*Por Alan Rômulo Queiroz, Eduardo César Senger e Luciene Queiroz**

Capítulo IV

Conceitos de confiabilidade – Componentes reparáveis e modelos combinatórios

Este capítulo aborda os principais conceitos de confiabilidade para componentes reparáveis e modelos combinatórios. Apresenta também as informações básicas acerca do software utilizado nas simulações realizadas neste trabalho.

Componentes reparáveis

Um sistema reparável é um conjunto de elementos em que a ocorrência de avaria não significa o fim da operacionalidade, mas somente uma interrupção dessa mesma funcionalidade.

Para componentes reparáveis, o comportamento probabilístico no intervalo de tempo, que vai desde a colocação em operação até a falha, pode ser descrito ainda pela função confiabilidade R(t). Entretanto, tal função não representa a probabilidade de se encontrar o componente funcionando, num instante genérico, levando-se em consideração a possibilidade de conserto (ou de troca). Esta probabilidade é representada pela disponibilidade D do componente, que é a fração do tempo que o componente passa em operação.

Analogamente, chama-se indisponibilidade I a fração de tempo que o componente passa fora de operação (durante o conserto ou durante a operação de substituição). A indisponibilidade representa a probabilidade de o componente ser encontrado fora de operação, em um instante genérico. Obviamente, D + I =1. Assim, se certo componente passa 95% do tempo operando normalmente, e 5% em conserto, pode-se estimar que a probabilidade de ser encontrado em operação, amostrando-se ao acaso um instante qualquer de tempo, é de 0,95. Da mesma forma, a probabilidade de se encontrar o componente fora de operação, por amostragem ao acaso no tempo, é de 0,05. A indisponibilidade também é chamada de "probabilidade de falha".

Observa-se que a função confiabilidade R(t) de objetos não reparáveis foi definida para regime transitório, enquanto que as probabilidades anteriormente referidas dizem respeito a regime permanente. Dessa forma, uma escolha adequada para definir a confiabilidade de objetos reparáveis é tornar a confiabilidade igual à disponibilidade. Se os objetos estão sempre na sua vida útil (novos ou consertados), a disponibilidade será constante e a confiabilidade também.

O comportamento de um componente reparável ao longo do tempo, em regime permanente, pode ser ilustrado graficamente pela Figura 1.

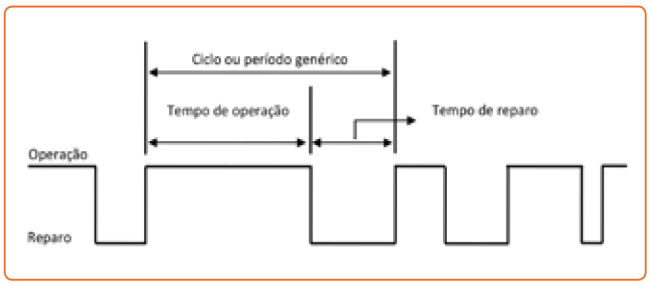

Figura 1 – Comportamento de um componente reparável ao longo do tempo.

Tomando-se a média dos tempos de operação, verifica-se que coincide com o tempo médio para falha, MTTF. Suponha-se agora que o tempo necessário para o reparo possa também ser considerado uma variável aleatória, com certa distribuição. A média desta nova variável aleatória é chamada "tempo médio para reparo", ou MTTR.

A soma MTTF + MTTR constitui o ciclo ou período médio do desempenho do objeto, e é chamado "tempo médio entre falhas", ou MTBF.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (1)$$

Como a disponibilidade D do objeto funcional é a fração do tempo passado em operação, resulta:

$$D = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{MTTF}{MTBF} \quad (2)$$

Como a indisponibilidade I do objeto funcional é a fração do tempo passado fora de operação, resulta:

$$I = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} = \frac{MTTR}{MTBF} \quad (3)$$

Toma-se, então, a disponibilidade D como representando a confiabilidade R do objeto em regime permanente.

$$R = D = \frac{MTTF}{MTBF} \quad (4)$$

Para determinação exponencial dos tempos de falha com parâmetro λ, observa-se que:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Em que λ é o número médio de falhas por unidade de tempo. Supõe-se que os tempos de conserto também obedecem a uma distribuição exponencial, com parâmetro μ, resultando, analogamente, em:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

Em que μ é o número médio de consertos por unidade de tempo. Destas duas últimas expressões, resulta:

$$R = D = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (7)$$

E da equação 2, resulta:

$$I = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (8)$$

Modelos combinatórios

Os modelos combinatórios usam técnicas probabilísticas que enumeram os diferentes caminhos em que um sistema possa permanecer operacional. A confiabilidade de um sistema está geralmente associada à confiabilidade dos componentes individuais que compõem o sistema. Os dois modelos de sistema mais comuns na prática são os modelos série e paralelo. Em um sistema série, é necessário que cada elemento do sistema opere sem falhas para que todo o sistema opere corretamente enquanto que, em um sistema paralelo, somente um dos vários elementos em paralelo pode estar operacional para que todo o sistema funcione corretamente. Na

prática, os sistemas são tipicamente combinações de subsistemas séries e paralelos.

