

UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE A HISTÓRIA, A GERAÇÃO E A PROPAGAÇÃO DE DETRITOS ESPACIAIS

Andreza da Costa Batista¹ e Marcelo Lopes de Oliveira e Souza²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
São José dos Campos, SP, 12227-010
¹andreza999@hotmail.com e ²marcelo@dem.inpe.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma breve discussão sobre a história, a geração e a propagação de detritos espaciais. Para isso, o trabalho: 1) resume alguns conceitos básicos sobre detritos espaciais; 2) historia alguns modos de geração de detritos espaciais registrados na literatura ao longo da Era Espacial (1957-2011); 3) ilustra três modelos e condições iniciais da geração a priori de detritos espaciais com algumas figuras extraídas de um trabalho maior em andamento; 4) ilustra dois métodos de propagação orbital prógrada de detritos espaciais artificiais com algumas figuras extraídas de um trabalho maior em andamento; 5) oferece algumas simulações e conclusões provisórias baseadas nestas figuras. Tais conclusões serão verificadas pelo trabalho maior em andamento.

Palavras-chaves: detritos espaciais, história, geração, propagação, fragmentação, explosão, colisão.

1 Introdução

Atualmente estima-se que existam centenas de milhares de detritos espaciais, dos mais variados tamanhos, girando em torno da Terra. Esses detritos são de origem natural ou artificial. Os detritos espaciais naturais resultam de fragmentações, aglomerações, desprendimentos, capturas, etc., de corpos naturais como meteoróides, asteróides, etc. Os detritos espaciais artificiais resultam de desmembramentos, fragmentações, explosões, colisões, etc., de veículos lançados ao espaço.

Uma fonte de detritos espaciais artificiais é o desmembramento de foguetes, satélites ou plataformas espaciais que permaneceram em órbita, depois de se tornarem inativos; e podem ser desde uma chave de fenda perdida durante consertos espaciais até a própria estrutura de um satélite.

Outras fontes de detritos espaciais artificiais são a súbita fragmentação ou mesmo a explosão de satélites. Estas fragmentações ou explosões e os detritos resultantes são registrados pelo órgão americano NORAD que mantém uma base de dados de rastreamento de trajetórias de objetos em órbita em torno do globo terrestre.

Os detritos espaciais, também conhecidos como detritos orbitais, podem permanecer em órbitas compartilhadas por outros corpos por um longo tempo e assim causar riscos de colisões, inclusive com veículos espaciais ainda em funcionamento. Além disso, há os riscos de possíveis acidentes pela reentrada de detritos espaciais na atmosfera terrestre. Por essa razão, os detritos espaciais estão se tornando cada vez mais um importante campo de estudo.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma breve discussão sobre a história, a geração e a propagação dos detritos espaciais.

Este artigo está organizado da seguinte maneira:

- O item 2 resume alguns conceitos básicos sobre detritos espaciais;
- O item 3 historia alguns modos de geração de detritos espaciais registrados na literatura;
- O item 4 ilustra três modelos e condições iniciais da geração a priori de detritos espaciais;
- O item 5 ilustra dois métodos de propagação prógrada do movimento orbital de detritos espaciais;
- O item 6 oferece algumas simulações e conclusões provisórias;

2 Alguns Conceitos Básicos Sobre Detritos Espaciais

De acordo com o Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), a definição de detritos espaciais artificiais é: “Detritos espaciais artificiais são todos os objetos feitos pelo homem, incluindo fragmentos e elementos do mesmo, que estão em órbita ou re-entrando a atmosfera e que não estão em funcionamento” (KLINKRAD, 2006).

Entre o lançamento do Sputnik e 1 de Janeiro de 2008, aproximadamente 6000 satélites foram lançados ao espaço. Atualmente estima-se que somente 800 satélites estão em operação. Estima-se também que cerca de 50 por cento de todos os objetos rastreáveis são resultados de explosões de objetos em órbita (cerca de 200) ou colisões de objetos em órbita (menos que 10) (ESA, 2010).

