

## **Aprimoração de ferramenta computacional para análise RAM de sistemas de engenharia**

Vinícius Bueno Bernardes, Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco – LabRisco,  
Universidade de São Paulo

Danilo Taverna Martins Pereira de Abreu, Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco –  
LabRisco, Universidade de São Paulo

Marcelo Ramos Martins, Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco – LabRisco,  
Universidade de São Paulo

### **RESUMO**

Este artigo apresenta a aplicação de uma ferramenta computacional para análise RAM de um sistema de injeção de água em poços de petróleo. Inicialmente, é apresentado o objetivo do trabalho e as variáveis consideradas. Os principais conceitos os quais o trabalho se baseia são apresentados e, em seguida, são feitas algumas considerações sobre as variáveis envolvidas no algoritmo desenvolvido. Por último, é mostrada a aplicação do algoritmo no sistema *offshore* citado anteriormente e são apresentadas algumas conclusões sobre o trabalho.

### **1. INTRODUÇÃO**

A análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*, termo em inglês para “Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade”) visa estimar a disponibilidade de sistemas de engenharia a partir de atributos de confiabilidade e manutenibilidade no nível de seus componentes, tais como o tempo esperado até a falha e o tempo esperado de reparo.

Na análise RAM, surgem alguns desafios, como a representação do arranjo funcional do sistema e a consideração e fatores alheios ao sistema físico, mas que afetam a sua disponibilidade, tais como a quantidade de equipes de reparo e a quantidade de peças sobressalentes disponíveis. Em particular, no contexto de exploração e produção de petróleo offshore, tais considerações são de suma importância dada a restrição de pessoal e itens à bordo das plataformas de produção. De modo a avançar no conhecimento em relação a esta limitação destacada, este trabalho se refere ao desenvolvimento de algoritmos para a sofisticação da análise RAM suportada por árvores de falhas e simulação de Monte Carlo, a fim de incorporar elementos como o número de sobressalentes por equipamento, as equipes de manutenção disponíveis na plataforma e a priorização de componentes no momento do reparo. Os algoritmos estão sendo desenvolvidos na linguagem de programação C++.

### **2. METODOLOGIA**

Neste trabalho, a árvore de falhas foi utilizada para representar o arranjo funcional do sistema, ou seja, a maneira como os componentes interagem entre si para desempenhar a função final desejada. As árvores de falhas permitem identificar os *cut sets* mínimos do sistema (as combinações mínimas de eventos de falha que levam à ocorrência do evento topo da árvore). Em aplicações voltadas para a análise RAM, o evento topo é geralmente postulado como a falha do sistema em cumprir a função para a qual foi projetado.

O método de Monte Carlo permite simular os processos estocásticos que regem a dinâmica de falha e reparo dos componentes e, portanto, auxilia na quantificação de indicadores como a disponibilidade do sistema e seu *downtime*. A aplicação do método de Monte Carlo permite a realização de experimentos virtuais em ambiente computacional, os quais geram um conjunto de amostras de possíveis resultados do fenômeno sob análise. Por exemplo, na análise RAM, é comum após cada rodada de simulação avaliar grandezas como a disponibilidade, o número de falhas para cada componente e os custos de reparo. Ao final, para cada grandeza de interesse é possível extrair estatísticas que apoiam o processo de tomada de decisão e a projeção do desempenho de um sistema físico ao longo de sua vida útil. O método de Monte Carlo relaxa algumas suposições restritivas de modelos estocásticos e simula condições mais realistas, apresentando as seguintes vantagens:

- É possível considerar manutenções e envelhecimentos dos componentes;
- Não há dependência de distribuições de probabilidade específicas;
- É possível considerar dependência entre os componentes;

- É possível considerar itens alheios ao sistema físico, como por exemplo número de sobressalentes, equipes de reparo e ordem de prioridade entre os componentes para reparo;
- Permite realizar estimativas de algumas grandezas para os casos em que não é possível obter fórmulas analíticas.

