenhuma coloração, sendo formado por corpos com raio de aproximadamente 10 cm a 10 m. Portanto, o tamanho dos corpos imersos influencia na coloração do anel, decorrente da reflexão da luz. No caso do anel ν , a coloração

Figura 5 – Gráfico da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano e os dois satélites separadamente, integrados em um tempo de 100 anos.



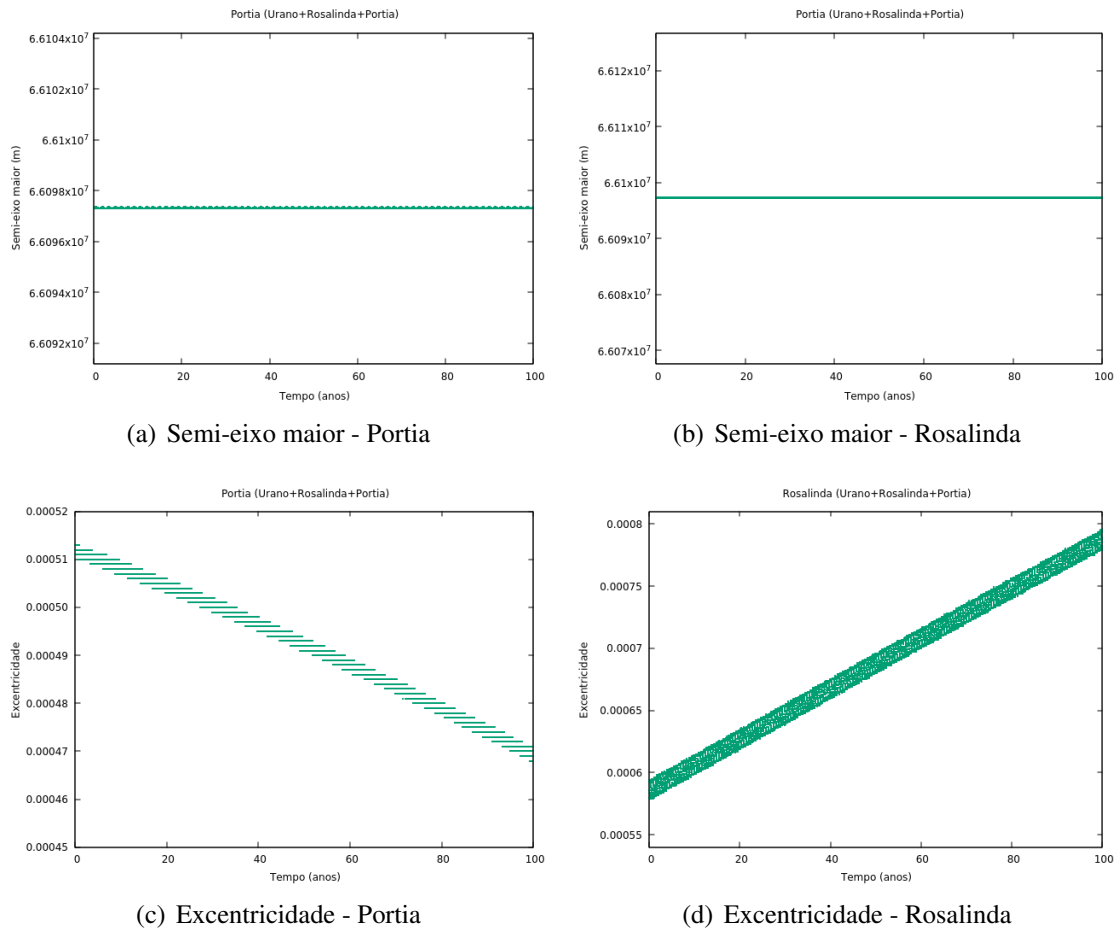
Fonte: Produção do próprio autor.

avermelhada é originada da reflexão da luz por corpos grandes. A partir dessa informação, separamos as simulações em grupos de 500, diferenciando-as segundo os raios dos corpos envolvidos. O primeiro grupo de simulações compreendia raios entre 0.1 km e 0.5 km, o segundo entre 0.5 km e 5 km e o terceiro entre 1 km e 5 km.

