

Ferramenta computacional para análise RAM e propagação de incertezas em estudos de confiabilidade

Danilo Taverna Martins Pereira de Abreu, LabRisco – USP
Marcelo Ramos Martins, LabRisco – USP

RESUMO

A manutenção de níveis aceitáveis de desempenho em termos de segurança e produtividade implica em desafios de planejamento na indústria. Nesse sentido, entre uma vasta gama de indicadores de *performance* para as plantas industriais, destaca-se o *downtime*, ou seja, a proporção de tempo em que a planta se encontra em estado de indisponibilidade para realizar a função desejada. Nas fases de projeto, a estimativa do *downtime* é de suma importância para avaliar a viabilidade do empreendimento. Entretanto, essa computação não se trata de algo trivial, uma vez que depende de variáveis incertas (e.g., tempos até a falha de componentes, tempos de reparo) relacionadas de modo complexo entre si. Em função disso, torna-se necessária a aplicação de metodologias de análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*, termo em inglês para “Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade”), as quais geralmente dependem de ferramentas computacionais sofisticadas. Tendo isso em vista, este trabalho tem como objetivo apresentar o ERAS (*Engineered-systems Reliability Analysis Software*), ferramenta computacional para análise RAM e que está atualmente em desenvolvimento no LabRisco – Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco da USP. O ERAS permite a modelagem de sistemas por meio de árvores de falhas – técnica amplamente disseminada entre analistas de risco –, mas não se atém às limitações tradicionais dessa técnica, por lançar mão da simulação de Monte Carlo em seus algoritmos de computação. Portanto, além das funcionalidades tradicionais de um *software* de análise por árvore de falhas, como a identificação dos *cut sets* mínimos e cálculo da probabilidade de ocorrência do evento topo, o ERAS também permite a consideração de reparos nos componentes do sistema e a propagação de incertezas associadas aos parâmetros das distribuições de probabilidade de falha e reparo introduzidas no modelo. O trabalho detalhará os métodos incorporados nessa ferramenta computacional, seus méritos e limitações. Por fim, será apresentado um exemplo de modelagem para um sistema de engenharia reduzido e didático, a fim de ilustrar as funcionalidades.

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão na corrida pelo desenvolvimento tecnológico e a demanda por redução de custos têm levado as mais diversas áreas da engenharia ao seu extremo. Como consequência, aumenta-se em diversos aspectos a complexidade dos sistemas envolvidos, o que dificulta cada vez mais a sua compreensão e agrega incertezas.

Além da demanda por desempenho, as questões associadas à proteção do meio ambiente e da vida humana ficam mais rígidas a cada dia que passa. Um eventual desastre causado por uma planta industrial resultando em poluição ambiental, fatalidades ou dano patrimonial pode facilmente acabar com a reputação de uma empresa centenária, além de muitas vezes resultar em consequências cujo reparo é intangível.

Tanto para sistemas de engenharia que visam a assegurar a integridade patrimonial quanto para aqueles que simplesmente procuram agregar valor a um processo, uma pergunta é cabível e de grande interesse aos seus responsáveis: a que nível se pode contar com a sua disponibilidade? Um sistema de combate a incêndio que esteja indisponível numa emergência se torna inútil. Uma planta de produção parada, por sua vez, representa prejuízo. O conceito formal de disponibilidade remete justamente à probabilidade de que um sistema seja capaz de executar a função para a qual foi designado. Em outras palavras, diz respeito à parcela de tempo na qual o sistema se apresenta apto a operar em conformidade com o seu objetivo de projeto.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional que permite calcular a disponibilidade de sistemas, além de realizar a propagação de incertezas. Esta ferramenta,

denominada ERAS (*Engineered-systems Reliability Analysis Software*), está atualmente em desenvolvimento no LabRisco – Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco da USP.

2. METODOLOGIA

Nesta seção serão destacados conceitos básicos de análise por árvores de falhas, análise RAM e método de Monte Carlo. Os métodos de cálculo aqui apresentados estão implementados no ERAS. Um exemplo de aplicação será apresentado em seguida, a fim de ilustrar a aplicação das diversas metodologias descritas.

