



ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE REENTRADAS ATMOSFÉRICAS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Bolsista: Paulo Eduardo Pinto Burke (UNIFESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: pauloepburke@gmail.com

Orientador: Marcelo Lopes de Oliveira e Souza (DMC/ETE/INPE)

E-mail: marcelo@dem.inpe.br

São José dos Campos

Julho de 2012

RESUMO

O avanço da tecnologia espacial e a grande quantidade de satélites artificiais lançados estão tornando cada vez mais evidente o risco desses satélites ou seus fragmentos retornarem à atmosfera. Após seu tempo de vida útil ou devido a alguma falha e perda de comunicação, estes satélites ou parte deles tendem a reentrar na atmosfera. Atualmente aproximadamente 17.000 destroços artificiais com mais de 10 cm orbitam a Terra. Destes, muitos têm tamanho razoável para reentrar na atmosfera e não se desintegrar até a colisão com o solo. É de grande importância tentar prever onde esses detritos irão colidir com o solo para evitar possíveis acidentes caso colidam com uma área de habitação humana. Este trabalho tem como objetivo estudar a análise e simulação de reentradas atmosféricas. Em particular, estuda a queda de um tanque de combustível de um satélite artificial que reentrou no dia 22 de Fevereiro de 2012 e colidiu com o solo próximo a áreas habitadas no município de Anapurus, Maranhão, Brasil. Para isto, identifica, por métodos reversos de análise de reentrada de detritos espaciais, de qual satélite ele possivelmente proveio. Neste estudo, é utilizado o software DRAMA (“Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis”) pertencente à ESA (“European Space Agency”). Ele é dividido em 5 módulos dos quais são utilizados somente os módulos: 1) SESAM (“Spacecraft Entry Survival Analysis Module”), que analisa a reentrada de detritos na atmosfera terrestre; e 2) SERAM (“Spacecraft Entry Risk Analysis Module”) que analisa o risco posto pelos detritos que reentraram. Neste software são inseridos dados de órbitas de satélites aos quais possivelmente o tanque em estudo pertencia e é analisado onde ele é previsto cair em comparação com o local real. É apresentada a possível proveniência do tanque em questão e uma base para futuros estudos de engenharia reversa de reentradas atmosféricas de detritos espaciais.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. O SOFTWARE DRAMA	7
3. O DETRITO ESPACIAL ESTUDADO	8
4. ANÁLISE DO DETRITO ESPACIAL COM O SOFTWARE DRAMA	10
5. RESULTADOS	13
6. CONCLUSÕES	16
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Foto tirada do detrito espacial próximo ao local do impacto.	8
Figura 2: Altitude do detrito espacial em relação ao tempo	11
Figura 3: Trajetória e impacto com o solo	11
Figura 4: Altitude em relação ao tempo	13
Figura 5: Simulação da reentrada	14
Figura 6: Simulação da reentrada	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do “Space Track”	8
Tabela 2: Definição do Objeto	10
Tabela 3: Elementos Keplerianos	10
Tabela 4: Novos Elementos Keplerianos	13
Tabela 5: Resultados	15

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no período entre março e julho de 2012 como continuação do trabalho desenvolvido pela ex-bolsista Grazielle Cunha Cardoso [1].

O número de detritos espaciais vem crescendo com o avanço da tecnologia aeroespacial e, com isto, um problema aumenta de dimensão a cada dia, a reentrada de cada detrito espacial. Como, na maioria das vezes, essas reentradas não são controladas, elas constituem um risco pequeno mas crescente para pequenas parcelas da população humana.

O estudo de como estes detritos espaciais reentram na atmosfera vem se tornando de grande importância para se poder prever: 1) onde e quando os mesmos podem cair; e 2) se constituem um risco à população local [2].

O software DRAMA (“Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis”) desenvolvido pela European Space Agency (ESA) contém algoritmos e cálculos que simulam o comportamento de detritos espaciais em órbita até seu decaimento em terra, envolvendo análise do risco apresentado para a população [3].

Para uma análise prática do software e de sua confiabilidade foi utilizado como objeto de estudo um tanque de combustível de um satélite artificial que reentrou no dia 22 de Fevereiro de 2012 e colidiu com o solo próximo a áreas habitadas no município de Anapurus, Maranhão, Brasil [4].

2. O SOFTWARE DRAMA

O software DRAMA é composto de cinco módulos de software individuais, unidos dentro de uma interface comum. Suas aplicações foram desenvolvidas visando observar diferentes aspectos do movimento de detritos espaciais, como manobras preventivas para evitar colisões, fluxos de colisão e estatísticas de risco, manobras de eliminação de detritos espaciais desorientados, reentrada de detritos espaciais e análise de risco das reentradas.