O primeiro trabalho que recomendou medidas de mitigação de detritos espaciais foi apresentado por Luboř Perek em 1979 sob o título “Outer Space Activities versus Outer Space”. Em 1977 Donald Kessler e Burton Cour-Palais fizeram a previsão de que, em breve, os detritos espaciais artificiais apresentariam maior risco de colisão em órbitas terrestres baixas do que detritos espaciais naturais. Um ano depois, em 1978, Donald Kessler e Burton Cour-Palais publicaram um trabalho intitulado “Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt”. Eles postularam que em poucas décadas as colisões em órbitas poderiam se tornar a principal fonte de novos detritos espaciais. Em 1990 Donald Kessler investigou o problema em um outro trabalho intitulado “Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low-Earth Orbits” no qual ele descreve o crescimento da população de detritos espaciais artificiais, inicialmente desencadeado pela colisão entre objetos intactos e posteriormente por colisões envolvendo fragmentos (que mais tarde ficou conhecido como “Kessler Syndrome”). Sete anos após esta publicação, em Julho de 1996, a primeira colisão entre dois objetos catalogados foi registrada, quando o satélite de reconhecimento militar francês Cerise foi danificado por um fragmento do foguete Ariane o qual explodiu em Novembro de 1986 (KLINKRAD, 2006).

3 Alguns Modos de Geração de Detritos Espaciais Registrados na Literatura

A seguir estão alguns casos notáveis ilustrando modos de geração de detritos espaciais artificiais, entre eles colisões envolvendo detritos espaciais artificiais, explosões de objetos em órbita, e testes de armas anti-satélite (ASAT).

Em 24 de julho de 1996 ocorreu a primeira colisão documentada entre um satélite artificial e um detrito espacial artificial, atingindo o satélite de reconhecimento militar francês Cerise, que foi danificado. A colisão foi causada por um fragmento já catalogado de um foguete Ariane. (ALBY et alli, 1997 e WIKIPÉDIA, 2010c).

Em 22 de janeiro de 1997, a americana Lottie Williams foi atingida por um detrito espacial artificial. Ela estava em um parque em Tulsa, Oklahoma, quando foi atingida no ombro por um objeto de metal negro de seis polegadas, identificado mais tarde como parte do tanque de combustível de um foguete Delta II. Felizmente Lottie Williams não se feriu com o acidente (WIKIPÉDIA, 2010c).

Em 11 de janeiro de 2007, uma arma anti-satélite (ASAT) chinesa destruiu um satélite meteorológico chinês Fengyun-1C, com massa de 850 kg criando cerca de 2317 pedaços rastreáveis (aproximadamente do tamanho de uma bola de golfe, ou maiores) (WIKIPÉDIA, 2010d).

Em 21 de Fevereiro de 2008, o Pentágono afirmou que um míssil lançado de um navio americano destruiu o satélite espião defeituoso USA-193 (também conhecido como L-21), que estava em rota de colisão com a Terra. O satélite ficou fora de controle logo após ter alcançado a órbita, em 14 de dezembro de 2006. Em janeiro de 2008 sua órbita começou a decair. O governo dos EUA tomou a decisão de derrubar o satélite com base no dano potencial que o choque com a Terra representaria devido ao combustível utilizado para o deslocamento do satélite (WIKIPÉDIA, 2010).

Em 10 de fevereiro de 2009, dois satélites, um militar russo (Cosmos 2251) e outro de comunicação dos Estados Unidos (Iridium 33), colidiram no espaço. A colisão ocorreu cerca de 780 km acima do território da Sibéria, na Rússia, e é a primeira colisão já registrada entre satélites artificiais.

O satélite russo pesava 950 kg e foi colocado em órbita em 16 de junho de 1993, mas estava fora de uso desde 1995, enquanto o satélite Iridium pesava 560 kg, foi lançado em 14 de Novembro de 1997 e estava em funcionamento.

Segundo a NASA, o impacto produziu uma grande nuvem de detritos, que poderia atingir e até destruir outros satélites. Mas, de acordo com a agência americana, o risco para a Estação Espacial Internacional – ISS é pequeno, já que ela orbita a Terra a uma distância de 435 km abaixo da rota da colisão (O GLOBO, 2009).

