

## Um modelo multi-critério para gestão da confiabilidade de um sistema reparável

**Sérgio Assunção Monteiro**  
*Convergência Latina*  
sergio.monteiro@conv.com.br

**Leizer Lima Pinto**  
*UFG*  
leizer@inf.ufg.br

**Alexandre Donato**  
*Convergência Latina*  
alexandre.donato@conv.com.br

**Nelson Maculan**  
*UFRJ/COPPE*  
maculan@cos.ufrj.br

**Keywords:** otimização combinatória multi-critério, confiabilidade e manutenção.

### Resumo

Dada uma árvore de análise de modos de falha com um custo de correção e um custo, ou dificuldade, de detecção associados a cada modo de falha em sua base, neste trabalho é apresentado um algoritmo tri-critério que prioriza os modos de falha com maior impacto no sistema sob os aspectos de custo de correção, dificuldade na identificação da falha e contextualização lógica na estrutura do sistema.

### Abstract

Given a failure modes analysis tree with a cost of correction and a cost or difficulty of detection associated with each failure mode in its base, this paper presents an algorithm tri-criteria that prioritizes the failure modes with the greatest impact on system under the aspects of cost of correction, difficulty in identify of the failure and the logical context in the structure of the system.

## 1 Introdução

O processo de manutenção em sistemas complexos com alto valor agregado tem uma grande importância no sentido de garantir a disponibilidade do sistema. Esta disponibilidade está associada a confiabilidade do sistema, e quanto menos confiável, maior a chance de ocorrência de paradas desnecessárias (por exemplo, paradas corretivas). Estas paradas são indesejadas, principalmente, devido ao custo não planejado que elas demandam.

Um sistema possui diversos itens, denominados de componentes, que estão interconectados e interagem uns com os outros através do desempenho de funções específicas, para

que seja realizado um determinado trabalho. Estes componentes estão expostos de forma diferenciada a possíveis falhas que podem surgir. Neste trabalho a exposição a falhas é tratada sob dois aspectos:

- exposição intrínseca: está relacionada aos processos de fabricação, de montagem e desmontagem e nas interconexões entre os componentes que formam o sistema, que podem ser em série ou em paralelo;
- exposição extrínseca ou contextual: está associada à ocorrência de falhas decorrentes de fatores externos, como, por exemplo: desgaste dos materiais e condições de operação.

A correta compreensão dos fatores que influenciam em cada uma destas categorias de exposição a falhas, permite desenvolver priorizações para determinar quais são as decisões mais eficientes a serem tomadas para se fazer a gestão da saúde de componentes do sistema.

Os fatores de exposição intrínseca são caracterizados por uma árvore de análise de modos de falha (FTA) em que os nós representam as conexões entre os efeitos que caracterizam as falhas. Os fatores de exposição extrínseca são caracterizados através dos pesos dos nós que são obtidos pelas ocorrências históricas destes efeitos condicionados a determinadas falhas.

Uma revisão de diversos modelos quantitativos e qualitativos para a detecção de falhas, tais como modelos causais e de hierarquia de abstração, que tem como principal desvantagem a geração de soluções espúrias, é apresentado em Venkatasubramanian et al (2003). Em Oliveira et al (2010), propõe-se uma metodologia de Mapeamento de Falhas que integra diferentes abordagens que se complementam, aproveitando-se o potencial e o benefício de cada técnica para análise e controle de falhas. Em Ferreira et al (2010), é apresentado um modelo baseado em riscos competitivos e processo de renovação generalizado que tem o objetivo de estudar o impacto das falhas críticas, manutenção preventiva e tipo de reparo na confiabilidade de um sistema. Em Firmino e Droguett (2006), é proposta uma maneira de tratar a eficiência computacional e precisão do cálculo da probabilidade de ocorrência do evento topo da árvore através da remoção prévia das redundâncias e da subsequente aplicação de algoritmos recursivos. Em Adhikarya et al (2012), é apresentado um estudo da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de uma planta térmica, evidenciando a necessidade de uma avaliação multi-critério de um sistema complexo e as conseqüentes ações necessárias, com impacto em manutenções preventivas, para se manter a produção e custo da planta dentro de patamares aceitáveis. Em Silveira e Silva (2008), é apresentado um modelo para o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento, para apoiar o diagnóstico de falhas em processos de manufatura de uma indústria automotiva. Em Barabady (2005), é apresentado um modelo para encontrar medidas de importância relacionadas a criticidade de sistemas que são inspecionados e têm manutenções preventivas periodicamente. Neste trabalho, é feito, ainda, um estudo de caso para uma mina de bauxita em Jajarm no Irã. Em Scarf (2007), é apresentado um método para determinar a política de manutenção apropriada, baseada na avaliação das condições de um determinado componente em um determinado intervalo de tempo. Em Monteiro et al (2011), é apresentado um modelo de otimização para planejamento de paradas de manutenção que utiliza como uma de suas entradas uma função que estima a confiabilidade de um sistema na janela de tempo  $t + 1$