Os sistemas série são sistemas que não possuem qualquer tipo de redundância. Uma maneira de representar esses sistemas é utilizar um diagrama em bloco de confiabilidade. Esse diagrama é representado como um diagrama de fluxo com uma entrada e uma saída do sistema. Cada elemento do sistema é um bloco e, no caso do sistema série, os blocos são alocados de forma que as saídas de cada bloco são a entrada do bloco subsequente. Um diagrama em blocos genéricos de um sistema série, contendo N elementos, é mostrado na Figura 2.

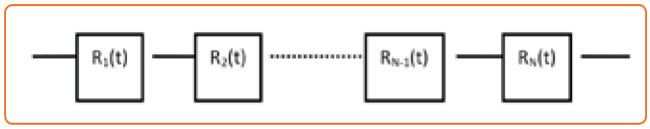

Figura 2 – Sistema série de N blocos.

Independentemente das distribuições usadas para calcular a confiabilidade de cada bloco (ou subsistema), a fórmula para calcular a confiabilidade do sistema série é:

$$R_{sist}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \ldots R_{N-1}(t) \times R_N(t) \qquad (9)$$

Em que:

$R_{sist}(t)$= Confiabilidade do sistema série.

$R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_{N-1}(t)$, $R_N(t)$ = Confiabilidade de cada bloco.

Em um sistema paralelo, é necessário que apenas um dos N componentes idênticos em paralelo esteja funcionando para que todo o sistema esteja operando corretamente. O diagrama de confiabilidade em blocos é mostrado na Figura 3.

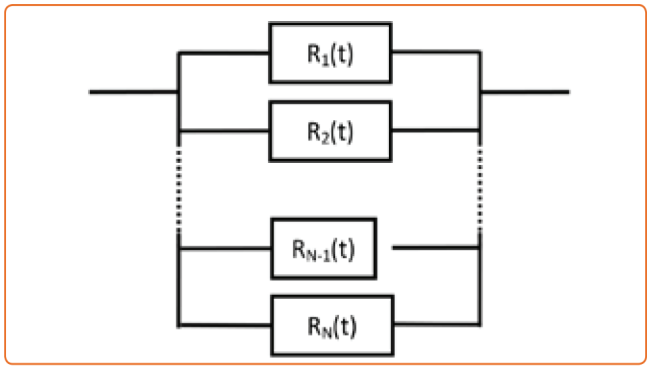

Figura 3 – Sistema paralelo de N blocos.

Para o cálculo da confiabilidade em sistemas paralelos, é necessário determinar a não-confiabilidade de cada bloco primeiramente. A não-confiabilidade U(t) de um sistema é também uma função do tempo, definida como uma probabilidade condicional que um sistema operará incorretamente durante o intervalo $[t_0,t]$, dado que o sistema estava operando corretamente no instante t_0.

A não-confiabilidade pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$U_N(t) = 1 - R_N(t) \qquad (10)$$

Em que:

$U_N(t)$= Não-Confiabilidade de um bloco N.

$R_N(t)$ = Confiabilidade de um bloco N.

Neste caso, a confiabilidade do sistema paralelo apresentado na Figura 3 é calculada da seguinte maneira:

$$R_{sist}(t) = 1 - [U_1(t) \times U_2(t) \times \ldots U_{N-1}(t) \times U_N(t)] \qquad (11)$$

Em que:

$R_{sist}(t)$= Confiabilidade do sistema paralelo.

$U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_{N-1}(t)$, $U_N(t)$ = Não-confiabilidade de cada bloco.

Logo, um sistema em paralelo possui maior confiabilidade quando comparado a um sistema série dotado dos mesmos equipamentos.