4 Três Modelos e Condições Iniciais da Geração a Priori de Detritos Espaciais

Os modelos de geração a priori de detritos espaciais selecionados foram o modelo determinístico de explosão, o modelo probabilístico de fragmentação e o modelo determinístico e probabilístico de colisão.

4.1.1 Modelo Determinístico de Explosão

Detalhando e estendendo o que foi mencionado por Nunes e Souza (2000), o modelo determinístico de explosão considera um satélite, no plano orbital, como um disco homogêneo, que é fragmentado em N partes iguais (NUNES; SOUZA, 2000).

4.1.2 Modelo Probabilístico de Fragmentação

Detalhando e estendendo o que foi mencionado por Carrico et alli (2008), o modelo considera uma nuvem de detritos a partir da súbita fragmentação de um satélite utilizando uma distribuição de probabilidade gaussiana para as velocidades dos detritos em coordenadas inerciais.

4.1.3 Modelo Determinístico e Probabilístico de Colisão

Este modelo utiliza princípios fundamentais da Física relacionados à colisão, tais como a conservação da quantidade de movimento linear e o coeficiente de restituição (valor fracionário que representa a razão das velocidades relativas antes e após o impacto).

5 Dois Métodos de Propagação Prógrada do Movimento Orbital de Detritos Espaciais

Os métodos de propagação orbital de detritos espaciais selecionados foram o método de propagação analítico com campo gravitacional central (kepleriano) e o método analítico com campo gravitacional não central (não kepleriano) que inclui os efeitos do J₂.

5.1 O Método Analítico de Propagação com Campo Gravitacional Central (Kepleriano)

Foram encontrados métodos detalhados de propagação do movimento orbital de satélites artificiais na literatura disponível e consultada até o momento. Na apostila de Kuga e Rao (1995) há as hipóteses e o equacionamento do método kepleriano usado neste trabalho.

Um simulador desenvolvido em MATLAB propaga as posições e as velocidades da nuvem de detritos em coordenadas inerciais durante um período de tempo.

5.2 O Método Analítico de Propagação com Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano)

Foram encontrados métodos detalhados de propagação do movimento orbital de satélites artificiais na literatura disponível e consultada até o momento. No Capítulo 10 de Chobotov (1996), há as hipóteses e o equacionamento do método de propagação com campo gravitacional não central (não kepleriano), incluindo os efeitos do J₂, usado neste trabalho.

O J2 influencia principalmente o argumento do perigeu e a ascensão reta do nodo ascendente. Desta forma, o argumento do perigeu, a ascensão reta do nodo ascendente e a anomalia média irão variar no tempo (CHOBOTOV, 1996).

Um simulador desenvolvido em MATLAB propaga as posições e as velocidades da nuvem de detritos em coordenadas inerciais durante um período de tempo.

6 Algumas Simulações e Conclusões Provisórias

6.1 Algumas Simulações

A seguir, serão descritas algumas simulações combinando os modelos de geração a priori de detritos espaciais e os métodos de propagação de detritos espaciais, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de Casos usados nas Simulações.

	Modelo de Geração	Método de Propagação
1º Caso	Determinístico de Explosão	Campo Gravitacional Central (Kepleriano)
2º Caso	Probabilístico de Fragmentação	Campo Gravitacional Central (Kepleriano)
3º Caso	Determinístico e Probabilístico de Colisão	Campo Gravitacional Central (Kepleriano)
4º Caso	Determinístico de Explosão	Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano com J2)
5º Caso	Probabilístico de Fragmentação	Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano com J2)
6º Caso	Determinístico e Probabilístico de Colisão	Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano com J2)

Os casos foram ordenados desta forma para facilitar a comparação entre os modelos e métodos utilizados. Nestas simulações iremos usar os poucos dados disponíveis sobre a explosão e fragmentação do satélite meteorológico chinês Fengyun – 1C ao ser atingido pelo míssil anti-satélite chinês (Tabela 2). As simulações terão início em 11 de janeiro de 2007 às 22:26:10 UTC (que de acordo com Kelso (2007) é o instante mais provável do evento, diferente do instante 22:28 UTC divulgado pela Aviation Week & Space Technology referida em Kelso (2007)).

