

## - Confiabilidade: Ensaios de Lançamento de Mísseis -

Berquó, Jolan Eduardo – Eng. Eletrônico (ITA).  
 Certificador de Produto Aeroespacial (DCTA/IFI)  
 Representante Governamental da Garantia da Qualidade – RGQ (DCTA/IFI)  
[jberquo@dcabr.org.br](mailto:jberquo@dcabr.org.br)

MSC 18- 18 SET 2012

Quando uma empresa desenvolve um sistema, ela tem de fazer ensaios, entre os quais os chamados ensaios funcionais, para verificar se o mesmo atende às especificações de projeto, que decorrem da criatividade da empresa que o concebeu e/ou dos requisitos do cliente, como o Comando da Aeronáutica do Brasil, em suas aquisições, ou de uma Autoridade civil, como a ANAC, nossa Autoridade, na área da aviação civil.

E ensaios demandam muito dinheiro, sendo um dos fortes componentes do custo de desenvolvimento do sistema.

Sabemos muito bem disso, em se tratando de aeronaves e equipamentos.

Todavia, quando se trata de mísseis, o discurso é outro. No ensaio funcional desses sistemas, não tem outro jeito, senão lançá-los, para verificar se conseguem cumprir a missão, de acordo com o grau de acerto esperado. Aí, pode ser gasta uma “grana preta”.

Em geral, são ensaiados vários protótipos, e os acertos de projeto vão sendo feitos, após cada tentativa de acerto e erro, mesmo se tivermos um projeto teoricamente muito bem fundamentado.

Antes de realizar esses ensaios, é imperioso que se tenha uma certa dose de previsão de sucessos e de insucessos, que é discutida entre cliente e empresa. A questão de tempo e custos entra cuidadosamente nessa discussão.

O Gerente do Programa de desenvolvimento de tal sistema, do lado do cliente, precisa ter essa informação bem fundamentada, já que ele terá que estar sempre atualizando as autoridades que o colocaram nessa função.

Mas para ter essa previsão, é preciso ter um indispensável dado teórico, tão bem calculado quanto possível, o da probabilidade do míssil cumprir sua missão em cada lançamento.

A partir daí, pode-se ter uma previsão probabilística de sucessos e insucessos nos lançamentos de ensaios, num universo de  $n$  lançamentos, com  $n$  estabelecido em comum acordo entre cliente e empresa.

É a esse momento que nos referimos neste MSC, ou seja, vamos tratar de como calcular a probabilidade de sucessos e insucessos em  $n$  lançamentos com uma probabilidade de sucesso determinada teoricamente para cada lançamento.

Já tivemos a oportunidade de participar de discussões a respeito desses ensaios. Desse modo, vamos apresentar a seguir como tratamos esse assunto, quando atuávamos como coordenador de certificação de sistemas no DCTA/IFI.

Agora, aguentem um pouco de teoria matemática.

Os ensaios de mísseis podem ser tratados como eventos discretos, ou seja, em cada lançamento há dois resultados possíveis: sucesso e insucesso.

A distribuição de probabilidades mais conveniente para tratar desse tipo de evento é a distribuição discreta denominada “Distribuição de Probabilidades Binomial”. Isso porque esses ensaios atendem às condições necessárias e suficientes para o emprego dessa distribuição, ou seja:

- cada lançamento é independente dos lançamentos anteriores (a ocorrência de resultados anteriores não influi no resultado do lançamento seguinte);
- cada resultado é aleatório, isto é, não é conhecido a priori; e
- a probabilidade de sucesso em cada lançamento é a mesma (constante).

Considerem então uma série de  $n$  lançamentos independentes, em um programa de ensaios.

Desde que o número de lançamentos é um número inteiro não negativo, o conjunto dos resultados possíveis, o chamado Espaço Amostral, é dado por:

$$S = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}^1$$

<sup>1</sup> A letra “S” usada para designar Espaço Amostral vem do inglês *Space*.

A distribuição binomial é definida pela expressão:

$$F(x) = \Pr[X=x] = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \text{ com } x = 0, 1, 2, 3, \dots, n.$$

Ou 
$$\Pr[X=x] = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{(n-x)} \quad (2)$$

Onde  $x$  é o número exato esperado de sucessos em  $n$  lançamentos;  $p$  é a probabilidade de sucessos em cada lançamento e  $q$ , a respectiva probabilidade de insucessos. Portanto,  $q=1-p$ .

A expressão 
$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} \quad (3)$$

nos dá o número possível de combinações do evento  $x$  (sucessos) em  $n$  lançamentos. Por serem combinações, lembramos que (1, 2, 3) é o mesmo que (2, 1, 3), (1, 3, 2), etc.