com dependência de uma escolha feita na janela de tempo  $t$ . Em SAE ARP4761 (1996), são apresentadas diversas metodologias complementares para modelar os possíveis riscos a que sistemas complexos podem estar expostos e quais ações devem ser tomadas, caso seja necessário. Estes modelos incorporam o conhecimento dos sistemas tanto do ponto de vista do fabricante, como do ponto de vista do especialista. Por fim, em Sahner e Trivedi (1987), é apresentado um modelo baseado na modelagem técnica, através de grafos dirigidos e acíclicos para a análise estocástica de sistemas que contenham concorrência.

Neste trabalho apresentamos um algoritmo de rotulação multi-critério para a obtenção dos modos de falha mais críticos de uma FTA com relação aos custo de correção, dificuldade de detecção e a contextualização estrutural hierárquica. Na próxima seção, definimos, formalmente, o problema que estamos interessados neste trabalho. Na seção 3 apresentamos um algoritmo para o problema, com um exemplo de funcionamento do mesmo na seção seguinte. Nas seções 5 e 6 apresentamos, respectivamente, resultados computacionais e conclusões.

## 2 O Problema

Considere uma FTA com  $h$  níveis, onde o nível 1 contém apenas o nó raiz e o nível  $h$  contém apenas nós folhas. Sejam  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  o conjunto de todos os nós da FTA,  $N_k$  o conjunto de nós no nível  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, h$ , e  $F_j$  o número de filhos de  $j \in N$ , denominados por  $f_j^1, f_j^2, \dots, f_j^{F_j}$ . Temos que  $F_j = 0$  implica que  $j$  é um nó folha, e vice-versa. Para cada  $j \in N$  tal que  $F_j \neq 0$ , seja  $P_j$  a porta que liga  $j$  aos seus filhos, onde  $P_j = 0$  indica uma porta OU e  $P_j = 1$  uma porta E. Além disso, para cada nó folha  $j \in N$  associamos dois valores reais,  $c_j$  e  $d_j$ , que representam o custo para fazer uma correção no modo de falha  $j$  e o custo para detectar que ocorreu uma falha em  $j$ , respectivamente.

Dizemos que um conjunto de nós folhas  $s \subset N$  é uma *solução* quando a falha simultânea destes nós implica na falha do nó raiz da FTA, isto é, implica em uma parada total do sistema. Além disso, uma solução  $s$  é dita *solução viável* quando não existe outra solução  $\bar{s}$ , tal que  $\bar{s} \subset s$ .

O vetor  $f(s) = [f_1(s), f_2(s), f_3(s)]$ , onde  $f_1(s) = \sum_{j \in s} c_j$ ,  $f_2(s) = \sum_{j \in s} d_j$  e  $f_3(s) = |s|$  é denominado *vetor objetivo* associado a solução viável  $s$ . Observamos que  $f_1(s)$  indica o custo total de correção associado a falha  $s$ , quanto maior este valor mais crítica é a solução  $s$  para o sistema. A mesma observação vale para  $f_2$  com relação ao custo de detecção de falha. Para analisar  $f_3(s)$  consideremos, por exemplo, o caso em que  $|s|$  é mínimo, isto é,  $|s| = 1$ . Neste caso, temos que a falha de um único modo de falha implicará na falha do sistema, o que também é muito crítico. Ou seja, com relação a  $f_3$ , quanto menor o número de elementos em  $s$  mais crítica é a solução. Portanto, nosso objetivo aqui consiste em encontrar as soluções mais críticas para o sistema com relação a estas três medidas.

