

# Metodologia para Análise de Confiabilidade Dinâmica Utilizando o Método de Monte Carlo

Eduardo Yuji Sakurada  
IFSC, Brasil

Acires Dias, Heitor Azuma Kagueiama  
UFSC, Brasil

Bernardo Luís Rodrigues de Andrade  
USP, Brasil

## 1. INTRODUÇÃO

Confiabilidade dinâmica é uma análise cujo comportamento dinâmico do sistema é levado em consideração na elaboração de seu modelo comportamental, sendo este influenciado pelas condições de operação, das falhas e das manutenções realizadas ao longo de seu ciclo de vida. Os primeiros trabalhos sobre o assunto surgiram na década de 1980, porém o conhecimento sobre o assunto ainda não atingiu maturidade e sua utilização encontra-se principalmente no meio acadêmico.

A análise de confiabilidade dinâmica é mais complexa do que uma análise de confiabilidade estática, ou clássica, devido ao maior número de variáveis envolvidas. Com isso, surgiu o trabalho desenvolvido em 2013 no Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP/UFSC) denominado de ACoDi – Análise de confiabilidade dinâmica.

A metodologia ACoDi é constituída por seis etapas, que inicia com a avaliação do sistema, onde se verifica a necessidade de realizar análise de confiabilidade dinâmica até a implementação computacional.

Assim, o artigo apresenta a metodologia com foco na implementação computacional, na qual foi utilizado o método de Monte Carlo.

Para validação dos resultados foi utilizado um estudo de caso de referência apresentado em 2004, em um *workshop* organizado pela associação italiana 3ASI (*Associazione degli Analisti dell'Ambiente, dell'Affidabilità e della Sicurezza Industriale*).

## 2. Análise de confiabilidade dinâmica

A primeira publicação encontrada sobre confiabilidade dinâmica foi apresentada por Siljak [1], que a define como "análise de confiabilidade aplicada a sistemas dinâmicos". Devooght [2] define que "confiabilidade dinâmica é o termo utilizado para a teoria de confiabilidade relacionada com sistemas dinâmicos".

Outras abordagens estão relacionadas com análise de confiabilidade humana [3,4], sistemas tolerantes a falhas[5,6] e análise probabilística do risco com atualização dinâmica das probabilidades [7] – o dinamismo pode estar presente nas ações humanas, ou nas configurações do sistema ou nas atualização das informações do modelo.

Em síntese a análise de confiabilidade dinâmica pode ser classificada em três grupos:

- a) Avaliação periódica da confiabilidade, com atualização dos dados ao longo do tempo.
- b) Avaliação da confiabilidade em função do comportamento dinâmico das variáveis de processo do sistema.
- c) Avaliação da confiabilidade influenciada pelos fatores humanos e do ambiente.

Neste trabalho foi adotada a seguinte definição:

Confiabilidade dinâmica é uma análise de confiabilidade aplicada em sistemas cuja modelagem comportamental tem características dinâmicas, onde ocorrem mudanças ao longo do tempo na configuração do sistema, nas variáveis de estado do sistema ou em alguma característica de seus componentes, que em função das mudanças observadas, ações são tomadas ao longo do tempo a fim de impedir a falha do sistema técnico [8].

A seção seguinte apresenta a metodologia proposta para a análise de confiabilidade dinâmica.

### 3. Metodologia proposta para análise de confiabilidade dinâmica

A metodologia utilizada nesse trabalho, Figura 1, foi desenvolvida no Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP/UFSC), sendo denominada de ACoDi —Análise de confiabilidade dinâmica. Esta metodologia pode ser aplicada para avaliar produtos em qualquer fase do ciclo de vida do produto. Contudo, neste trabalho toma-se por referência os dados de uso de um sistema técnico para reprojetar para a confiabilidade, a partir do projeto conceitual, no contexto da metodologia PRODIP [9].

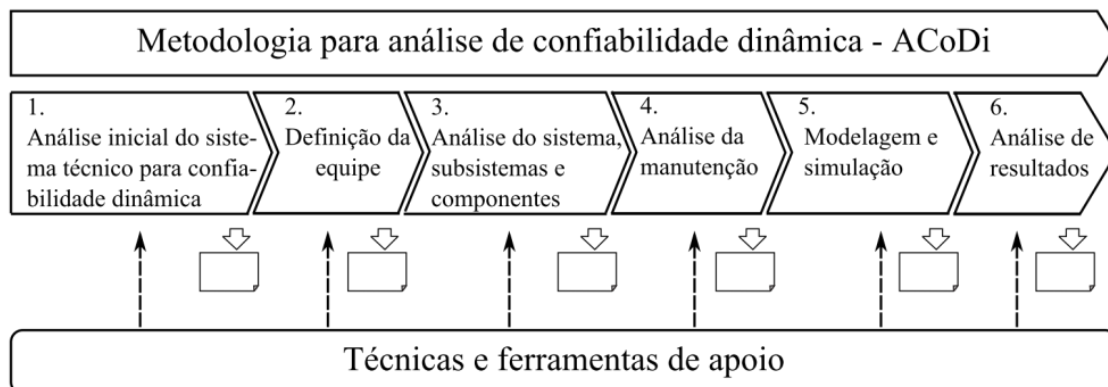


Figura 1 – Metodologia para análise de confiabilidade dinâmica – ACoDi [8]

A metodologia é constituída por seis etapas:

1. Análise inicial do sistema técnico para confiabilidade dinâmica.
2. Definição da equipe.
3. Análise do sistema, subsistemas e componentes.
4. Análise da manutenção.
5. Modelagem e simulação.
6. Análise dos resultados.

A pesquisa contempla todas as etapas, porém o foco deste artigo está na implementação computacional e nos resultados.

#### 3.1 Etapa 1 – Análise inicial do sistema técnico para confiabilidade dinâmica

A primeira ação é verificar a pertinência em se aplicar a análise de confiabilidade estática ou dinâmica. Para tanto considera-se os seguintes critérios: comportamento do sistema, criticidade e disponibilidade.