### 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O ALGORITMO

Nesta seção serão apresentadas algumas características do algoritmo desenvolvido, no que se diz respeito aos fatores alheios considerados. O algoritmo está sendo desenvolvido baseado nas possíveis transições de estados dos componentes.

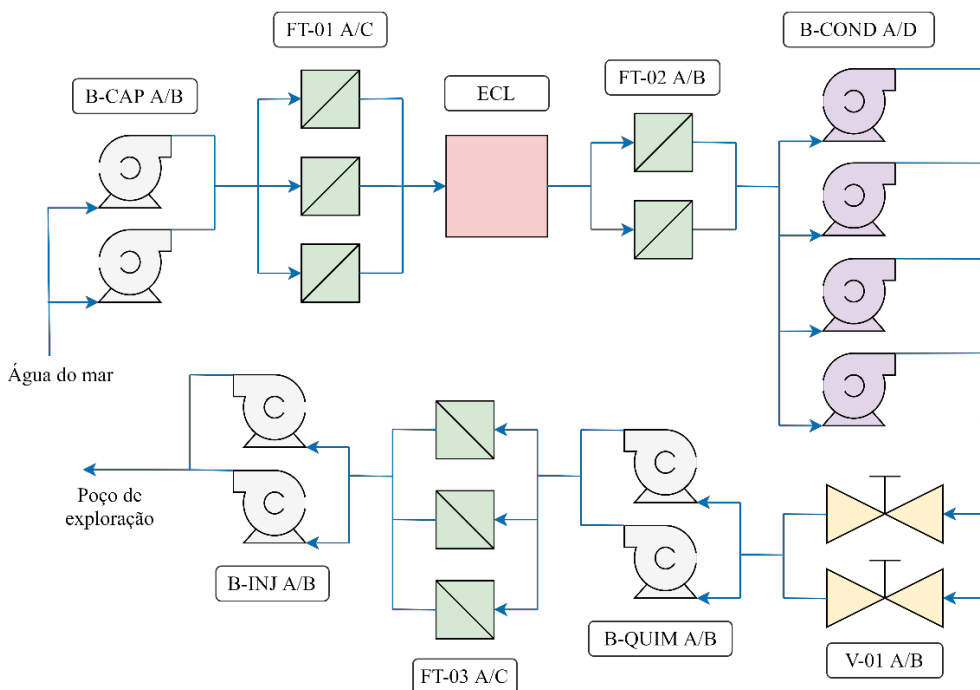
Em um dado instante, para a escolha do componente que passará por algum tipo de manutenção, há dois estágios de prioridade. O primeiro estágio de prioridade diz respeito ao tipo de manutenção, isto é, a manutenção corretiva é prioritária sobre a preventiva. Assim que for verificado o primeiro estágio, o segundo estágio de prioridade ocorre dentro de um mesmo estado por ordem de chegada (*First In, First Out*).

Em um dado instante, caso não tenha equipe de reparo disponível, será procurado o primeiro instante em que haja disponibilidade e, caso este instante seja após o tempo de missão do sistema, a dinâmica de falha continuará sendo simulada enquanto que a dinâmica de reparo não ocorrerá mais.

Os sobressalentes podem ser introduzidos de duas maneiras no algoritmo. Da maneira mais simples, é passado, para cada componente, o número de sobressalentes que estará disponível ao longo de todo o tempo de missão do sistema, de forma que os componentes já começam a simulação com todos sobressalentes. Assim, caso acabe os sobressalentes, esses não serão repostos até o final da simulação. A segunda maneira é inserir, para componente, a frequência média com a qual os sobressalentes são repostos – por exemplo, chegada de 2 novos sobressalentes a cada 6 meses. É possível ainda, da segunda forma, associar uma distribuição de probabilidade de atraso logístico, de forma a tornar mais realístico o processo de reposição de sobressalentes.

### 4. APLICAÇÃO

Na Figura 1 é mostrado um sistema simplificado para captação, tratamento e injeção de água para pressurização em poços de petróleo. Este sistema é formado por bombas de captação, filtros para remoção de partículas, eletrocloradora, válvulas, bombas químicas e bombas de injeção.