Tabela 2 – Dados Disponíveis do Satélite Meteorológico Chinês Fengyun – 1C.

Massa aproximada	850 kg
Dimensão	2,02m x 2,00m x 2,215m
Instante da Destruição do Satélite	11 de janeiro de 2007 às 22:26:10 UTC
TLE do Satélite Meteorológico Chinês Fengyun – 1C em 11 de Janeiro de 2007 às 21:44:56.546592 UTC (SPACE TRACK, 2011)	
FENGYUN 1C	
1 25730U 99025A 07011.90621003 .00000180 00000-0 12153-3 0 9323	
2 25730 098.6464 001.7411 0013513 266.0357 094.0215 14.11820274395460	

1º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Determinístico de Explosão e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Central (Kepleriano)

Nesta simulação o satélite meteorológico chinês Fengyun – 1C foi modelado como um disco de raio 1,5 metros. Considerou-se também que a explosão gerou 500 detritos (100 detritos resultantes da explosão borda do disco e 400 detritos resultantes da explosão do centro do disco) e que o gradiente de explosão foi 100 (Figura 1).

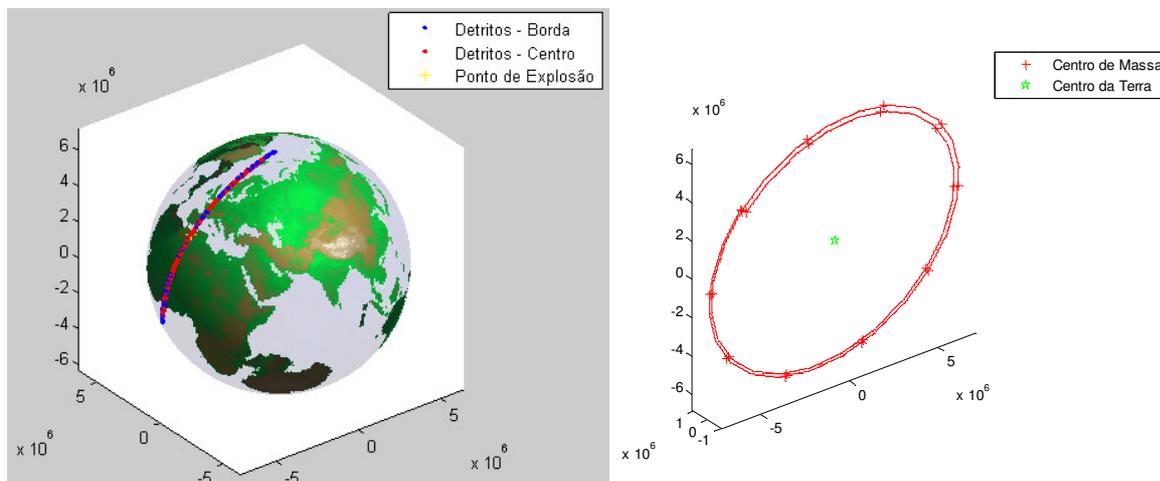


Figura 1 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

2º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Probabilístico de Fragmentação e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Central (Kepleriano)

Esta simulação gera uma nuvem de detritos a partir da súbita fragmentação de um satélite utilizando uma distribuição de probabilidade gaussiana para as velocidades dos detritos em coordenadas inerciais. Considerou-se que: a fragmentação gerou 500 detritos e o desvio padrão das velocidades foi de 50 metros por segundo (Figura 2).