Considerando  $S$  o conjunto de todas as soluções viáveis, neste trabalho estamos interessados no seguinte problema de otimização combinatória tri-critério:

$$\begin{aligned} & \text{maximizar} && f_i(s), \quad i = 1, 2 \\ & \text{minimizar} && f_3(s) \\ & \text{sujeito a :} && s \in S. \end{aligned}$$

Uma solução  $s \in S$  *domina* outra solução  $\bar{s} \in S$  quando  $f_i(s) \geq f_i(\bar{s})$ ,  $i = 1, 2$ , e  $f_3(s) \leq f_3(\bar{s})$  com  $f(s) \neq f(\bar{s})$ . Duas soluções  $s, \bar{s} \in S$  são *equivalentes* quando  $f(s) = f(\bar{s})$ . Dizemos que  $s \in S$  é um *Pareto-ótimo* quando não é dominada por nenhuma outra solução viável. Um conjunto de soluções Pareto-ótimas  $S^* \subseteq S$  é dito um *conjunto mínimo completo* quando para qualquer par de soluções,  $s, \bar{s} \in S^*$ , temos  $f(s) \neq f(\bar{s})$  e para qualquer Pareto-ótimo  $s \in S$  existe  $s^* \in S^*$  tal que  $f(s^*) = f(s)$ .

Na próxima seção apresentamos um algoritmo para a obtenção de um conjunto mínimo completo de soluções Pareto-ótimas para o problema definido acima.

### 3 Um algoritmo de rotulação

O algoritmo consiste em gerar e propagar, por níveis, marcas pelos nós da FTA. Ele começa pelo penúltimo nível da árvore, onde temos que os nós que não são folhas contêm apenas filhos que são folhas. Para estes nós, marcas são geradas através dos custos associados aos seus filhos. Em seguida, as marcas são propagadas pelos nós dos níveis superiores até chegar a raiz da FTA. Porém, antes de propagar uma marca, é realizado um teste de dominância. A marca apenas se propaga se não for dominada por nenhuma outra marca já existente. Além disso, as marcas que são dominadas pela nova marca são eliminadas.

Uma marca associada a um nó  $j$  é composta por um conjunto de nós folhas, NOS, e pelos valores objetivo  $f_1(\text{NOS})$ ,  $f_2(\text{NOS})$  e  $f_3(\text{NOS})$ , onde NOS é formado por descendentes de  $j$  na árvore tal que a falha destes nós levam a falha de  $j$ . No algoritmo utilizamos uma estrutura de dados, denominada por  $L$ , que contém todas as marcas geradas e manipuladas durante a execução. A lista de marcas para o nó  $j$  é dada por  $L_j$  e a  $k$ -ésima marca associada a  $j$  é referenciada por  $L_{jk}$ . Para manipular os nós da marca  $L_{jk}$  vamos usar a notação  $L_{jk} \cdot \text{NOS}$  e, para os valores objetivo,  $L_{jk} \cdot f_1$ ,  $L_{jk} \cdot f_2$  e  $L_{jk} \cdot f_3$ .

**Algoritmo 1** *Obtenção de um conjunto mínimo completo de soluções Pareto-ótimas*

**Inicialização.** Criação das marcas iniciais para as folhas

Para  $j \in N$  Tal Que  $F_j = 0$  Faça

$L_{j1} \cdot \text{NOS} \leftarrow \{j\}; \quad L_{j1} \cdot f_1 \leftarrow c_j; \quad L_{j1} \cdot f_2 \leftarrow d_j$

**Principal.** Propagação das marcas

Para  $k$  De  $h - 1$  Até 1 Faça

Para  $j \in N_k$  Tal Que  $F_j \neq 0$  Faça

Se  $P_j = 1$  Então

Para  $i_1$  De 1 Até  $|L_{f_j^1}|$  Faça

Para  $i_2$  De 1 Até  $|L_{f_j^2}|$  Faça

⋮

Para  $i_{F_j}$  De 1 Até  $\left| L_{f_j^{F_j}} \right|$  Faça

$m.NOS \leftarrow \bigcup_{k=1}^{F_j} L_{f_j^k i_k}.NOS$

$m.f_q \leftarrow \sum_{k=1}^{F_j} L_{f_j^k i_k}.f_q, \quad q = 1, 2$

$m.f_3 \leftarrow |m.NOS|$

Dominância( $m, L_j$ )

Senão

Para  $i$  De 1 Até  $F_j$  Faça

Para  $l$  De 1 Até  $\left| L_{f_j^i} \right|$  Faça

Dominância( $L_{f_j^i l}, L_j$ )

O primeiro parâmetro da função  $Dominância(m_j, L_j)$  é uma marca para um nó  $j$ , e o segundo é a lista de marcas existentes para  $j$  até o momento. Esta função consiste em verificar, através dos valores objetivo, se  $m_j$  domina ou é dominada pelas marcas em  $L_j$ . Se  $m_j$  for dominada, ou equivante, por alguma marca em  $L_j$ , a função retorna sem nenhuma alteração. Caso contrário,  $m_j$  é inserida em  $L_j$  e todas as marcas de  $L_j$  que são dominadas por  $m_j$ , caso exista, são excluídas.

