

Desastres de Engenharia e a Matemática

Armando Handaya

IFSP - Guarulhos

Desastres de Engenharia e a Matemática

Armando Handaya

September 16, 2019

Abstract

Desastres de Engenharia já aconteceram com uma certa frequência sobretudo na fase de testes. É de se esperar que depois dessa fase o objeto contruído seja considerado seguro. Apesar disso elas também acontecem na fase pós-teste. Nesse texto apresentamos alguns desses desastres. São desastres grandes de engenharia, gerando grandes prejuízos como perdas humanas e financeiras. Com fundamentos matemáticos explicamos o porquê do ocorrido.

1 Introdução

À nossa volta pode-se ver as obras da engenharia. Construções imponentes, pontes grandes e elegantes, túneis gigantescos, aeronaves e satélites, etc... são as maravilhas da engenharia. São objetos contruídos frutos da tecnologia e muito estudo envolvendo uma diversidade de áreas de conhecimento. Entre eles não se pode deixar de mencionar a matemática. A matemática fazendo parte das bases da engenharia. Entretanto, apesar dela ser uma ciência exata e fundamentada por uma precisão matemática, ela é sujeita a falhas. Falhas humanas ou não, a engenharia é suscetível a desastres. Neste texto veremos alguns desses desastres e explicaremos as causas matematicamente.

2 Objetivos

Os objetivos que se pretendem alcançar neste texto são

1. Mostrar a importância da matemática como ciência base, especificamente para a Engenharia.
2. Mostrar a vulnerabilidade de projetos de engenharia, sem o devido cuidado com suas bases científicas.
3. Associar projetos de engenharia com a Matemática aplicada.

3 Metodologia

A pesquisa foi feita bibliograficamente com os fundamentos matemáticos tirados de diversas áreas, sobretudo a matemática computacional e o cálculo numérico. O texto tem servido como uma introdução à aula inicial da disciplina de Cálculo Numérico que o autor aplica para as turmas de Engenharia de Controle e Automação e também Licenciatura em Matemática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, campus de Guarulhos.

4 Desenvolvimento

4.1 Falha no Sistema antimíssil Patriot

Durante a guerra do golfo (anos 90) os EUA mantiveram uma base em Dharan na Arábia Saudita. Para a segurança da base eles usaram o sistema de defesa anti míssil Patriot (Phased Array Tracking Radar to Intercept on Target). Entretanto em 25 de fevereiro de 1991 esse sistema falhou no rastreamento de um míssil Scud iraquiano. Sem conseguir interceptá-lo esse míssil acabou por matar 28 soldados e ferir mais umas 100 pessoas. O desastre foi ocasionado por falha na representação de números em base binária. O radar do sistema digital usado no Patriot trabalha com clock de um décimo de segundo. A representação desse número $\frac{1}{10}$ na base binária é

$$0,00011001100110011001100110011...$$

portanto tem uma dízima periodica, portanto depois da vírgula tem infinitas casas, ou seja, não termina. Acontece que o Patriot trabalha com um sistema de 24 bits, portanto a representação do número em questão sofre um truncamento. Assim o relógio do sistema apresenta um ínfimo atraso na contagem do tempo que é de

$$0,00000009536743165$$

segundo a cada décimo de segundo, ou seja um atraso de 9,5 milionésimo de segundo a cada segundo. Após 100 horas de funcionamento, porém, esses ínfimos atrasos totaliza 0,34 segundos, ou mais precisamente

$$100 \cdot 3600 \cdot 0,00000009536743165 = 0,34332275$$

segundo. Considerando o míssil Scud viajando a uma velocidade de 6500 km/h esse atraso corresponde a uma distância de

$$6500 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot 0,34332275 = 619,888$$

metros. Quase 620m, ou seja, uns seis quarteirões de distância .. mais do que suficiente para sair fora do alcance do radar do Patriot.

4.2 Explosão do Foguete Ariane

Ariane 5 é um gigantesco foguete construído pela *European Space Agency* para levar satélites de até três toneladas à sua órbita. Ao custo de 7 bilhões de dólares levou 10 anos para ser construído. No dia do lançamento em 4 de junho de 1996 na base de Kourou, Guiana Francesa, explodiu 40 segundos após ser lançado. À altura de 4 km o mecanismo de auto-destruição terminou por destruir completamente esse caro artefato e suas cargas. A bordo desse foguete estavam 4 satélites para uso científico, que custaram 500 milhões de dólares. Um prejuízo enorme. A autodestruição foi acionada automaticamente após as forças aerodinâmicas deram arranque aos boosters do foguete. O foguete estava fazendo uma correção abrupta de percurso, que não era necessária, para compensar uma curva errada, que não havia ocorrido. O computador de bordo pensou erroneamente que o foguete precisava de uma mudança de rumo por causa dos números provenientes do sistema de orientação inercial. Esse dispositivo usa giroscópios e acelerômetro para rastrear o movimento. Esses números na verdade eram uma mensagem de erro de diagnóstico. O sistema de computação do foguete tentou converter um dado que corresponde à velocidade lateral do foguete, número em formato de ponto flutuante de 64 bits, para outro formato: inteiro de 16 bits. O número era muito grande e ocorreu o erro de estouro *overflow*, extrapolando a capacidade máxima de representação do sistema desejado. O maior inteiro que pode ser representado como *signed integer*, ou seja, inteiro com sinal é de 32767 pois dos

$$2^{16} = 65536$$

inteiros possíveis, a metade é para números negativos e a outra metade para o zero e os positivos.