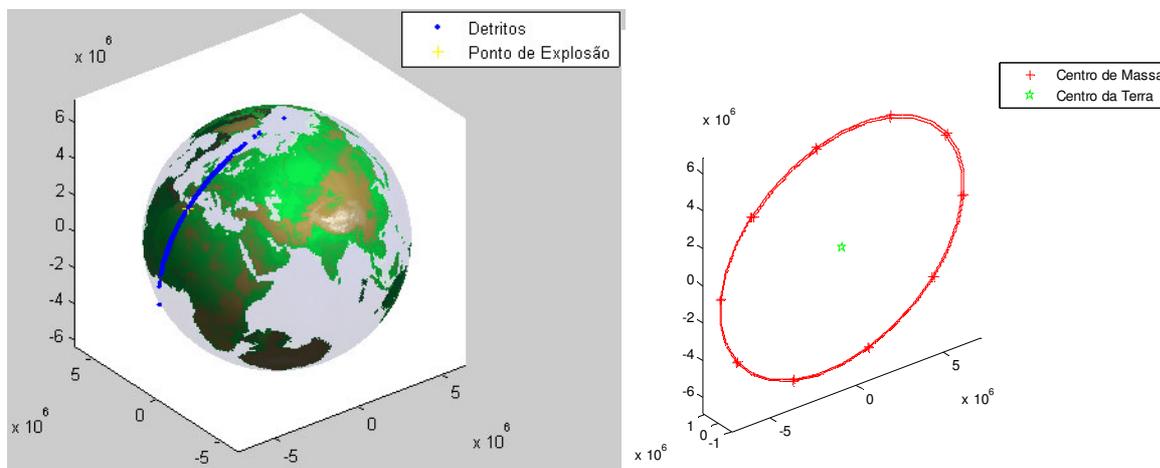


Figura 2 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

3º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Determinístico e Probabilístico de Colisão e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Central (Kepleriano)

Nesta simulação considerou-se também que a colisão gerou 500 detritos, que o coeficiente de restituição foi 1 e que o desvio padrão das velocidades foi de 50 metros por segundo (Figura 3).

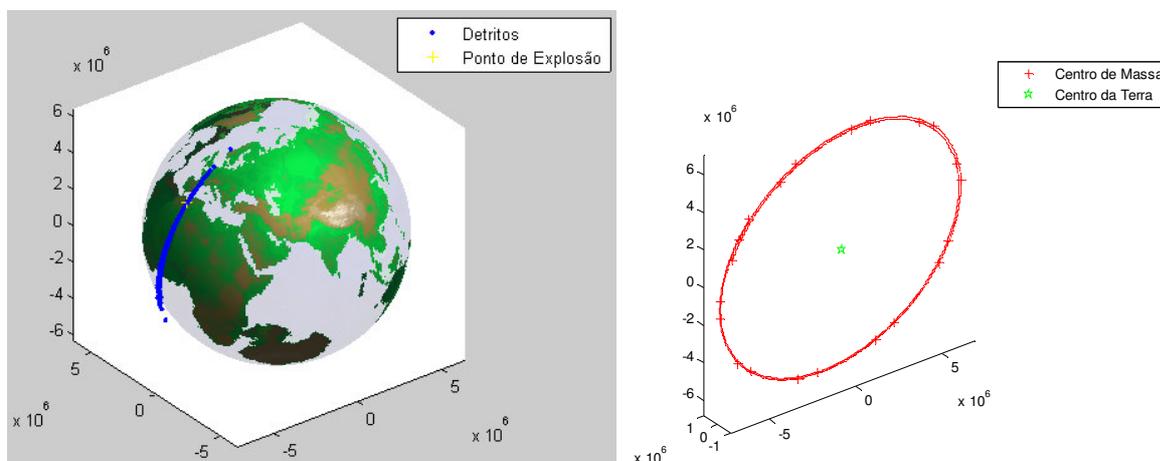


Figura 3 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

4º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Determinístico de Explosão e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano)

Nesta simulação o satélite meteorológico chinês Fengyun – 1C foi modelado como um disco de raio 1,5 metros. Considerou-se também que a explosão gerou 500 detritos (100 detritos resultantes da explosão borda do disco e 400 detritos resultantes da explosão do centro do disco) e que o gradiente de explosão foi 100 (Figura 4).