Na próxima seção apresentaremos um exemplo afim de ilustrar o funcionamento do algoritmo.

### 4 Exemplo de funcionamento do Algoritmo 1

Considere a FTA abaixo com os custos de correção e detecção,  $c_j$  e  $d_j$ , associados aos nós folhas ( $j = 1, 2, \dots, 7$ ) mostrados na figura 1. Na inicialização do algoritmo são criadas as

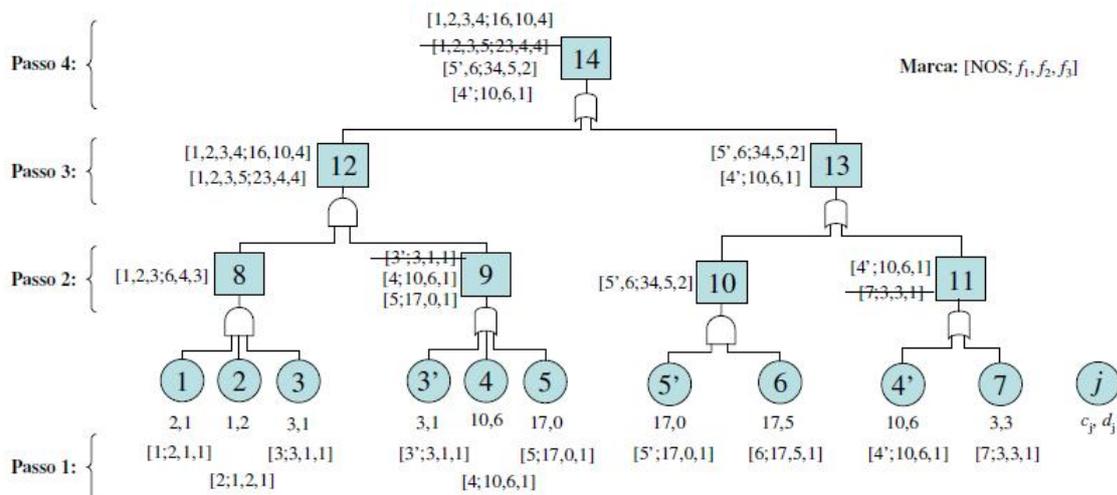


Figura 1: Exemplo de funcionamento do Algoritmo de 1

marcas associadas as folhas, como pode ser visto na figura em **Passo 1**. Em seguida, **Passo 2**, para cada nó do penúltimo nível ( $j = 8, 9, 10$  e  $11$ ), marcas são geradas e comparadas. Para o nó  $j$ ,  $j = 8$  ou  $j = 10$ , como os seus filhos estão ligados através de uma porta E, então apenas uma marca é criada, onde NOS é formado pelos filhos de  $j$ ,  $f_1$  e  $f_2$  são dados pela soma dos custos de correção e detecção dos filhos de  $j$ , respectivamente, e  $f_3 = |\text{NOS}|$ . O motivo de termos esta única marca, neste caso, se deve ao fato de que só teremos uma falha em  $j$  se ocorrer uma falha simultânea em todos os seus filhos. Para detectar esta falha em  $j$  precisamos verificar a falha em cada filho, o mesmo vale para fazer a correção da falha, o que justifica os somatórios para os cálculos de  $f_1$  e  $f_2$ . Para os nós os quais tem seus filhos conectados por um porta OU,  $j = 9$  ou  $j = 11$ , uma marca associada a cada filho é criada. A justificativa de uma marca para cada filho se deve ao fato de que a falha em qualquer filho implica na falha de  $j$ . O teste de dominância é feito para cada nova marca que é criada para um nó. Para  $j = 9$ , por exemplo, quando a marca associada ao filho 4 é criada,  $[4; 10, 6, 1]$ , já existe a marca associada ao filho 3'. Como esta marca associada a 3' é dominada pela marca nova, isto é, a solução associada ao nó 4 é mais impactante, então a marca associada a 3' é eliminada. Seguindo esta idéia, o algoritmo chega ao fim da execução, **Passo 4**, com as soluções não dominadas associadas ao nó raiz (14), as quais formam um conjunto mínimo completo de soluções Pareto-ótimas.