A Figura 2 exemplifica o comportamento dinâmico de um sistema. Neste caso, a variável  $y(t)$  monitora o cumprimento da função do sistema e pode encontrar-se em uma das três regiões: região de operação normal, região de emergência ou região de falha.

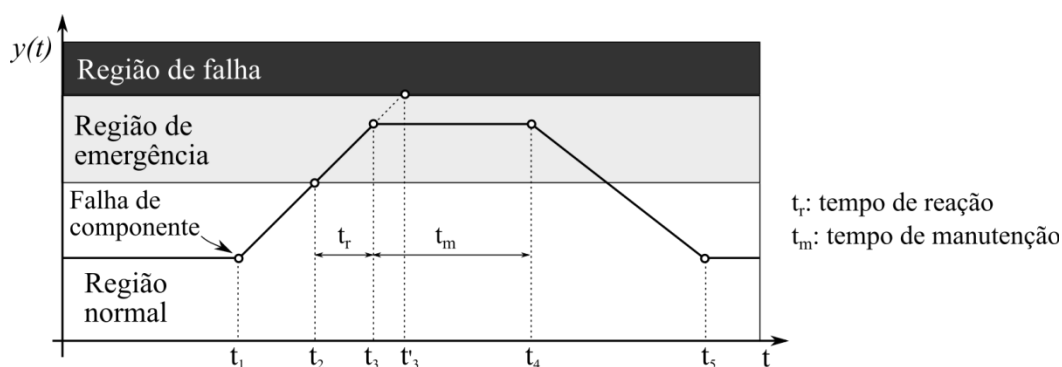


Figura 2 – Exemplo de comportamento dinâmico [8]

Uma falha ocorrida no tempo  $t_1$  conduz a variável  $y(t)$  em direção à região de emergência; a partir da qual, há um tempo para tomada de ação e impedir que alcance a região de falha. Caso não seja tomada nenhuma ação a variável atinge a região de falha em  $t_3$ . No entanto, se existir alguma ação de operação ou

manutenção, pode-se salvar o sistema, mantendo na condição de emergência ou, o que seria mais desejável, trazer o sistema para a condição de operação normal conforme o ponto apresentado no tempo  $t_5$ .

Assim, o que distingue uma análise estática de uma dinâmica é a região de emergência. Os sistemas que possuem uma região de emergência muito estreita (estático), não permitem tomada de ação para recuperação do sistema. Por outro lado, se a região de emergência é ampla, existe um tempo maior para as tomadas de ação que irão bloquear ou recuperar o sistema – isso caracteriza um sistema com comportamento dinâmico.

### 3.2 Etapa 2 – Definição da equipe

A equipe deve ser composta por profissionais que irão fornecer dados para simular o comportamento do sistema (dados técnicos, condições de operação, dados de falha, manutenção, etc) e desenvolver a implementação computacional.

### 3.3 Etapa 3 – Análise do sistema, subsistema e componentes

O sistema deve ser desdobrado em módulos ou em subsistemas e componentes. Faz-se a identificação dos subsistemas/componentes que irão participar da análise e caracterização dos possíveis estados.

Por exemplo, a Figura 3 apresenta um componente modelado com dois estados e a Figura 4 um outro com seis estados. Portanto, é preciso caracterizar os componentes que irão participar do estudo quanto a seus estados e também saber a taxa de transição (evento estocástico) ou regra (evento determinístico) para a mudança de estados.

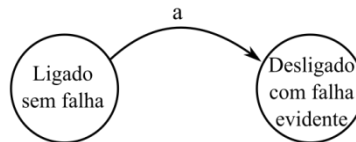


Figura 3 – Componente com apenas dois estados [8]

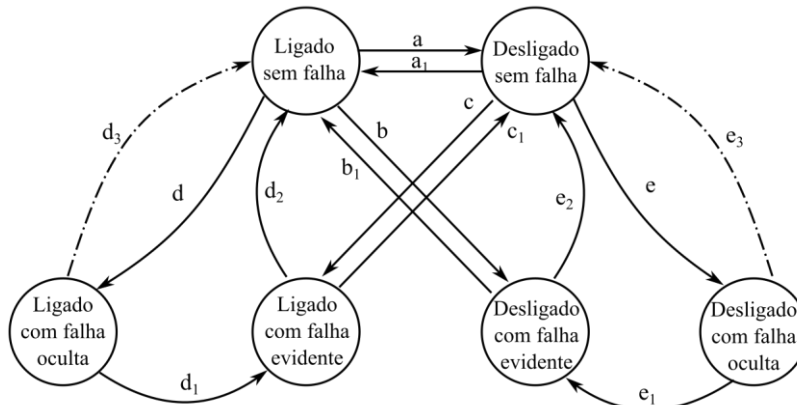


Figura 4 – Componente com seis estados [8]

Após a caracterização dos componentes, faz-se a descrição comportamental do sistema quanto à sua reação às mudanças nas condições de operação ao ligar/desligar e às falhas dos componentes. Portanto, é preciso ter uma equação ou tabela que, em função dos estados, represente o comportamento do sistema.

### 3.4 Etapa 4 - Análise de manutenção

Nesta etapa faz-se a caracterização dos sensores, controladores, atuadores, regiões de operação, emergência e falha; e a modelagem do comportamento do sistema em função da manutenção.

De uma forma geral, os **sensores** são responsáveis pela leitura da variável de controle ( $y(t)$  da Figura 2), as quais são enviadas para um controlador e definem a condição normal emergência e falha. Dependendo deste valor, o **controlador** pode acionar os **atuadores** para que sejam tomadas medidas para controlar o processo.

### 3.5 Etapa 5 – Modelagem e simulação

Nesta etapa é realizada a implementação computacional do sistema, levando-se em conta as características de operação e de manutenção de maneira integrada. Para isso, destacam-se quatro elementos que irão tratar as informações necessárias para as simulações do modelo, que são: ações humanas, equipamentos, processos dinâmicos e o software (gerenciador).

A Figura 5 apresenta o fluxo das informações que transitam em uma simulação de análise de confiabilidade dinâmica. As ações humanas, equipamentos, processos dinâmicos e *software* estão representadas nas caixas cinzas.