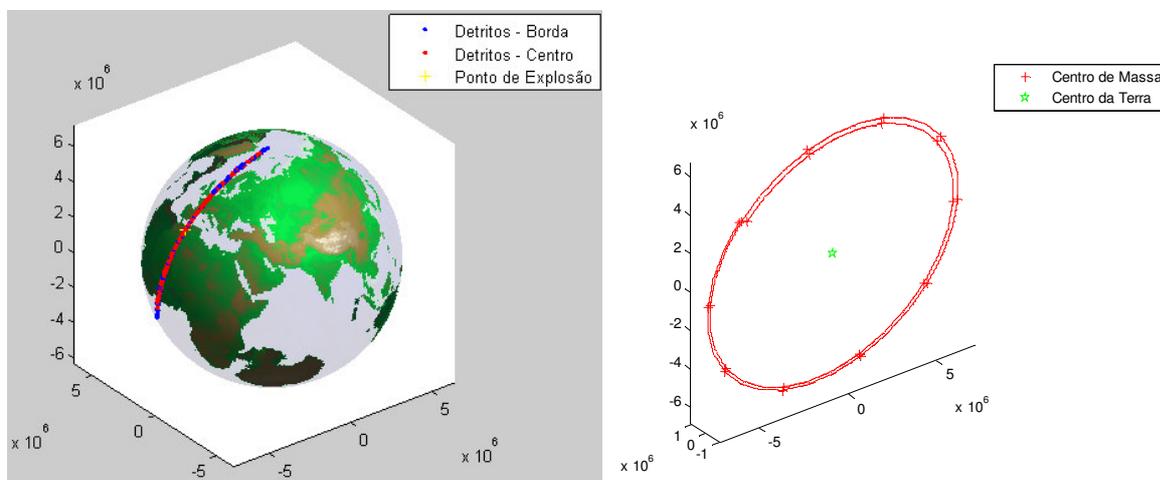


Figura 4 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

5º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Probabilístico de Fragmentação e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano)

Nesta simulação considerou-se que a fragmentação gerou 500 detritos e que o desvio padrão das velocidades foi de 50 metros por segundo (Figura 5).

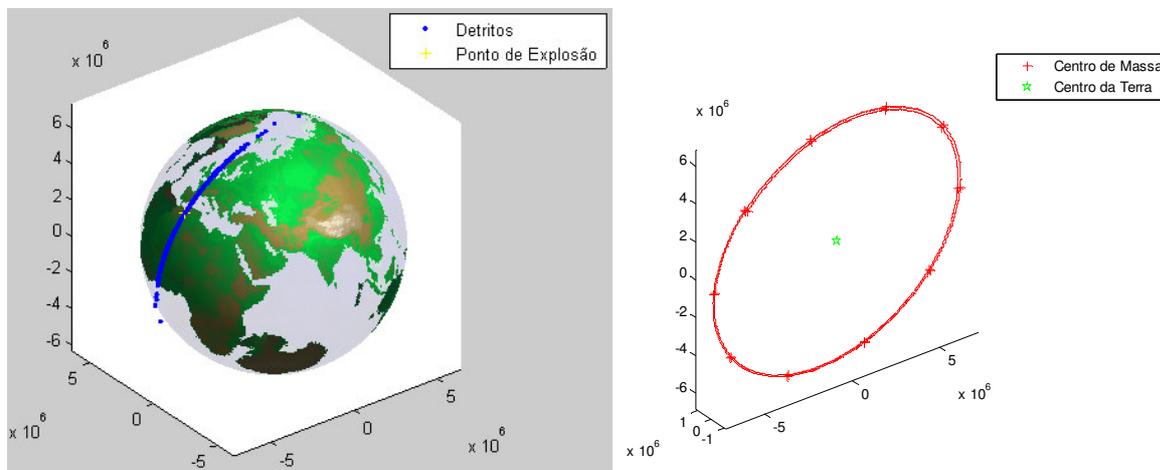


Figura 5 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

6º Caso: Geração a Priori de Detritos Espaciais utilizando o Modelo Determinístico e Probabilístico de Colisão e o Método Analítico de Propagação de Detritos com o Campo Gravitacional Não Central (Não Kepleriano)

Nesta simulação considerou-se também que a colisão gerou 500 detritos, que o coeficiente de restituição foi 1 e que o desvio padrão das velocidades foi de 50 metros por segundo (Figura 6).