2.1 Análise por árvore de falhas

A análise por árvore de falhas é uma técnica dedutiva por meio da qual um evento indesejado, denominado “evento topo”, é postulado e todas as possíveis causas que podem levar à sua ocorrência são deduzidas de maneira sistemática, do topo à base. Um exemplo de definição de evento topo poderia ser “incapacidade de um motor entregar potência” ou, ainda, “a incapacidade de um sistema eletrônico enviar um sinal quando requisitado”. A construção da árvore é feita com o auxílio de portões lógicos do tipo “E” e “OU”.

A árvore de falhas em si é uma representação gráfica de várias combinações de eventos básicos que levam à ocorrência do evento topo. Os eventos básicos, por sua vez, constituem o limite de resolução da árvore, i.e., são eventos nos quais o desenvolvimento da árvore se encerra.

Cada combinação de eventos básicos que, caso ocorram simultaneamente, levam à ocorrência do evento topo é denominada *cut set*. São de interesse especial os *cut sets* mínimos, que são combinações mínimas que levam à ocorrência do evento topo, ou seja, caso alguma das falhas consideradas seja retirada do conjunto, este deixa de ser um *cut set*. Destaca-se que os *cut sets* mínimos são obtidos pela aplicação da lógica booleana a partir do evento topo.

Sejam os *cut sets* mínimos de uma determinada árvore de falhas denotados por C_1, C_2, \dots, C_n . A probabilidade de ocorrência do i -ésimo *cut set* mínimo será dada pelo produto da probabilidade de ocorrência dos seus eventos básicos. Ressalta-se que na árvore de falhas os eventos básicos são tratados como independentes entre si. Desta forma, se E_1, E_2, \dots, E_m são os eventos que compõem o i -ésimo Cut Set, C_i , tem-se que:

$$\Pr(C_i) = \Pr(E_1) \cdot \Pr(E_2) \cdot \dots \cdot \Pr(E_m) \quad (1)$$

A expressão da probabilidade de ocorrência do evento topo, $\Pr(T)$, por sua vez, é dada por:

$$\Pr(T) = \Pr(C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n) \quad (2)$$

2.2 Análise RAM

A análise de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (análise RAM) consiste na determinação da disponibilidade de um sistema de engenharia com base em seus aspectos de confiabilidade e manutenibilidade.

A confiabilidade de um sistema é a sua capacidade de desempenhar a função desejada em um dado intervalo de tempo [1]. É o complemento da probabilidade de falha deste sistema, ou seja, a soma entre a probabilidade de falha e a confiabilidade é unitária. Matematicamente, a confiabilidade para um determinado tempo de missão t , denotada por $R(t)$, é dada por:

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t)dt = 1 - F(t) \quad (3)$$

Onde $f(t)$ é a função de densidade de probabilidade de falha do sistema e $F(t)$ a sua probabilidade de falha para um tempo de missão t . Neste ponto é importante destacar que, numa árvore de falhas, $F(t)$ coincide com a probabilidade de ocorrência do evento topo.

A manutenibilidade, por sua vez, é a probabilidade que um sistema seja reparado para um estado aceitável de operação até um instante de tempo t . Denotada por $M(t)$, a manutenibilidade é dada por:

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt \quad (4)$$

Onde $m(t)$ é a função de densidade de probabilidade de reparo do sistema em questão.

Por fim, a disponibilidade de um sistema $A(t)$ é dada pela razão entre o tempo de *uptime*, i.e., tempo que o sistema permaneceu operando, e o tempo total de operação. Matematicamente [2]:

$$A(t) = \frac{t_{uptime}}{t} \quad (4)$$

O cálculo da disponibilidade de um sistema a partir das distribuições de probabilidade de falha (que remete à confiabilidade) e distribuições da probabilidade de reparo não é trivial. Há expressões determinísticas apenas para combinações específicas de famílias de distribuições. No caso genérico, uma das possibilidades reside no uso de simulação, em especial o método de Monte Carlo [3], como será descrito na seção a seguir.