As ações humanas estão relacionadas com a operação e manutenção do equipamento e definem o tipo de manutenção (série, paralelo ou sem manutenção) e o tempo de reação da equipe.

Os limites de operação, bem como as configurações do sistema, são obtidos de equipamentos, que por sua vez também fornece informações sobre os estados dos componentes para o elemento descrito como processos dinâmicos.

Dentro de processos dinâmicos existem relações (equações, tabelas ou regras) que representam o comportamento dinâmico da variável de controle  $y(t)$ , e de suas derivadas, em função do tempo e dos estados dos componentes.

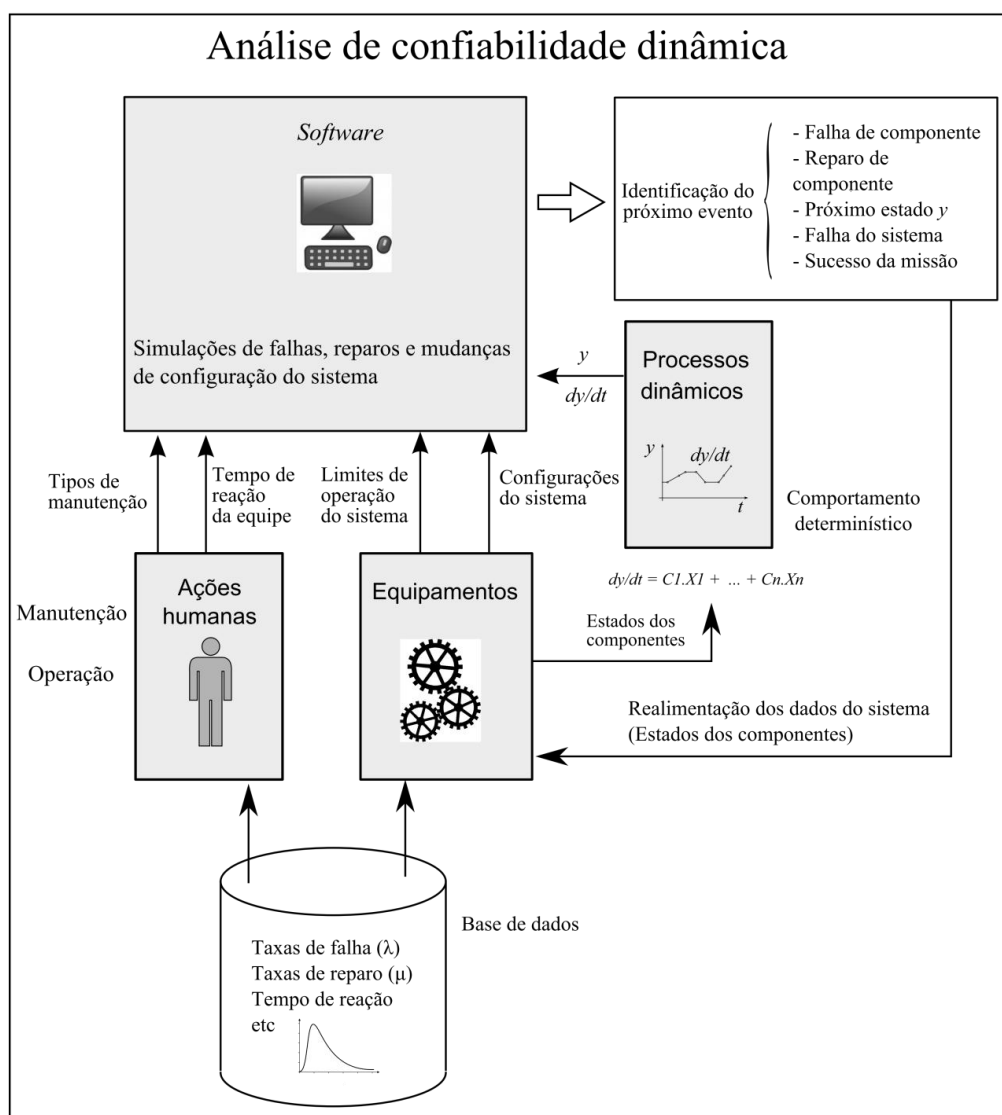


Figura 5 – Fluxo de informação na análise de confiabilidade dinâmica [8]

O *software* é o principal elemento na simulação, pois processa as informações vindas das ações humanas, equipamentos e processos dinâmicos. Sua função é identificar o próximo evento e o tempo em que irá ocorrer, que podem ser: falha de um componente, reparo de um componente, próximo estado de  $y$  (variável de controle), falha do sistema ou sucesso da missão. Desta forma, a simulação segue orientada a

eventos, consequentemente, é realizada em um tempo de processamento mais curto do que se ocorresse por meio de uma simulação por incrementos fixo de tempo.

A simulação é baseada no Método de Monte Carlo e o número de ciclos tem relação direta com os resultados obtidos. Quanto maior o número de ciclos, melhores serão os resultados em detrimento do custo computacional, que será maior.

A análise possui duas partes, uma estocástica outra determinística. A parte estocástica está relacionada com as falhas dos componentes e a parte determinística está relacionada com as regras ou modelos matemáticos do comportamento do sistema.

A Figura 6 apresenta um fluxograma utilizado na implementação computacional. Os eventos estocásticos ocorrem no sorteio dos tipos de falha, dos tempos de falha e dos tempos de reparo dos componentes. Os eventos determinísticos ocorrem dentro das rotinas Controlador e Cálculo de  $dy/dt$ .

A rotina que representa o Controlador altera os estados dos componentes em função dos valores da variável de controle  $y(t)$ , dispara ações de manutenção e altera o estado dos componentes após serem mantidos.