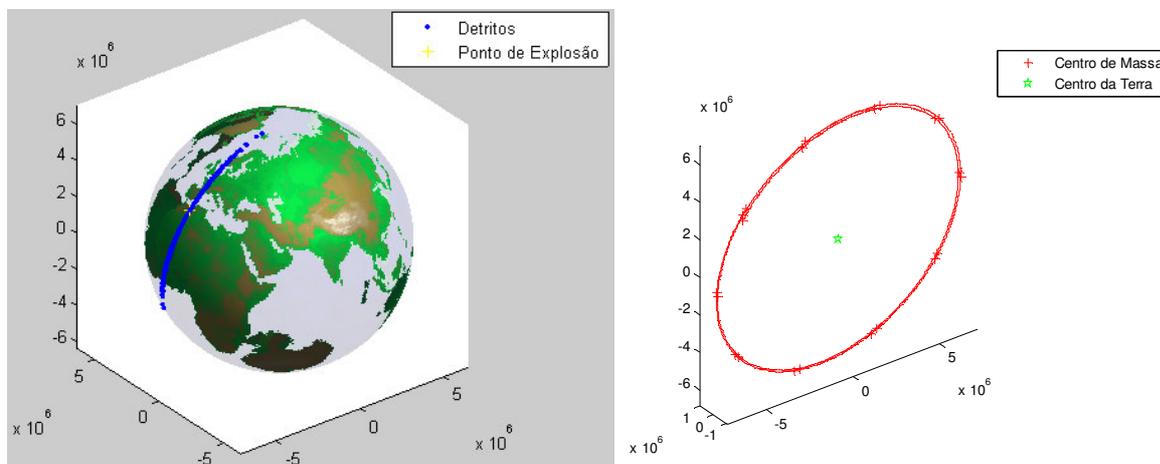


Figura 6 – Nuvem de Detritos após Três Horas e Vinte e Quatro Minutos e o Centro de Massa da Nuvem de Detritos.

6.2 Algumas Conclusões Provisórias

De acordo com as simulações anteriores podemos concluir que:

- 1) Em todos os modelos de geração e métodos de propagação de detritos espaciais artificiais, à medida que o tempo de propagação passa a nuvem de detritos assume progressivamente a forma de um “anel” em torno da Terra;
- 2) Em todos os modelos de geração e métodos de propagação de detritos espaciais artificiais, eventualmente todos os fragmentos retornam ao ponto de explosão (“pinch point”) ou muito próximo dele;

3) No modelo determinístico de explosão, durante o período de propagação da nuvem de detritos (dois períodos orbitais), a diferença entre o método de propagação com campo gravitacional central (kepleriano) e o método de propagação com campo gravitacional não central (não central) é imperceptível visualmente;

4) No modelo probabilístico de fragmentação e no modelo determinístico e probabilístico de colisão, durante o período de propagação da nuvem de detritos (dois períodos orbitais), há uma pequena diferença entre o método de propagação com campo gravitacional central (kepleriano) e o método de propagação com campo gravitacional não central (não central).

5) Em todos os casos, o centro de massa da nuvem de detritos se move em direção ao centro da Terra em forma de espiral.

Tais conclusões deverão ser verificadas pelo trabalho maior em andamento.

7 Referências

ALBY, F.; LANSARD, E.; MICHAL, T. Collision of cerise with space debris. In: European Conference on Space Debris, 2., 1997, Darmstadt, Germany. **Electronic Proceeding**. Darmstadt, Germany: ESA, ESOC, 1997. p. 589. (1997, ESA-SP 393., p. 589). Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/full/1997ESASP.393..589A>>. Acesso em: 29 dez. 2010.

ALFRIEND, K. T.; AKELLA, M. R.; FRISBEE, J.; FOSTER, J. L.; LEE, D.-J.; WILKINS, M. Probability of collision error analysis. **Space Debris**, v 1, n. 1, p. 21-35, 1999.

ANILKUMAR, A. K.; ANANTHASAYANAM, M. R.; RAO P. V. S. **A posterior semi-stochastic low Earth debris on-orbit breakup simulation model**. Acta Astronautica, 57 (9), pp. 733-746, 2005.

ARRAES, A. A.; SOUZA, M. L. O. Propagation of uncertainties in the navigation of aerospace vehicles to minimize the collision risk. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DA TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, 17., 2008, São Paulo, Brasil. **Anais São Paulo: SAE Brasil**, 2008.