Software para simulação

As simulações apresentadas nestes artigos foram realizadas através do software comercial Blocksim. Este software utiliza distribuições estatísticas para a realização dos cálculos envolvendo engenharia de confiabilidade e está muito relacionado com a função densidade de probabilidade f(t) e a função distribuição de probabilidade F(t) (ver capítulo III para definição destas funções). A partir destas funções, de acordo com o tipo de distribuição estatística definida, o software processa os cálculos de análise de dados de vida, tais como a função de confiabilidade e taxa de falha, utilizando simulações de Monte Carlo, permitindo simular milhões de vezes uma determinada situação.

A função taxa de falha permite a determinação do número de falhas que ocorrem por unidade de tempo. O software utiliza essa informação na caracterização do comportamento de falha de um componente, podendo ser parametrizadas ainda informações sobre a alocação de equipe de manutenção, planejamento de materiais sobressalentes, etc. A taxa de falhas é denotada como falhas por unidade de tempo.

O tipo de distribuição adotado nas simulações realizadas é a distribuição exponencial, devido à característica de taxa de falha constante dos equipamentos.

Dessa forma, considerando o arranjo dos equipamentos no sistema, o software processa os cálculos das variáveis de confiabilidade, em que o primeiro objetivo é obter a taxa de falha de todo o sistema baseado na taxa de falhas dos componentes.

A expressão matemática a ser processada é decorrente do arranjo do sistema que se deseja simular. A Figura 4 apresenta a expressão matemática processada pelo software decorrente de uma configuração série e que exemplificará uma simulação realizada pelo software.

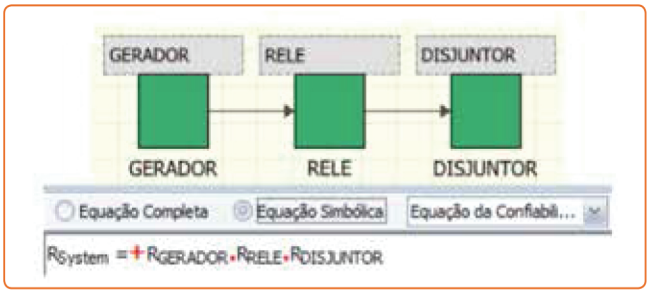

Figura 4 – Expressão matemática de uma configuração série.

Os valores de RGERADOR, RRELE e RDISJUNTOR foram dados para um período de cinco anos e a confiabilidade do sistema foi estimada para esse período. No entanto, uma vez que a característica de falha de um componente pode ser descrita por distribuições, a confiabilidade do sistema é, na verdade, dependente do tempo. Neste caso, a equação acima pode ser reescrita como:

$$R_{System}(t) = R_{GERADOR}(\mathrm{t}).R_{RELE}(\mathrm{t}).R_{DISJUNTOR}(t) \qquad (12)$$

A confiabilidade do sistema para qualquer intervalo de tempo pode agora ser calculada, por exemplo, considerando o sistema em série representado na Figura 4, com as seguintes taxas de falha (falhas por hora):

- Gerador: $\lambda G = 9{,}05 \times 10^{-6}$
- Relé: $\lambda R = 0{,}1 \times 10^{-6}$
- Disjuntor: $\lambda D = 0{,}23 \times 10^{-6}$

A expressão analítica da confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_S(t) = R_G(\mathrm{t}).R_{\mathrm{R}}(\mathrm{t}).R_D(t)$$
$$R_S(t) = e^{-\lambda_G t}.e^{-\lambda_R t}.e^{-\lambda_D t} \qquad (13)$$
$$R_S(t) = e^{-(\lambda_G+\lambda_R+\lambda_D)t}$$

Para 43800 horas em operação (cinco anos), a confiabilidade do sistema é:

$$R_S(t) = e^{-(0{,}00000905+0{,}0000001+0{,}00000023).43800} = 0{,}6631 \qquad (14)$$

O resultado da confiabilidade para Rs(43800) foi calculado em 0,6631 ou 66,31%. Este resultado é representado na Figura 5.

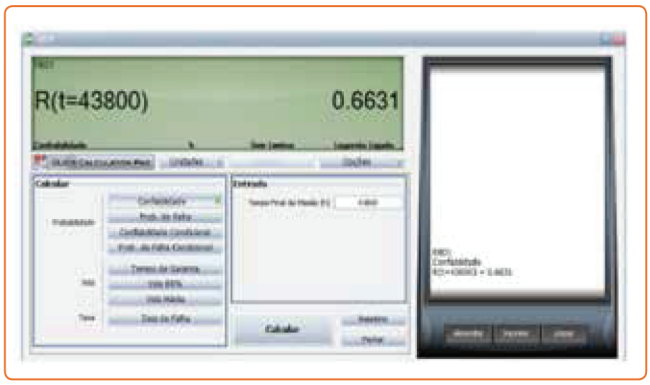

Figura 5 – Cálculo de confiabilidade realizado pelo software.