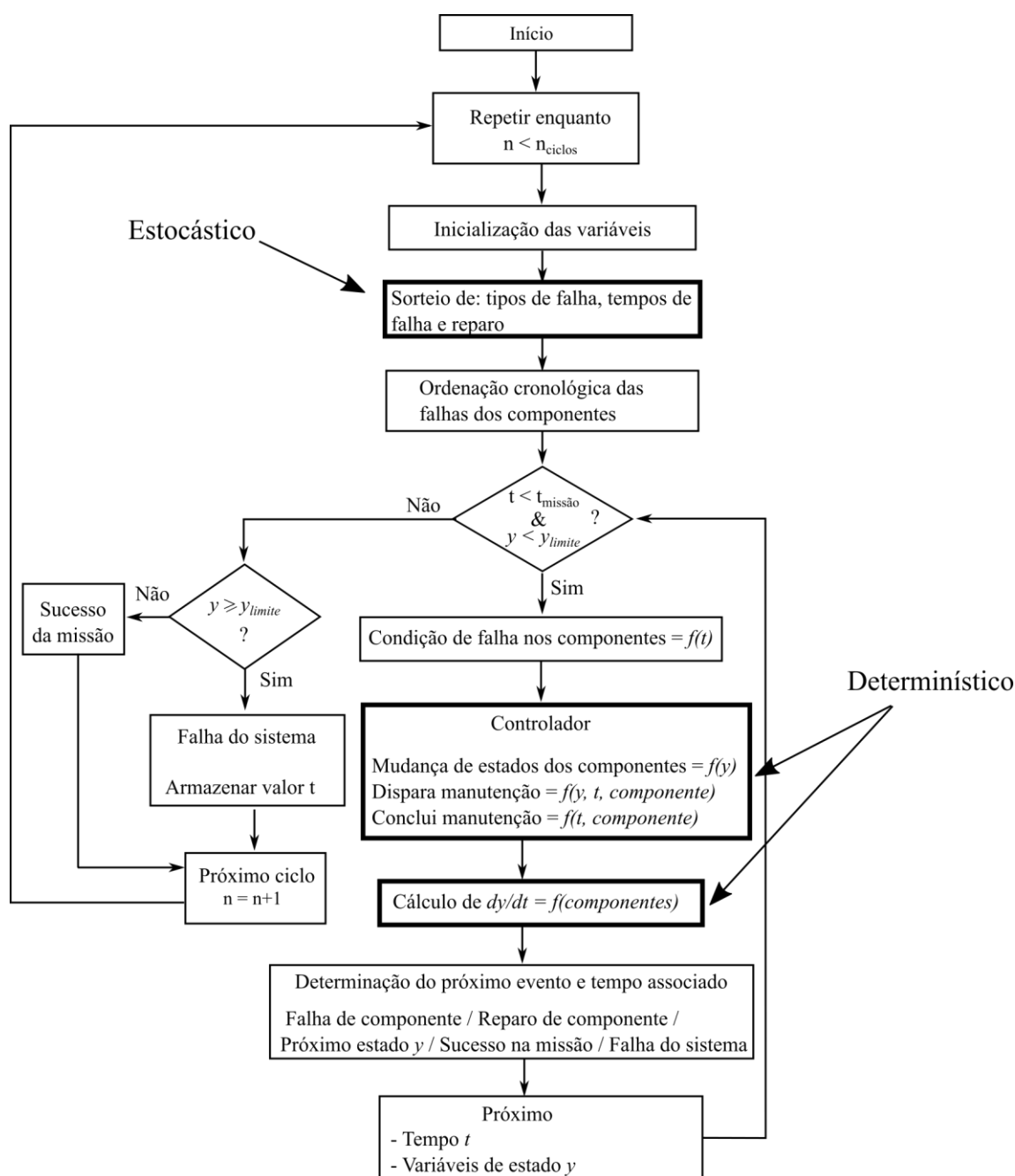


Figura 6 – Implementação computacional [8]

Cada ciclo na simulação pelo Método de Monte Carlo é interrompido quando o tempo de missão é atingido ou quando ocorre a falha do sistema.

Com o registro dos tempos de falha, dos tempos de reparo e do comportamento da variável de controle determina-se qual evento irá ocorrer primeiro. Assim, é feito o avanço no tempo até próximo evento e os dados são atualizados (estados dos componentes e variável de controle).

### 3.6 Etapa 6 – Análise de resultados

Os resultados das simulações são apresentados conforme a Figura 7. São gerados gráficos de acompanhamento da variável de controle (cenários de falhas) junto com relatórios, os quais apresentam os estados dos componentes em cada ponto, o tempo e os valores da variável de controle.