Os módulos utilizados neste trabalho são o SESAM (“Spacecraft Entry Survival Analysis Module”) e o SERAM (“Spacecraft Entry Risk Analysis Module”).

O módulo SESAM realiza cálculos baseados na aerodinâmica e aerotermodinâmica dos objetos simulando a trajetória dos mesmos na atmosfera até que se desintegram no ar ou colidam com o solo.

Como entrada de dados primeiramente é indicado uma lista de objetos com formas geométricas simples tentando reproduzir a aerodinâmica e a resistência dos objetos que compõem o corpo reentrante. Num segundo passo são fornecidos ao programa os elementos Keplerianos da órbita de partida do objeto em análise (um dos possíveis tipos de entrada). Com base nestes dados o SESAM calcula a trajetória dos objetos indicados, exibindo-as graficamente. Um resultado numérico é possível de ser obtido mas não pela interface do programa. Arquivos de texto são gerados dentro do diretório do programa com estas informações.

O módulo SERAM por sua vez, recebe como entrada os dados gerados pelo módulo SESAM e calcula o risco de impacto deste objeto em áreas povoadas.

3. O DETRITO ESPACIAL ESTUDADO

O detrito espacial utilizado como objeto de estudo deste trabalho reentrou no dia 22/02/2012 e colidiu com o solo no município de Anapurus (a 275km de São Luís), Maranhão, Brasil.

O objeto caiu muito próximo a áreas habitadas destruindo algumas árvores, oferecendo grande risco. Segundo relatos de moradores da região, o objeto colidiu com o solo aproximadamente às 6h da manhã.

O detrito espacial foi identificado como um tanque de pressurização possivelmente proveniente de um foguete Ariane, lançado pela ESA em 1997. O tanque possui 1 metro de diâmetro e massa de 30 Kg. A foto abaixo foi tirada próximo ao local do impacto.



Figura 1: Foto tirada do detrito espacial próximo ao local do impacto.Fonte: [4].

Dados da órbita do foguete do qual o tanque provavelmente proveio foram obtidos através do site www.spacetrack.org, pesquisando pela data de decaimento. O único resultado da busca pelo decaimento no dia 22/02/2012 foi o foguete ARIANE 44L R/B (Tabela 1).

Tabela 1: Dados do “Space Track”.

Country	Launch Date	Launch Site	Decay Date	Period	Incl.	Apogee	Perigee	RCS
FR	1997-04-16	FRGUI	2012-02-22	88.04	6.5	259	95	24.7289

O site fornece os seguintes elementos em duas linhas com as informações sobre a órbita:

(Decayed 2012-02-22)

1 24770U 97016C 12053.32531250 .99999999 -35294-4 92162-3 0 4397

2 24770 006.5047 279.0338 0150608 276.6912 072.9444 16.26694827179232

Com estas informações foi possível fazer uma análise de impacto do detrito.

4. ANÁLISE DO DETRITO ESPACIAL FEITA COM SOFTWARE DRAMA

Os dados obtidos anteriormente foram inseridos no software DRAMA. A definição do objeto foi feita conforme é indicado na Tabela 2:

Tabela 2: Definição do Objeto.

Name	Shape	Width/Diameter [m]	Mass [Kg]	Material
Tank	Sphere	1	30	TIAI6V4

Ou seja: uma esfera com um metro de diâmetro, com 30 Kg feita com material TIAI6V4, o qual não importa contanto que o objeto não se desintegre na sua queda, como observado no objeto de estudo.

Os elementos Keplerianos da órbita foram definidos conforme é indicado na Tabela 3:

Tabela 3: Elementos Kleperianos.

Semimajor Axis	6555.0 Km
Eccentricity	0.0150608 Km
Inclination	6.5047°
RAAN	279.0338°
Perigee Argument	276.6912°
True Anomaly	10°

Para finalizar a definição dos dados de entrada, são definidas a data e a hora do início do intervalo de análise que vai até o horário da colisão do objeto com o solo. Como o tempo entre a entrada na atmosfera e a colisão do solo é na escala de minutos, foi definido um tempo inicial como a própria hora da queda.

Na Figura 2 é exibido o gráfico da altura do detrito espacial em relação ao tempo a partir do momento de início da reentrada.