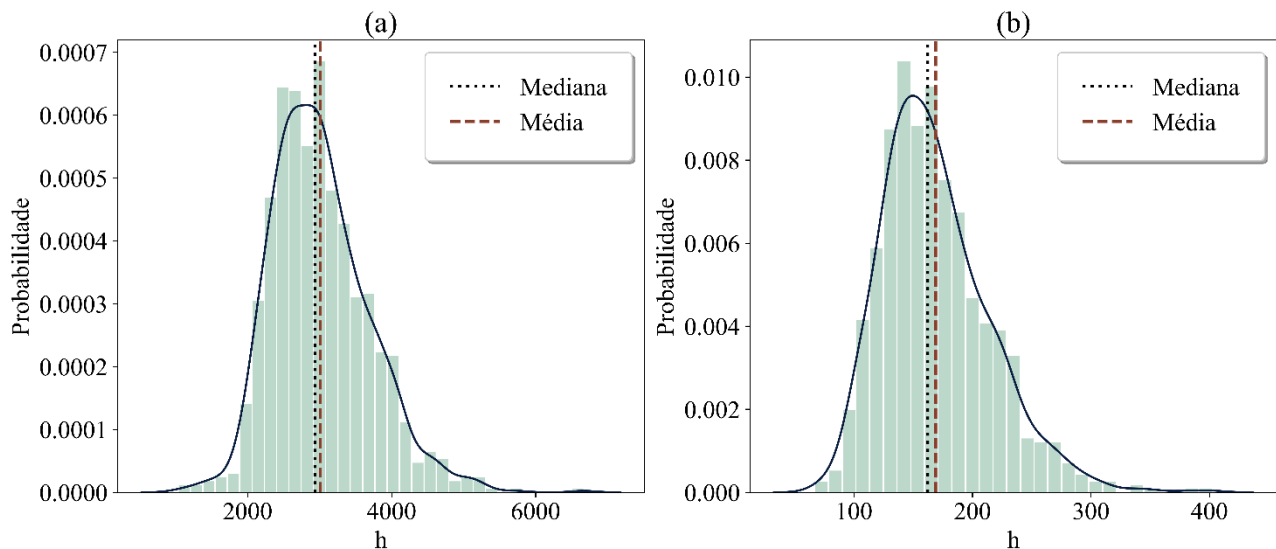


**Figura 1** - Sistema de injeção de água em poços de petróleo.

Algumas das entradas do algoritmo são, para cada componente, as distribuições de probabilidade de falha e de reparo e informações sobre reposição dos sobressalentes. Para o sistema, é necessário especificar

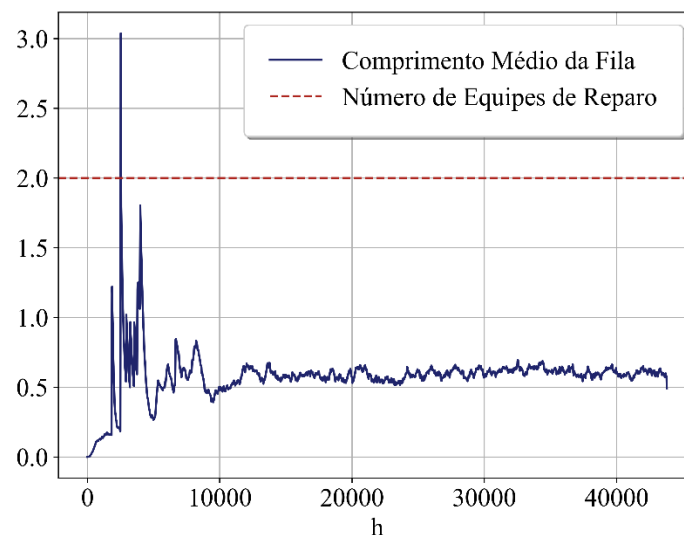
algumas variáveis como o tempo de missão e o número de equipes de reparo. A seguir serão mostrados alguns resultados do sistema apresentado para um tempo de missão de 5 anos, 2 equipes de reparo disponíveis e 1000 rodadas de simulação (do instante zero até o tempo de missão).