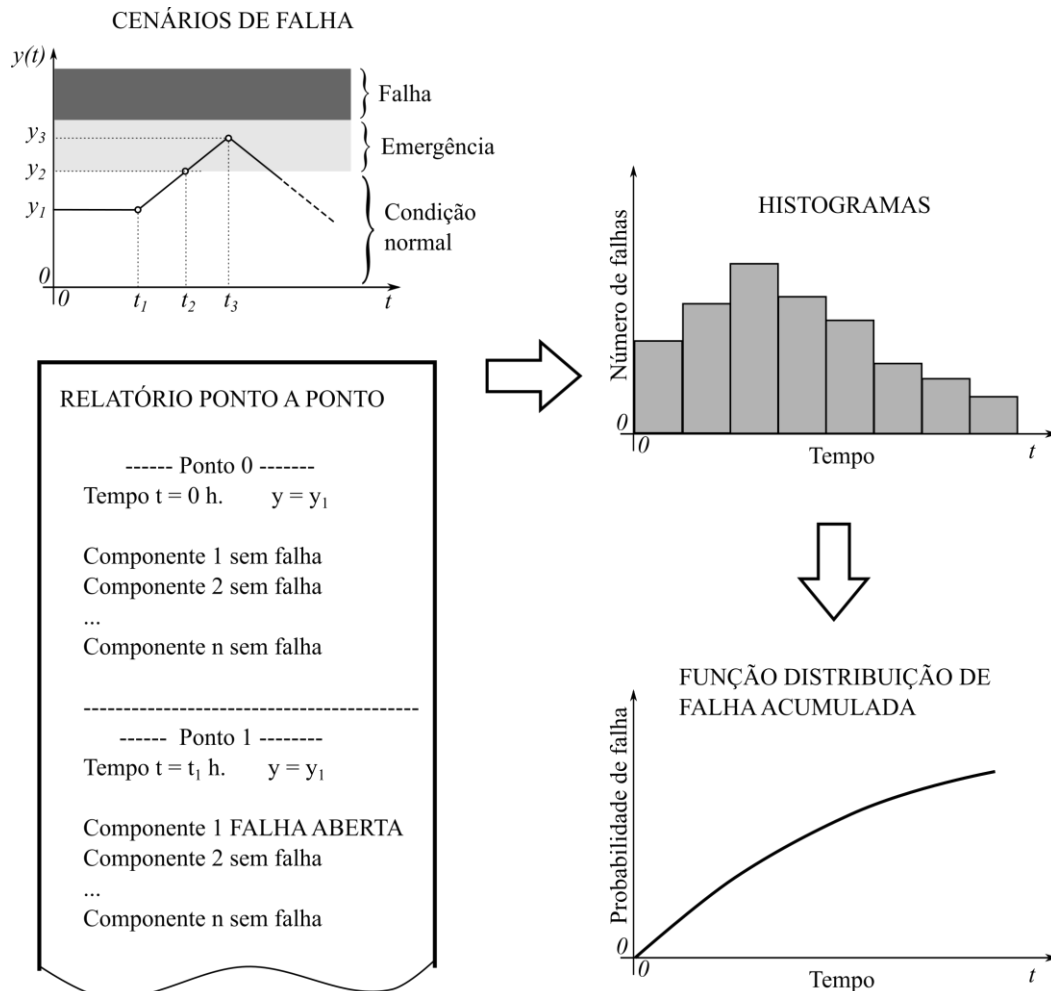


Figura 7 – Saídas obtidas em uma simulação de confiabilidade dinâmica

Por fim, são construídos histogramas e também gráficos da função distribuição de probabilidade de falhas. Portanto, com o resultado das simulações é possível:

- Melhorar o projeto do sistema técnico;
- melhorar os procedimentos de operação e manutenção do sistema;
- visualizar os cenários de falhas mais críticos;
- determinar as probabilidades de falha ou confiabilidade do sistema.

A próxima seção apresenta um estudo de caso onde a análise de confiabilidade dinâmica foi aplicada em um problema onde se deseja controlar o nível de fluido de um reservatório.

#### 4. Estudo de caso

A Figura 8 ilustra o problema a ser analisado, que consiste de um reservatório de fluido cujo o nível deve ser controlado pela atuação de duas bombas, P1 e P2, para enchimento e uma válvula V para drenagem. As falhas dos itens, junto com as ações do controlador, fazem com que o reservatório tenha uma variação de nível ao longo do tempo. Assim, neste sistema deseja-se evitar as falhas por transbordamento e por esvaziamento do reservatório.

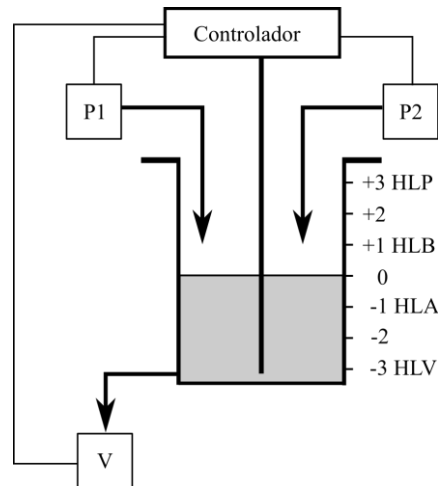


Figura 8 – Estudo de caso analisado  
Fonte: Adaptado de Codetta-Raiteri e Bobbio [10]

Inicialmente, o sistema opera com a bomba P1 ligada, bomba P2 desligada, válvula V ligada e nível  $H=0$ . Caso ocorra uma tendência de esvaziamento, quando o nível  $H=-1$  (HLA), o controlador comanda o fechamento da válvula V e o acionamento das bombas P1 e P2. Se ocorrer uma tendência de transbordamento, quando o nível  $H=+1$  (HLB), o controlador desliga as bombas (P1 e P2) e aciona a válvula V para drenagem do reservatório. Cada um dos componentes (bomba P1, bomba P2 e válvula V) contribui para uma variação de nível de 0,6 m/h.

##### 4.1 Estados dos componentes

A Figura 9 apresenta os possíveis estados que cada componente do sistema pode assumir. As transições de estados "a" e "a<sub>1</sub>" são determinadas pelo controlador do sistema. Os componentes podem passar para condições de falha evidente por meio das transições "b" e "c". Na transição "b", o componente está inicialmente em uma condição operacional "ligado" e muda para "desligado". Por outro lado, na transição "c" o componente inicialmente estava "desligado" e passa para "ligado".

A falha é denominada de evidente quando houver uma mudança em relação ao estado operacional. Por exemplo, o componente estava ligado e com a falha passa para desligado. No caso do componente travar em um estado operacional, indicado pelas transições "d" e "e", denota-se a ocorrência de falha oculta, pois não houve mudança no estado operacional. Desta forma, somente quando for solicitada a mudança de estado pelo controlador que a falha ficará evidente, transições "d<sub>1</sub>" e "e<sub>1</sub>".

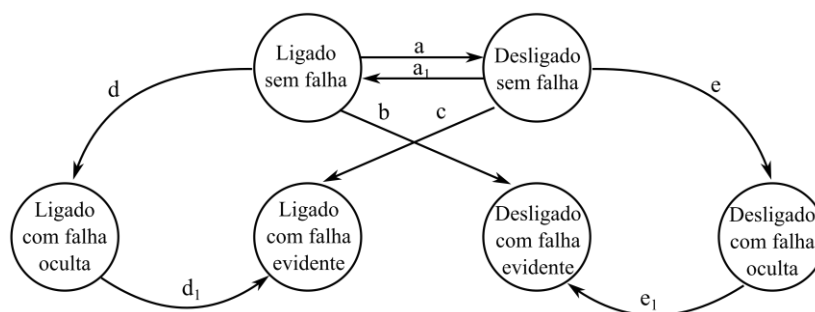


Figura 9 – Possíveis estados de cada componente [8]

As transições "a", "a<sub>1</sub>", "d<sub>1</sub>" e "e<sub>1</sub>" ocorrem por meio do controlador e as transições "b", "c", "d" e "e" estão associadas com as taxas de falha,  $\lambda$ , cujos valores estão apresentados na Tabela 1.