Analisando os dados das colisões entre os satélites hipotéticos com Portia e Rosalinda, vimos que o número de colisões entre os satélites hipotéticos e Portia foi maior que o número de colisões destes com Rosalinda, já que Portia é gravitacionalmente dominante se comparada a Rosalinda na "Família de Portia". Em cada intervalo de simulações, totalizamos 10000 satélites hipotéticos, e na Tabela 7 são apresentados os números de colisões com os satélites obtidos.

Intuitivamente é razoável pensarmos que o maior número de colisões aconteceria provavelmente com os satélites hipotéticos de maior raio, devido ao sua maior área para colisão. Mas, na Tabela 7, podemos ver que mesmo com um número menor de colisões (maior número de satélites hipotéticos restantes), os corpos com raios menores efetuaram mais colisões com os satélites do que as maiores. Isso é explicado pelo fato dos satélites hipotéticos maiores realizarem um maior

Figura 6 – Gráfico da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano e os dois satélites juntos, integrados em um tempo de 100 anos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 – Números de colisões entre as satélites hipotéticos e os satélites naturais (Portia e Rosalinda) para cada grupo de simulações numéricas.

Raio (km)	Média dos satélites hipotéticos restantes em cada simulação	Número de colisões em 500 simulações	
		Portia	Rosalinda
0.1 a 0.5	12	2147	1272
0.5 a 5.0	5	1905	1219
1.0 a 5.0	5	1882	1209
Total	20	30000	

Fonte: Produção do próprio autor.

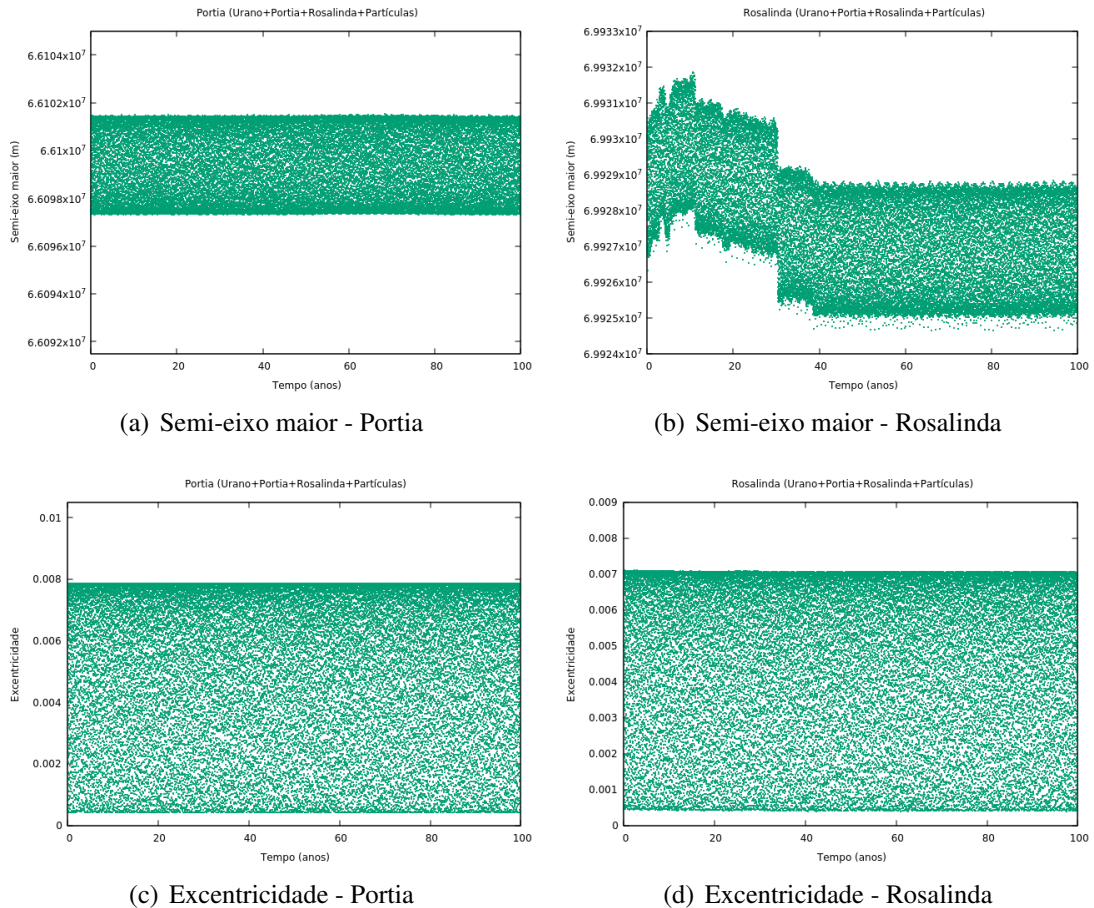
número de colisões entre si, restando menos corpos para colidir com os satélites naturais.