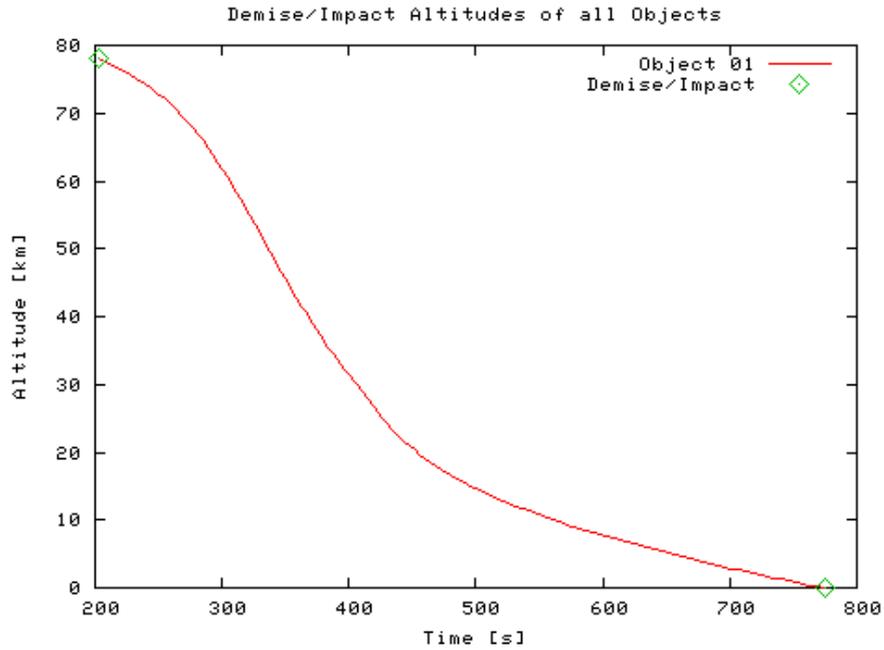


Figura 2: Altitude do detrito espacial em relação ao tempo.

O gráfico da Figura 2 evidencia o impacto com o solo. A Figura 3 simula a trajetória e local de impacto do detrito espacial.

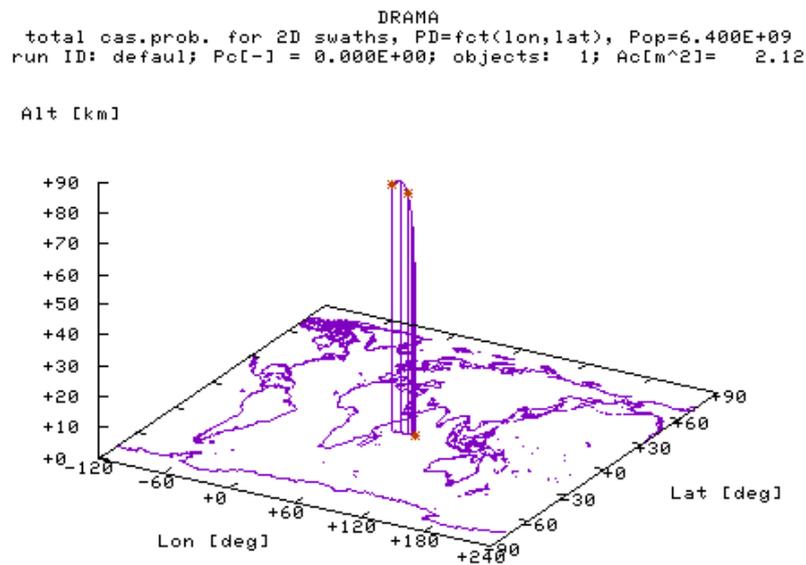


Figura 3: Trajetória e Impacto com o solo.

Este primeiro resultado obtido com o software DRAMA não foi satisfatório. Os gráficos apontam o detrito ter se chocado com o solo no Oceano Índico, dados errôneos pois de fato caiu no município de Anapurus, Maranhão, Brasil.

A partir destes dados, as informações de entrada no software foram alteradas empiricamente até que os resultados coincidissem com os dados reais.

As alterações se iniciaram pela Anomalia Verdadeira (ângulo referente ao ponto momentâneo na órbita), parâmetro que não altera a órbita referenciada pelo "SpaceTrack". Porém nenhum valor inserido rendeu resultados satisfatórios.

Considerando que possam haver erros de medição, modelagem e eventos atmosféricos aleatórios, os valores referentes à órbita, como inclinação, RAAN, argumento do perigeu e também a anomalia verdadeira foram sendo alterados para melhor conformação dos resultados simulados com os valores reais.