Vale destacar que as taxas de falha são tanto para falha aberta como fechada. Assim, dado que tenha ocorrido uma falha, a probabilidade de ser aberta ou fechada é de 50%.

Tabela 1 – Taxa de falha de cada componente

Componente	Taxa de falha (Falhas/hora)
Bomba P1	0,004566
Bomba P2	0,005714
Válvula V	0,003125

#### 4.2 Falha no sistema e tempo de missão

A falha no sistema ocorre quando ocorre o transbordamento ( $H=+3$ ) ou esvaziamento ( $H=-3$ ). O tempo de missão para cada simulação é de 1000 horas. Assim, após o tempo de missão, mesmo que o nível do reservatório alcance os valores extremos, a falha não é contabilizada.

#### 4.3 Simulações

O Método de Monte Carlo tem como base a realização de testes. Quanto maior a quantidade de testes, melhores serão os resultados obtidos na simulação. Neste trabalho, para a construção de cada um dos histogramas, foram realizados 10 mil testes. Para observar a dispersão dos resultados, foram gerados 100 histogramas, o que resulta em um total de um milhão de testes.

Cada teste de simulação do sistema técnico resulta em falha (transbordamento ou esvaziamento) ou sucesso da missão. Adicionalmente, é possível gerar um gráfico com cenário de falha, que é o comportamento dinâmico da variável de controle  $H$ .

A Figura 10 apresenta um cenário onde ocorreu falha por esvaziamento do reservatório e a variável  $H$  alcançou o valor -3.

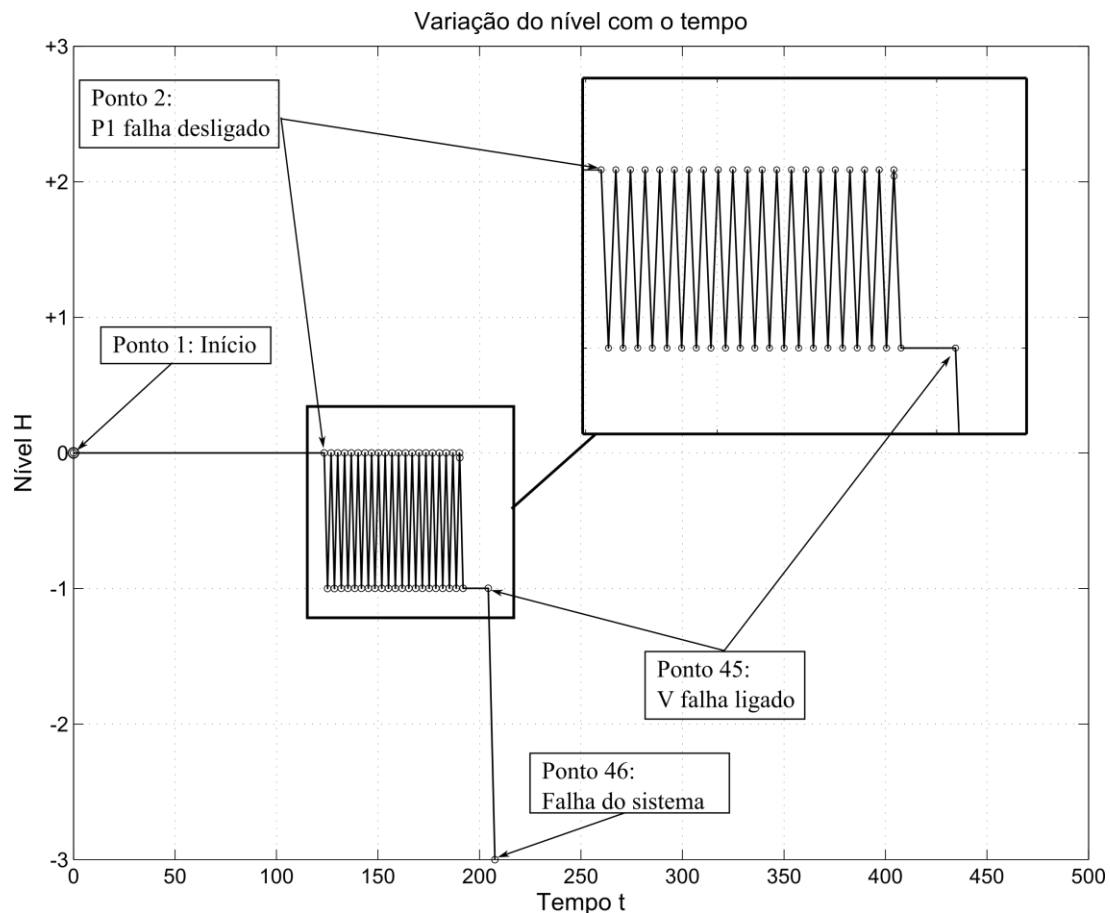


Figura 10 – Exemplo de um cenário de falha por esvaziamento



O comportamento oscilatório é caracterizado por falha na bomba P1 (desligada). Consequentemente, o nível do reservatório cai até alcançar o nível  $H=-1$ . Neste momento, o controlador fecha a válvula V e aciona a bomba P2, que irá funcionar até o nível voltar em  $H=0$ . Nesse ponto, o controlador entende que a condição do sistema é normal então a bomba P1 é ligada em conjunto com a válvula V e a bomba P2 é desativada; mas como P1 está com falha, o nível volta a cair. Assim, o comportamento oscilatório se repete até a ocorrência da falha na válvula V, indicada no ponto 45 no cenário de falha.

A Figura 11 apresenta uma parte do relatório usado para acompanhar cada ponto do gráfico apresentado no cenário de falha. Os pontos 1, 2, 45 e 46 destacados no relatório, correspondem aos identificados no cenário de falha indicados na Figura 10.

