

## Emprego de Fault Tree Analysis em Sistemas Complexos

- *Certificador de produto Aeroespacial (DCTA/IFI)*
- *Representante Governamental da Garantia da Qualidade- RGQ (DCTA/IFI)*
- *Pós-graduado em Engenharia de Confiabilidade e em Engenharia de Segurança de Sistemas (ITA)*
- *Especialização em Engenharia e Análise de Sistemas (Itália)*
- *Participação no programa conjunto (Brasil-Itália) de desenvolvimento da aeronave militar caça-bombardeiro AM-X*
- *Experiência de uma década como engenheiro responsável pela manutenção "off aircraft" de sistemas eletrônicos e instrumentos de aeronaves.*

[jberquo@dcabr.org.br](mailto:jberquo@dcabr.org.br) / [jberquo@gmail.com](mailto:jberquo@gmail.com)

MSC 72- 13MAI2019

No último parágrafo do MSC 72, dissemos que a técnica dos conjuntos de corte mínimos (CCM's) é também aplicável à ferramenta FTA (Fault Tree Analysis). De fato, quando estamos diante de sistemas complexos com as unidades tendo vários modos de falha, é complicado usar o Diagrama de Blocos de Confiabilidade ("Reliability Blocks Diagrams" - RBD), sendo mais prudente adotar a técnica dos CCM's, na FTA, ou na Análise de Árvore de Sucessos ("Success Tree Analysis" - STA)<sup>1</sup>. Ademais, essas duas ferramentas nos permite incluir também o papel do ser humano no sistema.

De nossas considerações já apresentadas, de certa forma exaustiva, em anteriores MSC, sabemos que a FTA (Fault Tree Analysis or Assessment) é uma análise dedutiva, ou seja, postula-se um evento indesejável para um sistema, denominado Evento de Topo, deduzindo-se daí as possíveis causas desse evento. Costuma-se dizer que se trata do método dos detetives, os quais partem de um resultado indesejado (assassinato, por exemplo) e buscam os culpados (causas).

Pois bem, vamos tratar neste MSC da FTA, utilizando a metodologia dos *Cut Sets*, apresentada no MSC 72. Começemos com o diagrama de blocos abaixo que foi tratado na Fig.1 do MSC 72. Trata-se de um sistema simples série-paralelo.

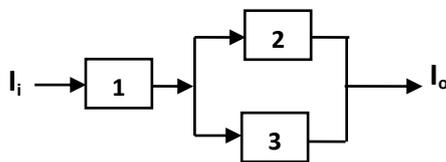


Fig. 1 – Exemplo de Sistema série-paralelo

A corrente  $I_i$  é fornecida à unidade 1, que a processa e a encaminha às unidades 2 e 3, idênticas<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> A operação de um sistema pode ser considerada sob dois aspectos opostos: o das várias maneiras de falha total do sistema, e aí falamos da FTA, e o das várias maneiras de sucesso total do sistema, e aí falamos da STA. Esta análise, no entanto, não é muito utilizada.

<sup>2</sup> Poderia ser um circuito com um interruptor (unidade 1) e duas lâmpadas (unidades 2 e 3).

Temos os seguintes conjuntos de corte (*cut sets*):  $C_1 = (1)$  e  $C_2 = (2, 3)$ . Lembremos que um *cut set* é um conjunto de unidades do sistema em análise que, se falharem, levam o sistema a falhar como um todo.

FTA para o sistema, considerando os *cut sets* do sistema, é apresentada na Fig. 2.

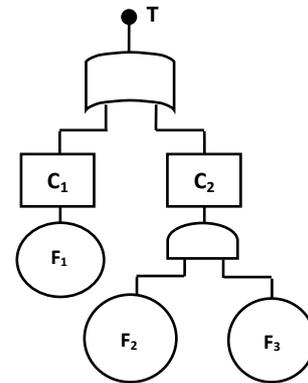


Fig. 2 – FTA do sistema da Fig. 1

Observem que temos uma porta "Ou", de onde emerge o evento de topo T, com as entradas  $C_1$ , que corresponde à falha  $F_1$  da unidade 1, e a entrada  $C_2$ , que emerge da porta "E", cujas entradas correspondem às falhas  $F_1$  e  $F_2$  das unidades 2 e 3.

De acordo com a Álgebra de Boole:

$$T = C_1 \cup C_2$$

$$C_1 = F_1$$

$C_2 = F_2, F_3$ . Por outro lado, conforme vimos no MSC 72, podemos escrever:

$$\Pr(T) = \Pr(C_1 \cup C_2) = \Pr(C_1) + \Pr(C_2) \quad (1)$$

isso porque  $C_1$  e  $C_2$  são disjuntos, i.e, não têm unidades comuns.

Sendo  $\Pr(T)$  a falibilidade (ou inconfiabilidade)  $F_S$  do sistema, que é dada por  $F = \lambda t$ , quando  $t$  é pequeno, o que ocorre se admitirmos, por exemplo,  $t=1h$ . Desse modo, podemos escrever:

$$F_S = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \lambda_3.$$

Admitamos que  $\lambda_1 = 10^{-3}$  e  $\lambda_2 = \lambda_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ . Segue que

$$F_S = 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$F_S = 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,005$$

Se  $R_S = 1 - F_S$ , resulta que  $R_S = 1 - 0,005 = 0,995$

Agora, vamos considerar o sistema da Fig. 2.