5. RESULTADOS

Após várias alterações nos elementos Keplerianos da órbita, um conjunto de valores inseridos no software DRAMA, conforme indicado na Tabela 4, resultou em algo mais aproximado aos valores reais.

Tabela 4: Novos Elementos Kleperianos.

Semimajor Axis	6555.0 Km
Eccentricity	0.0150608 Km
Inclination	12.7°
RAAN	279.03°
Perigee Argument	89.0°
True Anomaly	24.58°

Estes dados primeiramente mostraram que ocorre impacto com o solo conforme mostra a Figura 4:

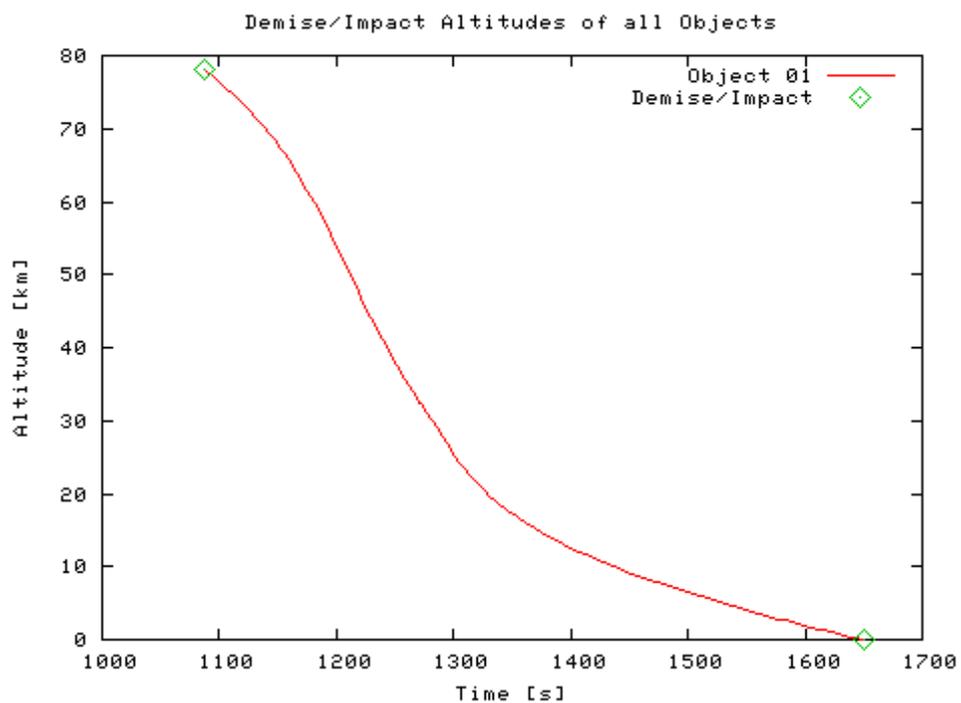


Figura 4: Altitude em relação ao tempo.

Foi analisada então a simulação de queda do detrito espacial conforme as Figuras 5 e 6:

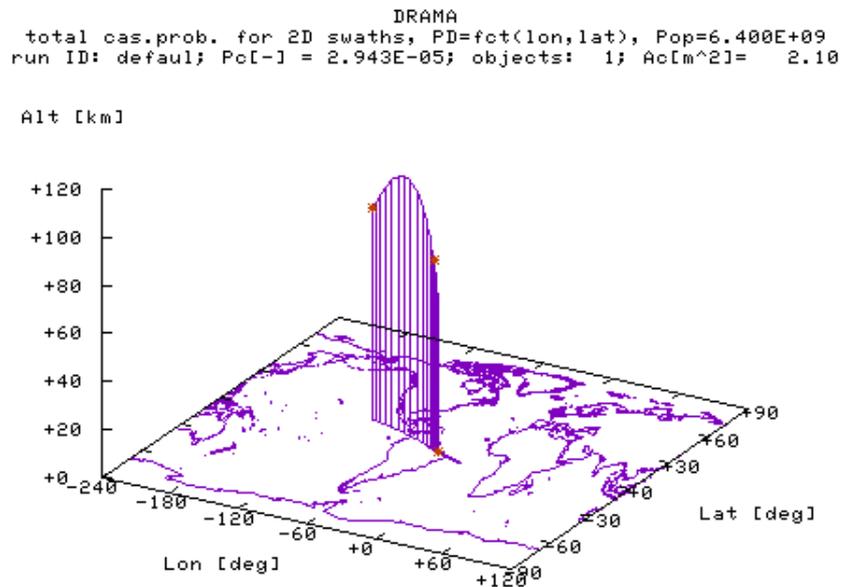


Figura 5: Simulação da Reentrada.