4.3 Paralisia do Navio Yorktown

Yorktown era um navio de guerra dos Estados Unidos. Pela primeira vez com tecnologia embarcada de Smart Ship, o qual permitia reduzir a tripulação. Em 21 de setembro de 1997 durante manobras de treinamento na costa de Cape Charles, estado de Virgínia, o sistema de propulsão desse navio desativou-se por quase três horas, devido a um erro de divisão por zero em um aplicativo de banco de dados que se propagava pelo sistema de controle do navio. O Yorktown havia servido com sucesso a Marinha dos EUA desde 1984 sem grandes incidentes em suas várias operações de combate. Mas como parte de um programa de modernização de TI chamado Smart Ship, os seus sistemas de controle precisavam ser alterados para poder utilizar uma rede de computadores rodando o Windows NT.

Naquele dia fatídico um membro da tripulação tentou solucionar um problema de uma válvula de combustível que estava fechada, mas para o Sistema de Controle da Smart Ship ele estava aberto. O técnico tentou calibrar redefinindo digitalmente a válvula de combustível inserindo um valor 0 para uma das propriedades dos componentes no Gerenciador de banco de dados remoto RDM. O programa tentou executar uma operação de divisão pela propriedade

da válvula; um erro aritmético de divisão por zero foi executado e o programa RDM travou. Como outros sistemas Smart Ship dependiam da disponibilidade de RDM na rede, esses outros componentes, incluindo os que controlam o motor e as máquinas de propulsão, começaram a falhar em uma sequência dominó até que o navio parasse completamente na água. A tripulação conseguiu solucionar o problema e reiniciar os sistemas do navio após duas horas e quarenta e cinco minutos. O navio Yorktown voltou à base em Norfolk, Virgínia.

4.4 Destruição do Sonda Mars Climate Orbiter

O Mars Climate Orbiter (MCO), construído ao custo de US\$ 125 milhões, era uma sonda espacial de 338 kg lançada pela NASA para estudar o clima marciano, a atmosfera marciana e as mudanças de superfície. Colher dados atmosféricos para entender a variação climática do planeta. Foi lançado em 11 de dezembro de 1998 e levou 286 dias para chegar até Marte. Em 23 de setembro de 1999 o motor foi acionado para estabelecer uma órbita em torno do Marte. Mas um erro de navegação fez com que a MCO chegasse a apenas 60 km, 100 km mais perto do que o planejado e 25 km abaixo do nível de segurança. A razão do erro foi unidade de medidas usada. A equipe de navegação do Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) usou o sistema métrico de milímetros e metros em seus cálculos, enquanto a Lockheed Martin Astronautics em Denver, Colorado, que projetou e construiu a espaçonave, forneceu dados cruciais no sistema inglês de polegadas, pés e libras.

Durante a fase de projeto, os engenheiros de propulsão da Lockheed Martin (LMA) expressaram força em libras. Os engenheiros do Laboratório de Propulsão a Jato da NASA presumiram que a conversão para o sistema SI havia sido feita. Na verdade a LMA estava usando unidades de medida como o restante da indústria de lançamentos dos EUA, em unidades britânicas. O combinado, porém, era de converter suas medidas em sistema métrica de unidades. Esse acidente de navegação empurrou a sonda perigosamente para perto da atmosfera do planeta, onde provavelmente se queimou e se partiu, matando a missão no dia em que os engenheiros esperavam celebrar a entrada da nave na órbita de Marte. A falha em conversão de unidades de medida gerou assim um tremendo prejuízo.

A unidade britânica para aceleração é *pé por segundo ao quadrado* (ft/s^2), enquanto que a unidade no sistema internacional SI é *metros por segundo ao quadrado* (m/s^2). Se um *pé* mede 0,3048 *m* então uma aceleração de 1 ft/s^2 equivale a

$$1 \text{ ft/s}^2 = 0,3048 \text{ m/s}^2.$$

Portanto no sistema SI o valor é mais ou menos 30% do valor em unidade britânica. Se a sonda imprimir uma aceleração de 1 ft/s^2 e foi pensado erroneamente como 1 m/s^2 ela viajou três vezes mais rápida do que deveria. Assim o artefato de engenharia sofisticado entrou apressadamente em órbita marciano sofrendo com atrito gravitacional, queimando-se e quebrando-se em pedaços ao fim de 10 meses de viagem.

5 Considerações Finais

Neste texto apresentamos um resumo do que se pretende apresentar na SEMCITEC 2019. Desastres de Engenharia não deve acontecer a todo momento mas os que já aconteceram deve servir de lição para que, no futuro, não sejam cometidas os mesmos erros. Damos especial atenção às causas do erro fundamentadas matematicamente. Assim esperamos que este texto sirva também de instrumento para a aplicação da matemática no dia a dia do cidadão e do engenheiro, mais especificamente.

6 Referências Bibliográficas

1. ARENALES, Selma; DAREZZO, Artur. Cálculo numérico: aprendizagem com apoio de software. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
2. FRANCO, Neide Maria Bertoldi. Cálculo numérico. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
3. PAZ, Alvaro Puga. Curso de cálculo numérico. 2a.ed. São Paulo: LCTE, 2012.
4. <http://www-users.math.umn.edu/~arnold/disasters/patriot.html> . Acessado em 13 de setembro de 2019
5. <http://www-users.math.umn.edu/~arnold/disasters/ariane.html> . Acessado em 13 de setembro de 2019
6. https://medium.com/@bishr_tabbaa/when-smart-ships-divide-by-zero-uss-yorktown-4e53837f75b2 . Acessado em 13 de setembro de 2019.
7. <https://www.simscale.com/blog/2017/12/nasa-mars-climate-orbiter-metric/> . Acessado em 13 de setembro de 2019