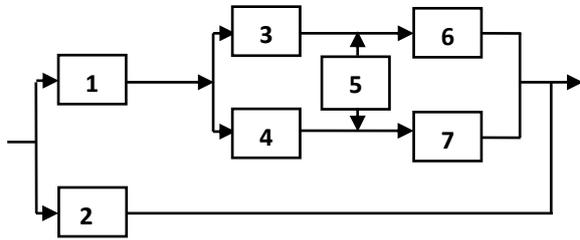


Fig. 3 – Exemplo de Sistema Complexo

Agora temos um sistema complexo. Vamos resolvê-lo também por meio de uma FTA, considerando os conjuntos de corte mínimos (CCM). Um CCM é o menor conjunto de unidades para garantir uma interrupção do fluxo até a saída. Conforme vimos no MSC 72, os CCM's do sistema acima são os conjuntos: (1, 2), (3, 4, 2) e (6, 7, 2).

A FTA relativa ao sistema está apresentada na Fig.4.

Notemos que os CCM's não são disjuntos porque a unidade 2 está em todos eles. Desta maneira, rigorosamente devemos escrever:

$$F_S = \Pr(T) = \Pr(C_1 \cup C_2 \cup C_3) - \Pr(C_1 \cap C_2 \cap C_3) = \Pr(C_1) + \Pr(C_2) + \Pr(C_3) - \Pr(C_1 \cdot C_2 \cdot C_3) \quad (2)$$

Temos  $C_1 = F_1 \cdot F_2$ ;  $C_2 = F_3 \cdot F_4 \cdot F_2$ ;  $C_3 = F_6 \cdot F_7 \cdot F_2$ .

Substituindo na expressão (2), obtemos:

$$F_S = \Pr(T) = \Pr(F_1 \cdot F_2) + \Pr(F_3 \cdot F_4 \cdot F_2) + \Pr(F_6 \cdot F_7 \cdot F_2) - \Pr(F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_2 \cdot F_6 \cdot F_7 \cdot F_2), \text{ ou seja:}$$

$$F_S = \Pr(T) = \Pr(F_1 \cdot F_2) + \Pr(F_3 \cdot F_4 \cdot F_2) + \Pr(F_6 \cdot F_7 \cdot F_2) - \Pr(F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_6 \cdot F_7) \quad (3)$$

Observemos que na (3)  $F_2$  só aparece uma vez no subtraendo. De fato, de acordo com a propriedade *idempotent* da Álgebra de Boole,  $F_2 \cap F_2 \cap F_2 \cap \dots = F_2 \cdot F_2 \cdot F_2 \dots = F_2$ .

Para simplificar as operações da expressão (3), vamos considerar que o tempo seja pequeno, qualquer coisa como  $t=1h$ , da mesma forma que fizemos no exemplo anterior. Desse modo, temos a expressão  $F = \lambda$ .

portanto, a expressão (3) fica da seguinte forma:

$$F_S = (\lambda_1 \cdot \lambda_2 + \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_2 + \lambda_6 \cdot \lambda_7 \cdot \lambda_2) - (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_6 \cdot \lambda_7)$$

Adicionalmente, suponhamos que  $\lambda_1 = 10^{-3}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_4 = 10^{-4}$ , e  $\lambda_6 = \lambda_7 = 10^{-2}$ .

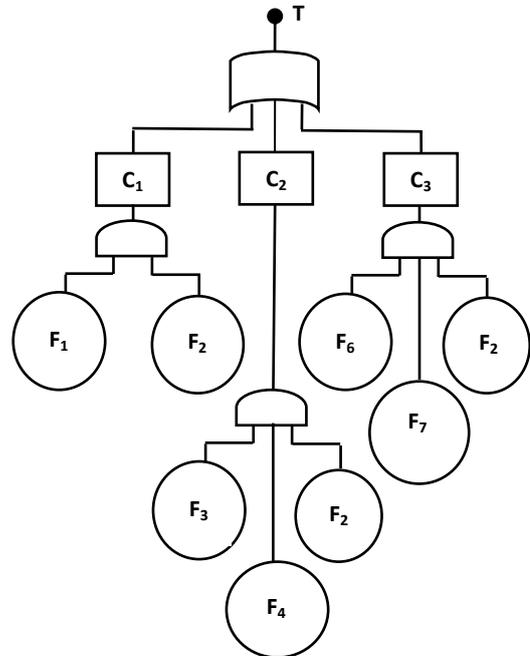


Fig. 4 – FTA do sistema da Fig.3

As três primeiras parcelas nos dão o valor  $2,2 \cdot 10^{-6}$ , e o subtraendo,  $4 \cdot 10^{-16}$ , ou seja, neste contexto esse subtraendo é praticamente "0". Portanto, podemos afirmar que

$$F_S = 2,2 \cdot 10^{-6}$$

Tendo em conta que  $R + F = 1$ , vem que

$$R_S = 1 - F_S = 1 - 2,2 \cdot 10^{-6} = 1 - 0,0000022 \therefore$$

$$\therefore R_S = 0,999$$

Para finalizar, é importante assinalar que o subtraendo na equação (2) em geral é muito pequeno, o que nos permite, amiúde, considerar só as parcelas da soma, no caso  $\Pr(C_1) + \Pr(C_2) + \Pr(C_3)$ .

Até o próximo MSC.

Referências:

1. O'Connor, Patrick D. T., *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, Inglaterra.
2. Modarres M., *Reliability and Risk Analysis*, Marcel Dekker, Inc., 1.993, NY (EUA).
3. Shooman, M.L., *Probabilistic Reliability: An Engineering Approach*, 2a. Ed., Kreiger, 1.990, Melbourne.