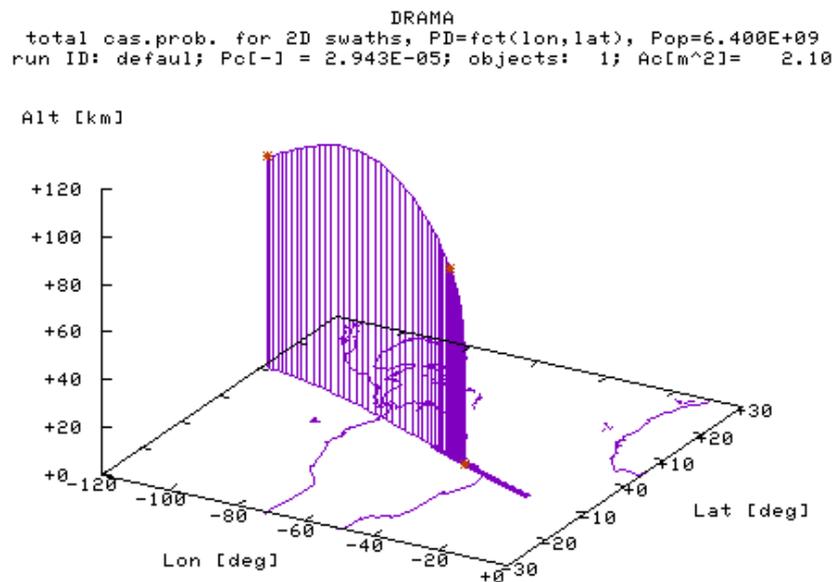


Figura 6: Simulação de Reentrada.

É possível observar claramente que a simulação a partir dos dados inseridos é fiel aos dados reais, o detrito se choca com o solo no Maranhão, Brasil.

Analisando os dados numéricos calculados pelo software, vemos uma divergência bem pequena quando comparado com os dados reais (Tabela 5).

Tabela 5: Comparação dos Resultados Simulados com os Valores Reais.

Dado	Anapurus	Resultado DRAMA	Erro
Latitude (graus)	-3.6719	-3.28794	0.384
Longitude (graus)	-43.1158	-43.1653	0.04946

Este erro nos dá um raio de aproximadamente 50Km em torno da cidade de Anapurus, o qual é um valor aceitável.

6. CONCLUSÕES

Apesar da pequena diferença entre os resultados obtidos a partir dos dados fornecidos pelo “Space Track” e dos dados obtidos empiricamente, procuramos conjecturar quais fatores podem ter influenciado nos resultados. Dentre eles, abaixo estão os principais fatores por ordem decrescente de probabilidade de terem afetado os resultados:

1 - Órbita divergente dos valores indicados pelo “Space Track”, dados desatualizados;

2 - Erros de modelagem do software DRAMA, erros no modelo aerodinâmico, erros no modelo atmosférico, etc.;

3 - Detrito espacial não proveniente do foguete Ariane, do qual foram obtidos os dados da órbita;

5 - Eventos não comuns na atmosfera durante a reentrada do objeto.

Com base nestas suposições, posteriores estudos podem ser feitos para averiguar o motivo das divergências e aprimorar o modelo de previsão de impacto de detritos espaciais, visando a segurança da população e evitando possíveis desastres.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARDOSO, G. C. **Análise e Simulação de Reentradas Atmosféricas**. Relatório Parcial de Iniciação Científica do INPE. INPE, São José dos Campos, SP, Fevereiro, 2012.
- [2] KUGA, H.K., RAO, K.R., CARRARA, V. **Introdução à Dinâmica Orbital (2ª. ed.)**. INPE, São José dos Campos, SP, 2008.
- [3] BUNTE, K., CHEESE. FRISTSCHKE, B., KLINKRAD H., KOPPENWALLNER, G., LIPS, T., MARTIN, J. C., ORTIZ, N. S. **Final Report: Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis (DRAMA) Tool**, ESA, ESOC Darmstadt, Alemanha, 2005.
- [4] **Esfera que caiu do céu e Tanque de foguete Ariane 4 ou Troton SES-4**. Cotidiano de Parnaíba, Parnaíba, PI, 25/02/2012. Disponível em <http://cotidianodeparnaiba.blogspot.com.br/2012/02/esfera-que-caiu-do-ceu-e-tanque-de.html>. Acessado em 10/Julho/2012.