Na próxima seção apresentamos alguns resultados computacionais associados a FTAs gerados aleatoriamente.

## 5 Aspectos computacionais

Nesta seção, são apresentados os resultados computacionais alcançados. O algoritmo proposto foi desenvolvido no visual studio 2010 C# em um computador com a configuração Intel(R)Core TM 2 CPU 6400@2.13GHz, 2GiB. Os problemas testes são adaptações de aplicações reais na indústria. Todas as FTAs associadas aos problemas possuem altura igual a cinco, duzentos e oito modos de falhas e cento e vinte duas folhas. Os tempos obtidos para encontrar as soluções são menores do que um segundo. Na tabela 1, podem ser vistas as características do problemas testados e seus respectivos resultados computacionais, onde #OU e #E são as quantidades de portas lógicas OU e E da FTA, respectivamente, #PO é o número de soluções no conjunto mínimo completo e MÉDIA é a média de nós nas soluções. Temos que #PO cresce com a quantidade de portas OU. Uma justificativa para este fato é o aumento do número de soluções viáveis com #OU. Para os problemas de p7 até p19 temos MÉDIA igual a 1, o que significa que todas as #PO soluções são compostas por apenas um modo de falha. Mais uma vez, a justificativa é o crescimento de #OU. Quanto maior o número de portas OU maior é a possibilidade de ocorrer uma parada no sistema devido a falha de um único nó da FTA.

## 6 Conclusão

problema	#OU	#E	#PO	MÉDIA
p1	3	83	5	7
p2	5	81	5	3
p3	8	78	5	3
p4	10	76	10	3
p5	13	73	21	2
p6	15	71	21	2
p7	16	70	23	1
p8	17	69	24	1
p9	20	66	24	1
p10	23	63	25	1
p11	26	60	26	1
p12	28	58	27	1
p13	30	56	27	1
p14	31	55	27	1
p15	32	54	26	1
p16	33	53	29	1
p17	34	52	29	1
p18	37	49	31	1
p19	38	48	31	1

Tabela 1: Resultados computacionais

A principal contribuição deste trabalho é, dado uma árvore de análise de modos de falha, calcular a importância dos principais modos de falha, a partir de uma avaliação multi-critério que considera seu custo de correção, de dificuldade de detecção e da contextualização estrutural hierárquica através de um algoritmo multi-critério de otimização combinatória. Desta forma, este método pode ser utilizado com outros ou mesmo ser expandido na sua avaliação de critérios, para apoiar o tomador de decisão para o desenvolvimento de estratégias de manutenção que garantam uma relação de confiabilidade e produção aceitáveis.

## Referências

- D. D. Adhikarya, G. K. Bosea, S. Chattopadhyayb, D. Bosec, and S. Mitrad. RAM investigation of coal-fired thermal power plants: A case study. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3, 2012.
- S. ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, 1996.
- J. Barabady. Improvement of System Availability Using Reliability and Maintainability Analysis. *Licentiate Thesis, Lulea University of Technology Division of Operation and Maintenance Engineering*, 2005.

- R. J. Ferreira, M. Moura, P. R. A. Firmino, and E. A. L. Drogue. Desenvolvimento de um teste de hipóteses para um modelo híbrido de riscos competitivos dependentes e processos de renovação generalizados. *XLII SBPO*, 2010.
- P. R. A. Firmino and E. L. Drogue. Estimação da cota inferior para a confiabilidade de sistemas por árvores de falhas. *Pesquisa Operacional*, 26:383 – 402, 2006.
- S. A. Monteiro, A. Donato, and N. Maculan. Um modelo para Planejamento de Curto Prazo de Paradas de Manutenção. *XLIII SBPO*, 2011.
- U. R. Oliveira, E. J. Paiva, and D. A. Almeida. Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas. *Produção*, 20:77 – 91, 03 2010. ISSN 0103-6513.
- R. A. Sahner and K. S. Trivedi. Performance and Reliability Analysis Using Directed Acyclic Graphs. *IEEE Transactions on software engineering*, 13(10), 1987.
- P. Scarf. A framework for condition monitoring and condition based maintenance. *Quality Technology & Quantitative Management*, 4(2):301–312, 2007.
- P. R. Silveira and J. C. Silva. Aplicação de sistemas especialistas híbridos para apoio em manutenção na indústria. *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Agosto 2008.
- V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies. *Computer and Chemical Engineering*, (27):313 – 326, 2003.