O resultado também pode ser observado graficamente na Figura 6.

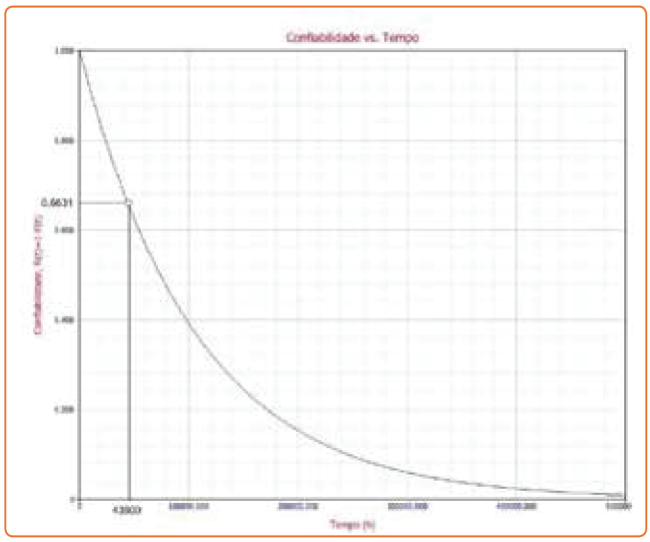

Figura 6 – Curva de confiabilidade gerada pelo software.

Com o objetivo de obter a função densidade de probabilidade, f(x), do sistema, é calculada a derivada da função de confiabilidade, conforme demonstrado a seguir:

$$f_s(\mathrm{t}) = -\frac{d\left[R_s(t)\right]}{dt}$$

$$f_s(\mathrm{t}) = -\frac{d\left[e^{-(\lambda_G+\lambda_R+\lambda_D)t}\right]}{dt} \qquad (15)$$

$$f_s(\mathrm{t}) = \left(\lambda_G + \lambda_R + \lambda_D\right).e^{-(\lambda_G+\lambda_R+\lambda_D)t}$$

A taxa de falha do sistema é calculada por meio do quociente da função densidade de probabilidade e da função de confiabilidade, obtidas anteriormente.

$$\lambda_s(\mathrm{t}) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)}$$

$$\lambda_s(\mathrm{t}) = \frac{\left(\lambda_G + \lambda_R + \lambda_D\right).e^{-(\lambda_G+\lambda_R+\lambda_D)t}}{e^{-(\lambda_G+\lambda_R+\lambda_D)t}} \qquad (16)$$

$$\lambda_s(\mathrm{t}) = \lambda_G + \lambda_R + \lambda_D$$

$$\lambda_s(\mathrm{t}) = 9{,}38.10^{-6}(\mathit{falhas}\,/\,\mathrm{hora})$$

Este resultado é representado na Figura 7, extraída da simulação realizada com o software.

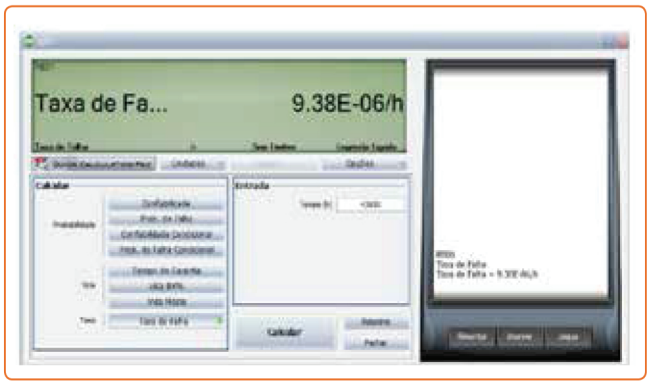

Figura 7 – Cálculo de taxa de falha realizado pelo software.

Calculando o tempo médio para falha, tem-se:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_G + \lambda_R + \lambda_D} \qquad (17)$$

$$MTTF = \frac{1}{9{,}38.10^{-6}} = 106609{,}81h$$

Este resultado é representado na Figura 8, extraída da simulação realizada. A diferença de 51,12 horas (0,48%) decorre dos arredondamentos realizados pelo software.