CARRICO, T.; CARRICO, J.; POLICASTRI, L.; LOUCKS, M. **Investigating orbital debris events using numerical methods with full force model orbit propagation**. American Astronautical Society, 2008. Disponível em: <http://www.agi.com/downloads/support/productSupport/literature/pdfs/whitePapers/AAS08_OrbitalDebrisEvents_Carrico.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2010.

CELESTRAK. **Chinese ASAT test**. 2010. Disponível em: <<http://celestrak.com/events/asat.asp>>. Acesso em 27 jul. 2010.

CELESTRAK. **Iridium 33/Cosmos 2251 collision**. 2009. Disponível em: <<http://celestrak.com/events/collision.asp>> Acesso em: 23 jul. 2010.

CHOBOTOV, V. A. **Orbital mechanics 02** Washington, D.C.: AIAA, 1996

ESA. **ESOC: Focal point for ESA space debris activities**. European Space Operations Centre. Acesso em: <http://www.esa.int/SPECIALS/ESOC/SEMU2CW4QWD_0.html>. Acesso em 15 de ago. 2010.

JOHNSON, N. L.; MCNIGHT, D. N. **Artificial space debris**. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1991.

KELSO, T.S. **Analysis of the 2007 chinese ASAT test and the impact of its debris on the space environment.**

In: 2007 AMOS CONFERENCE. Maui, Hawaii. 2007. Disponível em:

<<http://celestrak.com/publications/AMOS/2007/AMOS-2007.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2011

KLINKRAD, H. **Space debris models and risk analysis.** Chinchester, U.K., 2006.

KUGA, H. K.; RAO, K. R. **Introdução a mecânica orbital** - São José dos Campos, SP: INPE, 1995 7499029 (INPE-5615-PUD/064).

NASA. **Orbital debris graphics.** Nasa Orbital Debris Program Office. 2005. Disponível em: <

<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beeives.html#leo>>. Acesso em: 29 ago. 2010.

NORAD – North American Aerospace Defense Command. Disponível em: <<http://www.norad.mil>>. Acesso em: 28 ago. 2009.

NUNES, D.; SOUZA, M. L. O. **Forecasting space debris distribution: A measure theory approach.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 51st International Astronautical Congress, Rio Janeiro, Brasil, Outubro 2000

O GLOBO. **Satélites da Rússia e dos EUA colidem no espaço.** 2009. Disponível em:

<<http://oglobo.globo.com/ciencia/mat/2009/02/12/satelites-da-russia-dos-eua-colidem-no-espaco-754375196.asp>>. Acesso em 30 jun. 2009.

SINODEFENCE.COM. **Fengyun 1 meteorological satellite.** 2008. Disponível em:

<<http://www.sinodefence.com/space/spacecraft/fengyun1.asp>>. Acesso em: 7 jan. 2010.

SOUZA, M. L. O.; NUNES, D.; CASTRO, S. F.; PEREIRA, A. P. A. **Numerical and semi-analytical propagation of a space debris distribution for collision avoidance with constellations.** International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying, (IWSCFF), 4. São José dos Campos, 2005.

SPACE TRACK. **The source of space surveillance data.** 2011. Disponível em: <<http://www.space-track.org/>>. Acesso em 15 jan. 2011.

WIKIPÉDIA. **Anti-satellite weapon.** Flórida, 2010. Disponível em:

<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anti-satellite_weapon&oldid=412282357>. Acesso em: 27 jul. 2010.

WIKIPÉDIA. **ASM-135 ASAT.** Flórida. 2010b. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ASM-135_ASAT&oldid=410504466>. Acesso em: 20 dez. 2010

WIKIPÉDIA. **Detrito espacial.** Flórida. 2010c. Disponível em:

<http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Detrito_espacial&oldid=23255126>. Acesso em: 5 set. 2010.

WIKIPÉDIA. **2007 Chinese anti-satellite missile test.** Flórida. 2010d. Disponível em:

<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2007_Chinese_anti-satellite_missile_test&oldid=410131977>. Acesso em: 25 jul. 2010.