2.3 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma forma de obter uma estimativa de uma grandeza aleatória por meio de repetições de experimentos virtuais. Neste método, geram-se $N \gg 1$ experimentos e tem-se que a probabilidade de um determinado evento será dada pela proporção entre o número de vezes que este evento é observado nos experimentos e o número total de experimentos. Na prática, o histograma dos experimentos de Monte Carlo deve se aproximar da função de densidade de probabilidade que representa o fenômeno estocástico observado.

Para gerar números que seguem uma distribuição de probabilidade de interesse, aplica-se o método da inversa da distribuição acumulada. Dada uma variável aleatória X e sua função de densidade de probabilidade $g(x)$ a distribuição de densidade acumulada, $G(x)$, é dada por:

$$G(x) = \int_{-\infty}^x g(x') dx' \quad (5)$$

Sorteando-se números aleatórios, p , entre 0 e 1 e aplicando a inversa da distribuição acumulada, $G^{-1}(p)$, tem-se que a amostra de valores seguirá aproximadamente $g(x)$.

2.4 Aplicação do método de Monte Carlo para análise RAM

A aplicação do método de Monte Carlo para análise RAM se baseia na simulação de tempos até a falha e reparo dos componentes de um sistema por meio do método da inversa da distribuição acumulada. A Fig. 1 exibe o histórico de transições de estado para um componente ao longo do tempo, ao longo de M repetições.

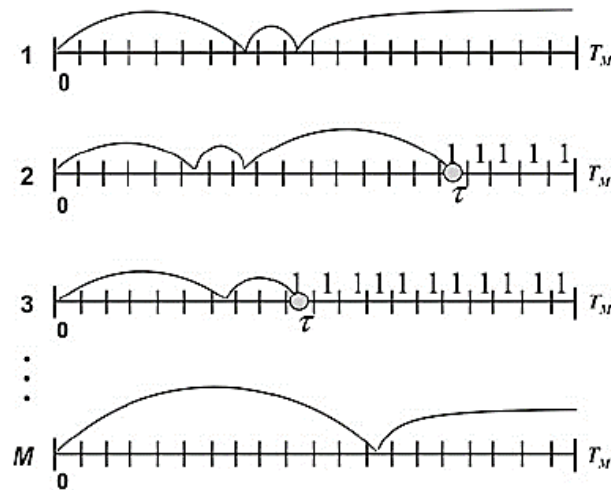


Fig. 1 – Simulações do histórico de vida de um componente/sistema. Fonte: [3].

Em cada rodada da simulação, sabe-se a cada instante de tempo se o sistema está disponível ou não com base nos tempos até a falha e reparo. O ERAS, em particular, faz essa determinação cruzando o número de componentes indisponíveis num determinado instante de tempo com a relação de *cut sets* mínimos do sistema. Caso todos os componentes que fazem parte de um *cut set* mínimo estejam indisponíveis, então o sistema como um todo está indisponível. Ao final, contabiliza-se o tempo total de disponibilidade (ou indisponibilidade) da rodada, a fim de calcular a disponibilidade do sistema para aquela rodada (vide Eq. 4). A média de disponibilidade de todas as rodadas será um estimador da disponibilidade do sistema.

2.5 Aplicação do método de Monte Carlo na propagação de incertezas

Uma outra aplicação interessante do método de Monte Carlo advém de sua capacidade de auxiliar na propagação de incertezas. No problema de análise RAM ou computação de uma árvore de falha, as distribuições de probabilidade de falha/reparo dos componentes (que representam a incerteza aleatória dos tempos até a falha/reparo) podem ter incertezas epistêmicas associadas aos seus parâmetros.