A Figura 2 mostra as distribuições de probabilidade de falha e de reparo do sistema, obtidas numericamente através das simulações. A curva sobreposta ao histograma se refere ao método não-paramétrico KDE (*Kernel Density Estimation*) para ajuste dos dados. Há ainda a possibilidade de se aplicar métodos paramétricos, como *Kolmogorov-Smirnov*, adotando alguma distribuição conhecida. Com a densidade de probabilidade de falha obtida numericamente, é possível se obter a função de confiabilidade do sistema e, com a densidade de probabilidade de reparo, é possível calcular a manutenibilidade do sistema.



**Figura 2** - (a) Distribuição de probabilidade de falha (b) Distribuição de probabilidade de reparo.

Ainda à nível do sistema, foi obtida uma disponibilidade média de 94,77%. A Figura 3 mostra a série temporal do comprimento médio da fila de manutenção, assim como uma reta horizontal com o número de equipes de reparo disponível. Através de um gráfico dessa natureza, é possível estudar a influência do número de equipes de reparo na disponibilidade do sistema.



**Figura 3** - Série temporal do tamanho médio da fila de manutenção.

A nível de componentes, são geradas estatísticas como a porcentagem do componente em cada estado e, sendo os estados bem definidos, é possível saber, por exemplo, o tempo ativo médio de manutenção

preventiva e corretiva. Além disso, também é possível se obter a disponibilidade individual média de cada componente, assim como o número médio de sobressalentes utilizados.

## 5. Conclusão

Com o método de Monte Carlo, foi possível, através dos algoritmos, se obter indicadores importantes para o projeto de sistemas de engenharia. Ao se considerar os fatores alheios ao sistema físico, as simulações se aproximam mais das dinâmicas de falha e reparo que acontecem na vida real, de forma que é possível se projetar sistemas com uma maior análise crítica. Além disso, o algoritmo começa a se mostrar útil para simular sistemas com um número grande de componentes e que possuem distribuições de probabilidade distintas – onde se torna inviável obter os resultados através de formulações analíticas.

## 6. Referências

- [1] F. Corvaro, G. Giacchetta, B. Marchetti, M. Recanati, Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618, Petroleum. 3 (2017) 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.09.002>.
- [2] R.K. Sharma, S. Kumar, Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis, Reliab. Eng. Syst. Saf. 93 (2008) 913–919. <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.03.039>.
- [4] 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>.
- [5] A.B.G. Zanforlin, A.M. Schleder, M.R. Martins, Identification and optimization of most relevant variables when creating a maintenance strategy of an offshore wind farm, in: Proc. ASME 36th Int. Conf. Ocean. Offshore Arct. Eng. OMAE 2017, Trondheim, Norway, 2017: p. 1–8.
- [6] A.M. Schleder, P.C. Araujo, M.R. Martins, Multicriteria optimization for system configuration using Monte Carlo simulation and RAM analysis, in: Proc. ASME 35th Int. Conf. Ocean. Offshore Arct. Eng. OMAE 2016, Busan, South Korea, 2016: p. 1–7.
- [7] P.M. Herder, J.A. van Luijk, J. Bruijnooge, Industrial application of RAM modeling, Reliab. Eng. Syst. Saf. 93 (2008) 501–508. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.10.019>.
- [8] M. V. Clavijo, M.R. Martins, A.M. Schleder, Reliability analysis of dynamic positioning systems, Prog. Marit. Technol. Eng. - Proc. 4th Int. Conf. Marit. Technol. Eng. MARTECH 2018. (2018) 265–274. <https://doi.org/10.1201/9780429505294-31>.
- [9] D.T.M.P. de Abreu, Desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da disponibilidade de sistemas de engenharia, Universidade de São Paulo, 2017.
- [10] Y. Guo, H. Wang, H. Yi, Reliability Simulation for Offshore Structures Based on Fault Tree Analysis, in: Vol. 3 Struct. Safety, Reliab., American Society of Mechanical Engineers, 2018. <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77010>.