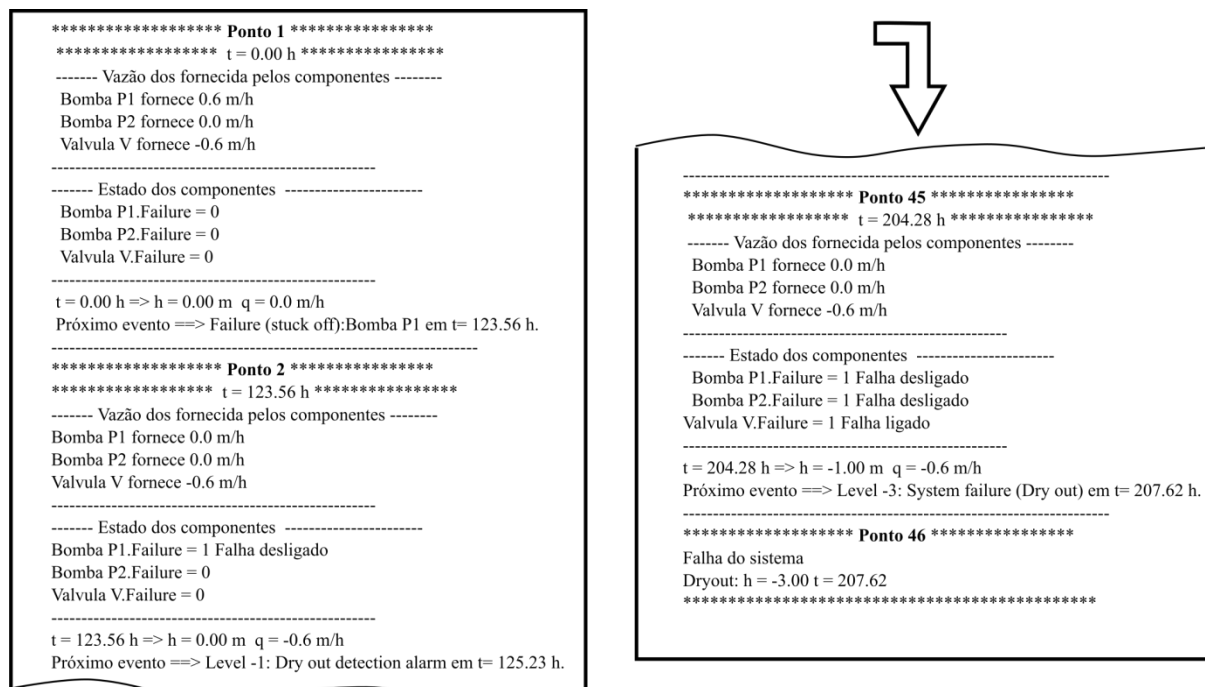


Figura 11 – Relatório

#### 4.4 Resultados

Os histogramas de falhas obtidos com a simulação foram convertidos em gráficos de função densidade de falha acumulada onde apenas os valores máximos e mínimos, para um intervalo de confiança de 99%, foram apresentados. Graficamente, quase não é possível visualizar a diferença entre as curvas de máximos e mínimos, pois tiveram pouca dispersão, vide Figura 12 e Figura 13.

Os resultados foram comparados com os estudos desenvolvidos por Cordetta-Raitteri e Bobbio [9], que utilizaram Redes de Petri Fluidas Estocásticas (FSPN) e Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN).

A Figura 12 apresenta a função distribuição acumulada de falha para o caso de transbordamento. Inicialmente, verifica-se que a curva obtida com a metodologia ACoDi fica um pouco acima da curva gerada por GSPN, mas na medida que o tempo avança para 1000 h (tempo de missão), há uma maior aproximação dos resultados.

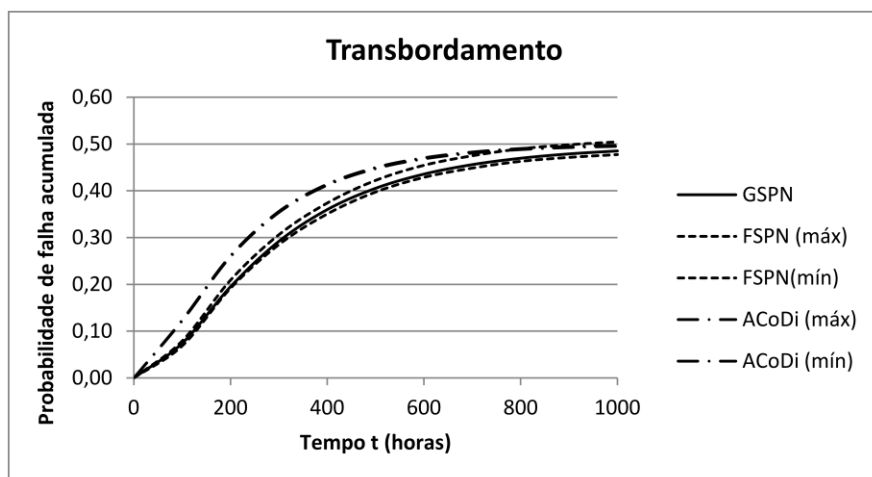


Figura 12 – Função distribuição acumulada de falhas para transbordamento [8]

A Tabela 2 apresenta os valores de probabilidade de falha acumulada para o caso de transbordamento. Os valores de FSPN e ACoDi apresentados são médias entre o valores máximos e mínimos. Ao analisar os valores da tabela é possível perceber, quantitativamente, as diferenças obtidas entre as três metodologias.

Tabela 2 – Probabilidade de falha acumulada para transbordamento [8]

Tempo	GSPN	FSPN (média)	ACoDi (média)
0	0	0	0
100	0,074208	0,073900	0,123115
200	0,195182	0,200500	0,260212
300	0,292146	0,295600	0,354831
400	0,359876	0,362200	0,413167
500	0,405374	0,409800	0,448473
600	0,435689	0,441600	0,469305
700	0,455953	0,461700	0,481649
800	0,469595	0,476300	0,489149
900	0,478857	0,484900	0,493553
1000	0,485200	0,491000	0,496168

A Figura 13 apresenta a função distribuição acumulada de falha para o caso de esvaziamento do reservatório. Neste caso também, no início do tempo t, a curva obtida com a metodologia ACoDi fica acima das curvas geradas por Redes de Petri, mas a diferença diminui à medida que se aproxima do tempo de missão de 1000 horas.