Por exemplo, considerando a distribuição de probabilidade exponencial, a sua função de densidade de probabilidade será dada por:

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x) \quad (6)$$

Portanto, essa distribuição é caracterizada por um único parâmetro, λ . Este parâmetro pode ser exato ou incerto. No segundo caso, sua incerteza também será representada por uma distribuição de probabilidades.

A propagação de incertezas pelo método de Monte Carlo se dá pela aplicação do método da inversa da distribuição acumulada às distribuições de probabilidade que representam as incertezas dos parâmetros. A cada rodada da simulação, sorteia-se um valor para o parâmetro e realiza-se os demais cálculos pertinentes normalmente. Ao final, o histograma obtido para os resultados destes cálculos será representativo da incerteza da saída propagada a partir das incertezas das entradas.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação, será feita a análise RAM e propagação de incertezas para um sistema de geração de energia por meio de dois conjuntos diesel-geradores e um barramento, apresentado na Fig. 2. O modo de falha de interesse do sistema é a sua incapacidade de fornecer energia, que ocorre em caso de falha do barramento ou de ambos os conjuntos geradores simultaneamente. A árvore de falha que representa a falha deste sistema está apresentada na Fig. 3.

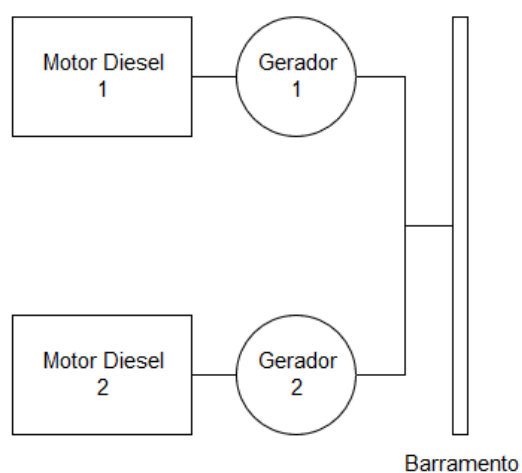
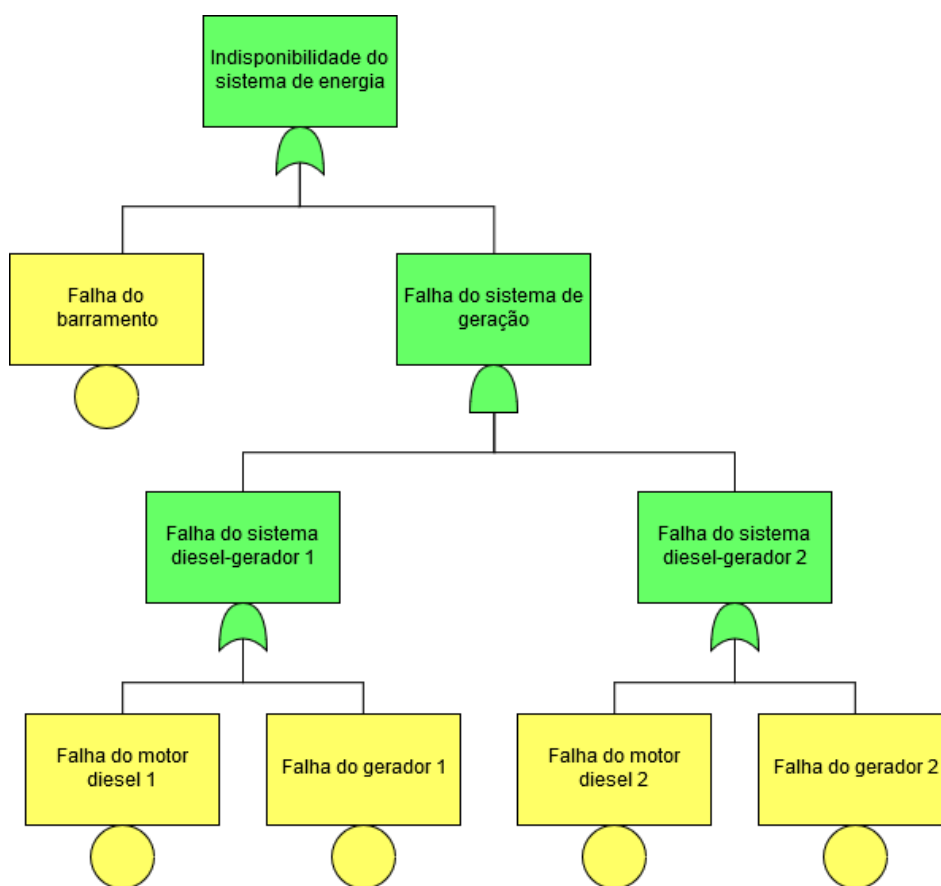