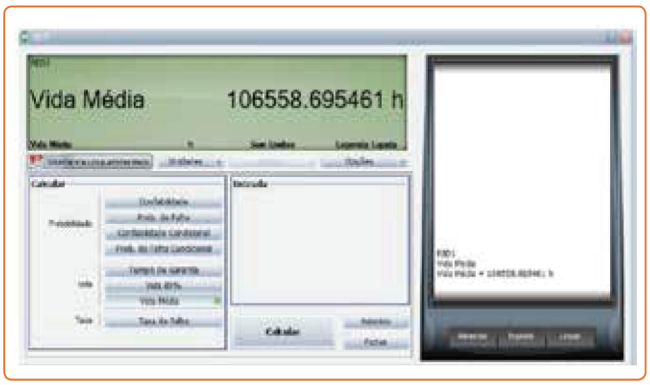

Figura 8 – Cálculo do tempo médio para falha realizado pelo software.

As informações de manutenção e reparo podem ser parametrizadas e consideradas no estudo, realizado através da simulação de eventos discretos. Neste caso, tempos aleatórios de falha são gerados pelo software para cada componente do sistema. Esses tempos de falha são, então, combinados de acordo com a configuração do sistema. Os resultados são analisados de modo a determinar o comportamento do sistema nessas condições.

O software divide a manutenção em três técnicas: manutenção corretiva, manutenção preventiva e inspeções. As ações de manutenção preventiva e corretiva não são instantâneas. Há um tempo associado a cada ação. Este tempo considera o item em manutenção indisponível.

Dessa forma, para sistemas reparáveis, o tempo em operação não é contínuo. Isto significa que o ciclo de vida é descrito por uma sequência de estados disponíveis e indisponíveis. O sistema opera até falhar e é restaurado à sua condição original. Irá falhar novamente após um período de operação aleatório, e será reparado novamente, e assim sucessivamente. Quando se considera a manutenção preventiva, o sistema pode ser reparado antes da sua falha, retomando a sua condição original. Neste caso, as variáveis aleatórias são o tempo para falha e tempo para reparo.

O próximo capítulo tratará resumidamente da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade, apresentando o resumo histórico e os principais atributos desta metodologia.

Referências

- *Araújo, E. G. "Confiabilidade aplicada a sistemas elétricos industriais". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de São João Del-Rei. Minas Gerais, 2011.*
- *ASQ's Foundations in Quality – Module Six: Quantitative Methods. American Society for Quality, 2000.*
- *Certified Quality Engineer Primer. 9ª Edição. Quality Council of Indiana, 2012. 878p.*
- *Conlon, J. C.; Lilius, W. A.; Tubbesing, F. H. "Test and Evaluation of System Reliability, Availability and Maintainability". Department of Defense. Report Number 3235.1-H. Washington D.C., 1982*
- *Cunha, J. B. F. "Raciocínio baseado em caso: uma aplicação em manutenção de máquinas e equipamentos". Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.*
- *Ferreira, E. "Análise de confiabilidade de sistemas redundantes de armazenamento em discos magnéticos". Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. 2003.*
- *Gambirasio, G. "Confiabilidade de sistemas elétricos". Universidade de São Paulo, 1980.*
- *NASA - National Aeronautics and Space Administration. "Systems Engineering Handbook". Washington D.C. 2007. 360p.*
- *Pereira, F. J. D.; Sena, F. M. V. "Fiabilidade e sua Aplicação à Manutenção". Editora Publindústria, 2012. 200p.*
- *Queiroz, A. R. S. Estratégia de manutenção de equipamentos elétricos em unidades offshore de produção de petróleo e gás baseada na filosofia de operações integradas. Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2016.*
- *Reliasoft. Disponível em www.reliawiki.org/index.php/Main_Page.*
- *Rigone, E. "Metodologia para implantação da manutenção centrada na confiabilidade: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em conhecimento e lógica Fuzzy". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.*
- *Siewiorek, D. P.; Swarz, R. S. "The Theory and Practice of Reliable Systems Design". Editora Digital Press. 1982. 772p.*
- *Stapelberg, R. F. "Handbook of Reliability, Maintainability and Safety in Engineering Design". Editora Springer. Londres, 2009. 827p.*

**Alan Rômulo Silva Queiroz é engenheiro eletricista graduado pela Universidade Santa Cecília (Santos – SP), mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.*

Eduardo César Senger é engenheiro eletricista e doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professor livre-docente na área de Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade de São Paulo e coordenador do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos (Lprot).

Luciene Coelho Lopez Queiroz é bacharel em Ciências da Computação graduada pela Universidade Católica de Santos e mestre em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br