Entre todos os casos, não obtivemos nenhuma simulação em que todas os satélites hipotéticos colidiam, mostrando que estes corpos podem possivelmente ser estáveis ao longo dos 100 anos (período da simulação). Também não encontramos casos em que nenhuma colisão aconteceu, ou seja, mesmo os satélites hipotéticos sobrevivendo, a região do anel ν é bastante perturbada.

Selecionamos dentre todas as simulações as três com o maior número de satélites hipotéticos sobreviventes após todas as colisões (uma de cada grupo) e construímos novamente os gráficos do semi-eixo maior e excentricidade em função do tempo. Nesse ponto, o achatamento de Urano está sendo levado em conta, e podemos ver isso nos gráficos da Figura 7, já que uma faixa é formada devido à esta perturbação.

Verificamos que após todas as colisões os elementos orbitais de Portia permaneceram constante. Mas, no grupo de simulações em que raio variava de 0.5 a 5 km, o semi-eixo maior de Rosalinda sofreu uma perturbação, como visto na Figura 8(b). Computando o momento da colisão do satélite hipotético com Rosalinda, verificamos que os picos encontrados no gráfico correspondem aos momentos em que as colisões aconteceram. O mesmo não foi encontrado em Portia, já que este possui uma massa maior. Essa variação no semi-eixo de Rosalinda seria percebido nas imagens do Hubble Space Telescope (HST). Nesse caso em particular, os resultados obtidos não respeitaram as restrições de não perturbação das órbitas dos satélites próximos e estavam em desacordo com os limites observacionais impostos pelas imagens do HST, portanto satélites hipotéticos com raios deste tamanho não podem ser encontradas nessa região.

Figura 7 – Gráficos da variação dos elementos orbitais de Portia e Rosalinda no sistema envolvendo Urano, os dois satélites, 20 satélites hipotéticos (raios entre 0.5 e 5 km) e suas possíveis colisões, integrados em um tempo de 100 anos.



Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse projeto, conseguimos visualizar que o anel ν pode ser populado por satélites hipotéticos bem distribuídos por toda a região (66100 a 69900 km). Esses corpos sofrem influências do planeta, já que Urano possui um achatamento nos pólos que causa uma variação no semi-eixo maior e na excentricidade dos corpos. Estes satélites hipotéticos também sofrem influência dos satélites mais próximos (Portia e Rosalinda), a partir da atração gravitacional, que ocasiona possíveis colisões dos satélites hipotéticos com os satélites naturais.

Realizamos simulações numéricas do modelo baseado em Urano como corpo central sendo orbitado por Portia, Rosalinda e 20 satélites hipotéticos de tamanhos diferentes por um tempo de 100 anos. Ao ponto que analisávamos numericamente as colisões entre os 10000 satélites hipotéticos, Portia e Rosalinda, verificamos que em nenhum dos casos todas os satélites hipotéticos colidiam, o que mostra que estes corpos podem ser estáveis ao longo do período simulado de 100 anos. Também não encontramos casos com ausência total de colisões, indicando que mesmo com os corpos sobrevivendo, a região é bastante perturbada. A partir das simulações tivemos a confirmação da existência de satélites hipotéticos sobreviventes e verificamos que as colisões entre satélite hipotético e satélite natural ou entre satélite hipotético e satélite hipotético pode ser um mecanismo de manutenção da população do anel em um estado estacionário.