Se quisermos, por exemplo, saber qual é a probabilidade de termos exatamente 3 sucessos em 5 lançamentos, escrevemos:

$$F(3) = \Pr[X=3] = \frac{5!}{3!(5-3)!} p^3 q^2 = 1,46 \times 10^{-2}.$$

Da teoria do cálculo das probabilidades, sabemos que a probabilidade de ocorrer um ou outro resultado de todos os possíveis resultados é 1, ou seja, é a soma da probabilidade de todos os resultados possíveis. Isso nos parece claro porque com certeza um dos resultados vai acontecer.

Então, a probabilidade de ocorrer qualquer resultado do espaço amostral  $S$  é 1.

Podemos então escrever:

$$\Pr[S] = \sum_{x=0}^n \Pr[x] = \Pr[0] + \Pr[1] + \Pr[2] + \dots + \Pr[n] = 1. \quad (4)$$

Essa expressão pode ser representada pelo chamado Binômio de Newton, ou seja:

$$(p+q)^n = C_1 p^n + C_2 p^{n-1} q + C_3 p^{n-2} q^2 + C_4 p^{n-3} q^3 \dots C_n p q^{(n-1)} + C_{n+1} q^n = 1. \quad (5)$$

Sendo os coeficientes calculados pela expressão (3). Esse cálculo mostra que  $C_1 = C_2 = 1$ , qualquer que seja  $n$ .

Digamos que vamos realizar uma campanha de 4 lançamentos. Neste caso, temos:

$$(p+q) = p^4 + 4p^3q + 6p^2q^2 + 4pq^3 + q^4.$$

Suponhamos que temos  $p=0,9$  (estabelecido teoricamente).

Qual seria a probabilidade de ter exatamente 3 sucessos?

Temos:  $P(X=3) = 4p^3q^2 = 2,92 \times 10^{-2}$ .

E se quiséssemos ter até 2 sucessos?

Aí, entra uma distribuição acumulada, ou seja:

$$\Pr[X \leq 2] = \Pr[0] + \Pr[1] + \Pr[2] = 1 - \{\Pr[3] + \Pr[4] + \Pr[5] + \Pr[6]\}.$$

Tem-se:  $\Pr[X \leq 2] = 1 - (p^6 + 6p^5q + 15p^4q^2) = 9,83 \times 10^{-1}$ .

Dados como esses vão ser objeto de discussão entre cliente e empresa.

Existem vários pontos nessas discussões. Um deles, por exemplo, é a questão do cálculo de confiabilidade da missão. É preciso muito cuidado com esse cálculo porque esse valor é de fundamental importância no emprego das expressões citadas. Valores muito distantes da realidade podem inutilizar uma campanha de ensaios.

Gostaríamos de acrescentar aqui que os coeficientes do Binômio de Newton podem ser obtidos diretamente do chamado Triângulo de Pascal<sup>2</sup>, conforme a Figura 1.

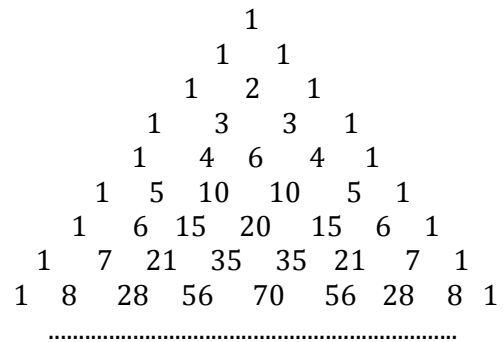


Fig. 1 - Triângulo de Pascal

O segundo algarismo de cada linha dá o valor de  $n$ .

Se, por exemplo,  $n = 6$ , teremos, a partir da sétima linha:

$$(p+q)^6 = p^6 + 6p^5q + 15p^4q^2 + 20p^3q^3 + 15p^2q^4 + 6pq^5 + q^6 = 1.$$

Bem, encerramos por aqui.

Até a próxima.

<sup>2</sup> Pascal era francês, nascido em Clermont-Ferrand, em 1623. Morreu em 1662, praticamente na miséria, e dizem alguns: com sensível perturbação mental.

**Referências:**

- (1) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION NUREG-0492: Fault Tree Handbook. EUA. 1981.
- (2) ERICSON II, Clifton A. Hazard Analysis Techniques for System Safety. EUA, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- (3) MODARRES, M. What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis. Cincinnati - Ohio (EUA): Marcel Dekker Inc., 1993.