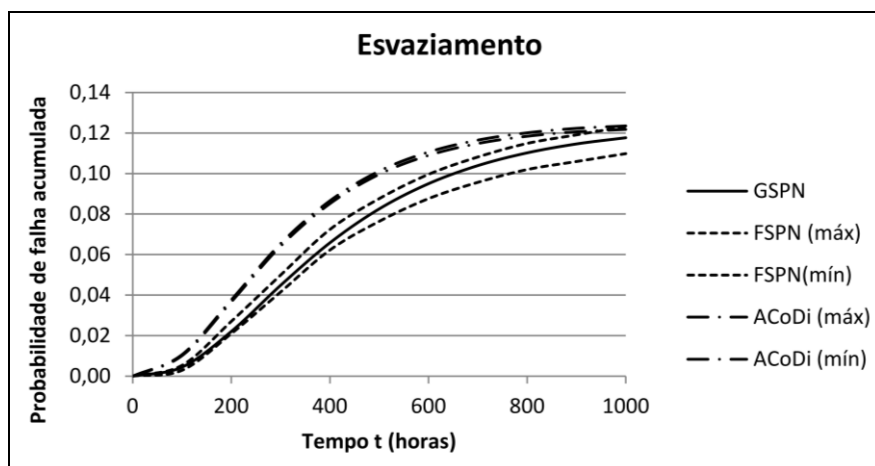


Figura 13 – Função distribuição acumulada de falhas para esvaziamento [8]

A Tabela 3 apresenta os valores de probabilidade de falha acumulada para o caso de esvaziamento. A diferença entre os valores das probabilidades falha diminui na medida que o tempo  $t$  aumenta.

Tabela 3 – Probabilidade de falha acumulada para esvaziamento [8]

Tempo	GSPN	FSPN (média)	ACoDi (média)
0	0	0	0
100	0,004463	0,004100	0,010374
200	0,022077	0,024000	0,037172
300	0,044846	0,045700	0,064799
400	0,065827	0,067300	0,085846
500	0,082568	0,082000	0,100424
600	0,095014	0,093600	0,109787
700	0,103939	0,101900	0,115661
800	0,110227	0,108400	0,119255
900	0,114622	0,112500	0,121460
1000	0,117689	0,116500	0,122651

Ao comparar os valores de probabilidade de falha para o tempo de missão de 1000 horas, a diferença entre os valores obtidos com GSPN e ACoDi fica em torno de 2% para falha por transbordamento e 4% para falha por esvaziamento.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo apresentar uma nova metodologia para avaliação da confiabilidade dinâmica de sistemas. Para isto desenvolveu-se uma ferramenta computacional que realiza esta avaliação empregando o método de Monte Carlo para realizar uma simulação baseada em eventos, do comportamento do sistema. O método mostrou-se bastante adequado pois dispensa a necessidade de interface gráfica e pode ser implementado em qualquer linguagem de programação, desde que haja capacidade para gerar números aleatórios em grande quantidade.

A ferramenta computacional foi desenvolvida com o uso do software Matlab, que tem a capacidade de gerar mais do que 21492 valores aleatórios antes de começar a repetir a série [11]. Para validação da ferramenta uma simulação de um sistema simples para o qual havia resultados disponíveis para comparação, na literatura. Nestas simulações, cada histograma de falha foi gerado com 10 mil testes e demandou aproximadamente sete minutos de processamento computacional. Após a geração de 100 histogramas percebeu-se que a dispersão obtida foi pequena, visto que as curvas com os valores máximos e mínimos, para um intervalo de confiança de 99% ficaram bastante próximas. Estes resultados indicam que uma quantidade menor de testes pode ser feita para reduzir o tempo de processamento.

Comparando os resultados com simulações realizadas com incremento de tempo fixo, a simulação realizada nesse trabalho demanda um tempo de processamento menor. A principal razão para isso se deve à simulação ser orientada a eventos, ou seja, busca-se identificar qual será o próximo evento e quando irá ocorrer no tempo.

A comparação dos resultados com simulações empregando redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN), também foram satisfatórias. Para o tempo de missão de 1000 horas, houve uma diferença de aproximadamente 2% para falha por transbordamento e 4% para falha por esvaziamento.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] SILJAK, D. *Large-Scale Dynamic Systems: Stability and Structure*. 1. ed. New York: Elsevier Science Ltd, 1978. 432 p.

- [2] DEVOOGHT, J. Dynamic reliability. In: LEWINS, M. B. J. (Ed.). *Advances in Nuclear Science and Technology*. New York: Springer, 1997. v. 25, p. 215–278.
- [3] MENEZES, R. C. S.; DROGUETT, E. L. Análise da confiabilidade humana via redes Bayesianas: uma aplicação à manutenção de linhas de transmissão. *Produção*, Scielo, v. 17, p. 162 – 185, 04 2007. ISSN 0103-6513.
- [4] MATURANA, M. Aplicação de Redes Bayesianas na análise da contribuição do erro humano em acidentes de colisão. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- [5] MOURA, M. J. C. Processos semi markovianos e redes bayesianas para avaliação de indicadores de desempenho de confiabilidade de sistemas complexos tolerantes à falha. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Produção, 2006.
- [6] DOMÍNGUEZ-GARCÍA, A.; KASSAKIAN, J.; SCHINDALL, J.; ZINCHUK, J. An integrated methodology for the dynamic performance and reliability evaluation of fault-tolerant systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 93, n. 11, p. 1628–1649, 2008.
- [7] RODRIGUEZ, C. P. Análise de risco em operações de “offloading”– Um modelo de avaliação probabilística dinâmica para a tomada de decisão. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- [8] SAKURADA, E. Y. Metodologia para análise de confiabilidade dinâmica. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.
- [9] BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. *Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, concepção e modelagem*. Barueri, SP: Editora Manole, 2008.
- [10] CODETTA-RAITERI, D.; BOBBIO, A. Stochastic petri nets supporting dynamic reliability evaluation. *International Journal of Materials & Structural Reliability*, v. 4, p. 65–77, March 2006.
- [11] MOLER, C. B. *Numerical computing with MATLAB*. [S.l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.