Fig. 2 – Desenho esquemático do sistema analisado no exemplo de aplicação



• Fig. 3 – Árvore de falhas do sistema analisado no exemplo de aplicação

Os *cut sets* mínimos desta árvore de falha são (em termos de falhas dos componentes listados):

- Barramento;
- Motor Diesel 1 e Motor Diesel 2;
- Motor Diesel 1 e Gerador 2;
- Gerador 1 e Motor Diesel 2;

- Gerador 1 e Gerador 2.

As informações quantitativas dos componentes são as que seguem:

- Componente: Barramento
 - Distribuição de probabilidade de falha: exponencial;
 - Função de densidade de probabilidade de falha: $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$;
 - Parâmetro incerto na função de densidade de probabilidade de falha: λ ;
 - Distribuição de probabilidade de λ : normal, $\mu = 4 \times 10^{-6}h$; $\sigma = 1 \times 10^{-7}h$.
 - Distribuição de probabilidade de reparo: uniforme;
 - Função de densidade de probabilidade de reparo: $f(t) = \frac{1}{b-a}$, $a \leq t \leq b$;
 - Parâmetros da distribuição de probabilidade de reparo: $a = 40h$; $b = 120h$.
- Componente: Gerador
 - Distribuição de probabilidade de falha: exponencial;
 - Função de densidade de probabilidade de falha: $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$;
 - Parâmetro incerto na função de densidade de probabilidade de falha: λ ;
 - Distribuição de probabilidade de λ : normal, $\mu = 3 \times 10^{-5}h$; $\sigma = 4 \times 10^{-6}h$.
 - Distribuição de probabilidade de reparo: uniforme;
 - Função de densidade de probabilidade de reparo: $f(t) = \frac{1}{b-a}$, $a \leq t \leq b$;
 - Parâmetros da distribuição de probabilidade de reparo: $a = 60h$; $b = 240h$.
- Componente: Motor Diesel
 - Distribuição de probabilidade de falha: exponencial;
 - Função de densidade de probabilidade de falha: $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$;
 - Parâmetro incerto na função de densidade de probabilidade de falha: λ ;
 - Distribuição de probabilidade de λ : normal, $\mu = 1 \times 10^{-5}h$; $\sigma = 6 \times 10^{-6}h$.
 - Distribuição de probabilidade de reparo: uniforme;
 - Função de densidade de probabilidade de reparo: $f(t) = \frac{1}{b-a}$, $a \leq t \leq b$;
 - Parâmetros da distribuição de probabilidade de reparo: $a = 80h$; $b = 720h$.

A propagação de incerteza da probabilidade de ocorrência do evento topo (sem levar em consideração o reparo) foi realizada por meio de 5000 simulações e tempo de missão de 1 ano. O histograma de distribuição da incerteza está apresentado na Fig. 4. O valor médio encontrado foi de 0.118. Ao incluir os reparos pode-se calcular também a disponibilidade esperada para o tempo de missão total. No caso estudado, aplicando 1000 rodadas de simulação, a disponibilidade calculada é de 99.9061%.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os fundamentos e metodologias de cálculo pertinentes ao ERAS, ferramenta computacional em desenvolvimento para análise RAM e propagação de incertezas. Um exemplo de aplicação foi apresentado, no qual a falha de um sistema de geração de energia foi estudada.