Após todas as simulações encontramos uma particularidade que nos levou a um resultado importante. Analisando graficamente os dados da simulação com maior número de corpos sobreviventes no intervalo de raio de 0.5 e 5 km, percebemos que no momento da colisão de alguns satélites hipotéticos com Rosalinda ocorreu a variação brusca no semi-eixo maior de Rosalinda, dando origem a elevações no gráfico. Essa característica vai contra as imagens obtidas pelo HST, portanto concluímos que não deve ser possível a existência de corpos com esse tamanho na região.

Em trabalhos futuros pretendemos calcular a velocidade de colisão entre as satélites hipotéticos (a fim de nos aprofundarmos nos efeitos das colisões). A partir da distribuição de corpos no anel ν , realizada neste trabalho, computaremos a taxa de produção de poeira para cada população existente, a partir dos modelos de Sfair & Giuliatti Winter (2012). Utilizando simulações numéricas, analisaremos a evolução orbital das partículas de poeira geradas, levando em conta as perturbações causadas pelos satélites próximos, pela radiação solar, dentre outros fatores.

REFERÊNCIAS

ANÉIS de Urano. **In:** WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikimedia, 2008. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/An%C3%A9is_de_Urano>. Acesso em: 09 out. 2018

ARNETT, Bill. **As pequenas luas de Urano**, 1995. Disponível em: <<https://bit.ly/2zUfrC2>>. Acesso em: 09 out. 2018.

DE PATER, Imke.; HAMMEL, H. B.; GIBBARD, S. G.; SHOWALTER, M. R. New dust belts of Uranus: one ring, two ring, red ring, blue ring. **Science**, v. 312 p. 92-94, 2006.

DE PATER, Imke.; LISSAUER, Jack J. **Planetary sciences**. 2 ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.

HOWELL, Elizabeth. **Moons of Uranus: Facts about the tilted planet's satellites**, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/1SILFcT>>. Acesso em: 13 out. 2018.

MINER, Ellis D.; MATTHEWS, Mildred Shapley; BERGSTRAHL, Jay T. **Uranus**. Tucson : University of Arizona Press, 1991.

MUNSELL, Kirk. **NASA: SSolar system exploration: planets: Uranus: facts & figures**. NASA, 2007. Disponível em: <<https://go.nasa.gov/2zOOak7>>. Acesso em: 09 out. 2018.

REIN, H.; SPIEGEL, D. S. *IAS15*: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 446, p. 1424-1437, 2015.

SFAIR, R.; WINTER, G. S. M. Orbital evolution of the μ and ν dust ring particles of Uranus. **Astronomy & Astrophysics**, v. 505, n. 2, p. 845-852, 2009.

SFAIR, R.; WINTER, G. S. M. The role of Mab as a source for the ring of Uranus. **Astronomy & Astrophysics**, v. 543, n. 4, p. A17, 2012.

SHOWALTER, M. R.; LISSAUER, J. J. The second ring-moon system of Uranus: discovery and dynamics. **Science Express**, 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/2TFvmfB>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

SHOWALTER, M. R.; LISSAUER, J. J. The second ring-moon system of Uranus: discovery and dynamics. **Science**, v. 311, p. 973-977, 2006.

WILLIAMS, Dr. David R. **Uranian satellite fact sheet**. NASA, 1995. Disponível em: <<https://go.nasa.gov/2T4rlC1>>. Acesso em: 09 out. 2018.

WILLIAMS, Dr. David R. **Uranus fact sheet**. NASA, 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/2DD7chN>>. Acesso em: 09 out. 2018.