No exemplo de aplicação, algumas das funcionalidades do ERAS foram apresentadas. Calculou-se: probabilidade de falha do sistema (probabilidade do evento topo da árvore de falhas correspondente) com propagação de incerteza e a disponibilidade deste considerando distribuições de probabilidade de reparo.

Como mencionado, o *software* ainda está em fase de desenvolvimento. Nas próximas etapas, deseja-se desenvolver uma interface gráfica que permita sua interação com o usuário. Ainda, estão sendo estudadas melhorias na aplicação do método de Monte Carlo como, por exemplo, a partir da amostragem por importância.

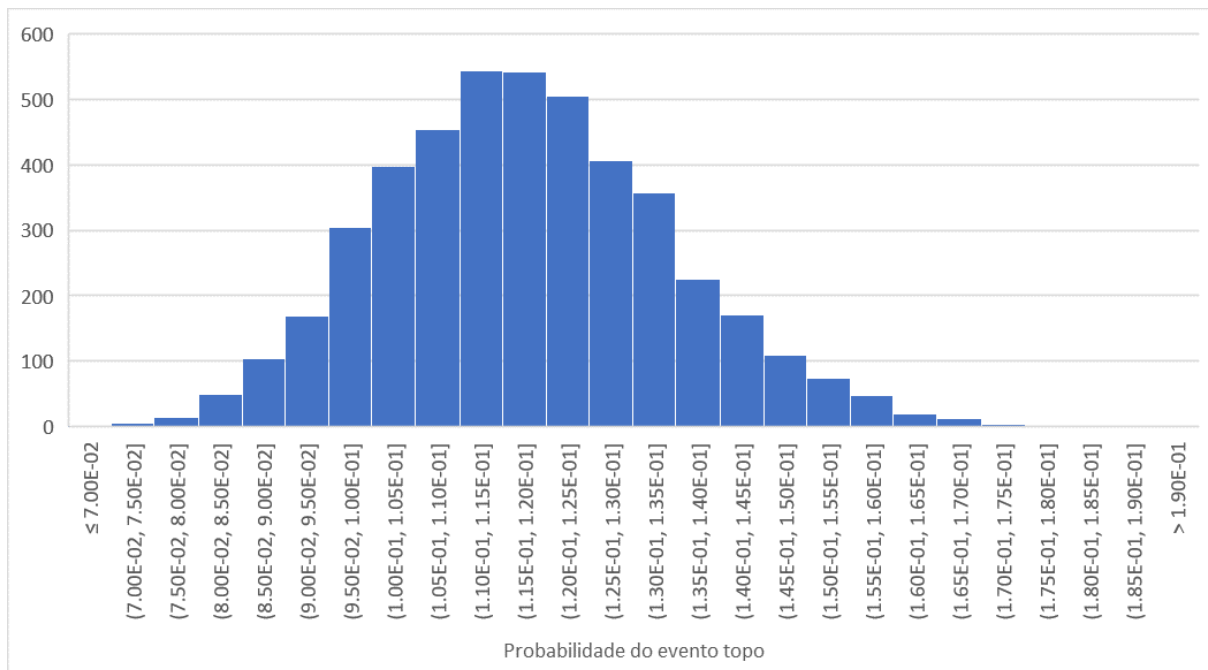


Fig. 4 – Histograma de propagação de incerteza da probabilidade do evento topo

5. AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da concessão 304533 / 2016-5.

6. REFERÊNCIAS

- [1] S. Ahmadi, S. Moosazadeh, M. Hajihassani, H. Moomivand, M.M. Rajaei, Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling, Meas. J. Int. Meas. Confed. 145 (2019) 756–764. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.009>.
- [2] C.E. Ebeling, An introduction to reliability and maintainability engineering, McGraw-Hill, USA, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199807/08\)14:4<295::AID-QRE197>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1638(199807/08)14:4<295::AID-QRE197>3.0.CO;2-Y).
- [3] E. Zio, The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis, Springer, London, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4588-2>.