

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE CENTRÍFUGAS DE AÇÚCAR NO SETOR SUCROALCOOLEIRO COM APLICAÇÃO DA MODELAGEM BASEADA EM CADEIAS DE MARKOV

Celso Aurélio de Moraes Lima

Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Av. Universitária 1.440, Setor Universitário, Goiânia, GO
enghariacelso@gmail.com

Maria José Pereira Dantas

Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Av. Universitária 1.440, Setor Universitário, Goiânia, GO
mjpdantas@gmail.com

RESUMO

Este artigo objetiva desenvolver uma avaliação de confiabilidade sobre os dados de falhas de centrífugas de açúcar em um processo de produção sucroalcooleira. A pesquisa possui abordagem quantitativa com aplicação do método estudo de caso. A metodologia do estudo foi baseada na aplicação das cadeias de Markov para modelagem de espaço-estados de um sistema de centrifugação. Através da coleta de dados, determinaram-se as taxas de falha (λ) e reparo (μ) para os componentes da centrífuga. Modelos analíticos foram propostos, com geração de diagramas espaço-estados, para cada subsistema de componentes. Mediante reduções, obtiveram-se 02 modelos equivalentes: o de uma centrífuga de açúcar e o do sistema de centrifugação composto por 04 centrífugas em paralelo. Com o primeiro modelo equivalente, estabeleceu-se a curva de confiabilidade $R(t)$ da centrífuga que foi de 93% para 24 horas de operação contínua. A probabilidade do sistema de centrifugação operar com 04 centrífugas disponíveis é de 93,9%.

PALAVRAS CHAVE: Cadeias de Markov, Confiabilidade, Centrífugas de Açúcar.

Áreas principais: Pesquisa Operacional na Indústria, Modelagem Probabilística.

ABSTRACT

This article aims to develop a reliability evaluation about the data faults of sugar centrifuge in a sugarcane production line. The research has a quantitative approach using the case method study. The methodology of the study was based on the application of Markov chains for modeling space-states of a centrifugation system. By collecting data, it was determined failure (λ) and repair (μ) rates for the components of the centrifuge. Analytical models have been proposed for each subsystem components, generating diagrams space-states. Upon reduction afforded 02 equivalent models: first, a sugar centrifuge, and second, the centrifugation system consisting of 04 centrifuges in parallel. With the first equivalent model, the reliability curve $R(t)$ of the centrifuge was established, which was 93% to 24 hours of continuous operation. The probability of the centrifugation system operate with 04 centrifuges available is 93.9%.

KEYWORDS: Markov Chain, Reliability, Sugar Centrifuge.

Main area: Operational Research in Industry, Probabilistic Modeling.

1. Introdução

Nas últimas décadas o setor sucroalcooleiro vem se posicionando com grande destaque no cenário econômico nacional. O [Ministério da Agricultura 2016] informou que o agronegócio responde por mais da metade de todas as vendas externas do Brasil até o primeiro trimestre de 2016, sendo o setor sucroalcooleiro o quarto maior exportador com US\$ 737,29 milhões.

Segundo estudo realizado por [Filho 2010], para a Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, apesar da grande relevância diante da economia nacional e dos elevados índices de produção do setor, o setor sucroalcooleiro tem enfrentado nos últimos anos umas das piores crises da sua história. A crise já resultou no endividamento de vários grupos empresariais que acreditaram na prosperidade do setor, fazendo altos investimentos para o aumento de produção.

Frente aos desafios impostos pela crise sucroalcooleira, torna-se imprescindível a gestão estratégica e eficaz das fábricas de açúcar e etanol, na busca incessante por competitividade e eficiência industrial. [Popescu e Radu 2011] afirmam que uma posição estratégica apropriada para qualquer empresa depende principalmente de dois fatores: o primeiro, os seus recursos e capacidades; o segundo, a condição do seu ambiente industrial. Uma empresa com boas capacidades e recursos, poderá tirar proveito disso de maneira inteligente, com boas escolhas de mix de produção e melhorias nos produtos. Desta forma, a capacidade industrial, bem como sua confiabilidade, se tornam palavras-chave na competitividade das indústrias de maneira geral.

Neste contexto, segundo [Pinjala et al. 2006], a manutenção industrial assume um papel fundamental, pois as estratégias de manutenção influenciam diretamente em alguns aspectos competitivos dos negócios (capacidade e confiabilidade). Assim, ferramentas probabilísticas que possam auxiliar na gestão estratégica de manutenção, determinando a confiabilidade de equipamentos e sistemas industriais, são valiosas e essenciais. Dentre essas ferramentas, a Modelagem de Cadeias de Markov (MCM) têm tido destaque no campo de estudos sobre confiabilidade, sendo o principal objeto deste estudo.

O objetivo deste artigo é aplicar a MCM na avaliação da confiabilidade de centrífugas de açúcar de uma indústria sucroalcooleira. As centrífugas de açúcar são equipamentos considerados críticos em virtude de toda a produção voltada ao açúcar, obrigatoriamente, ser direcionada ao processo de centrifugação, dependendo, neste estágio, de poucas centrífugas disponíveis.

Neste trabalho, a seção 2 apresenta uma abordagem teórica sobre a MCM. A seção 3 demonstra o método desenvolvido. Na seção 4 são apresentados os resultados do estudo de caso para a avaliação de confiabilidade do sistema de centrifugação. Por fim, as conclusões e comparações são abordadas na seção 5.

2. Abordagem Teórica

Ao projetar um novo sistema ou tentar melhorar um já existente, o engenheiro tenta antecipar futuros padrões de operação do sistema. Inevitavelmente, a previsão é feita com um modelo da realidade, que por predefinição, nunca permite representar a realidade em todos os detalhes. O modelo baseia-se nas informações disponíveis sobre as interações entre os componentes do sistema, interação do sistema com o meio ambiente, e dados relacionados com as propriedades dos componentes do sistema. Todos estes aspectos correlacionam-se para determinar como o sistema transita em seus estados possíveis, determinando seu comportamento. Com o modelo, perguntas podem ser feitas sobre o futuro do sistema, por exemplo, em termos de suas falhas, peças sobressalentes, as equipes de reparos, inspeções, manutenção, produção e tudo o que for de interesse. [Zio 2013].

2.1. Processos de Markov

Andrei Markov, em 1907, realizou estudos de processos e suas características, denominados atualmente por processos de Markov. A particularidade principal destes processos é que a maneira em que o passado influencia no futuro condiciona-se, basicamente, no presente,

em outras palavras, o passado e o futuro são essencialmente independentes se o presente é conhecido. [Cunha 2009].

A Modelagem de Cadeias de Markov (MCM) tem sido estudada nos mais diversos campos de aplicação. [Landon et al. 2013] desenvolveram a MCM para avaliação de confiabilidade de softwares. [Liu et al. 2014] aplicaram o método de Markov em uma análise de confiabilidade dos sistemas elétricos de controle de submarino. [Horestani et al. 2013] utilizaram a MCM para um estado equivalente de um compensador estático de potência reativa, o qual possui importância fundamental nos sistemas elétricos. [Valakevicius et al. 2013] modelaram uma planta de cogeração elétrica através da MCM. [Sefidgaran et al. 2011] aplicaram a MCM no estudo de confiabilidade de transformadores elétricos.

A modelagem simples de Markov presume que comportamento das falhas de componentes ou sistemas podem ser representadas por distribuições exponenciais. Métodos avançados, como o Semi-Markov, permitem modelagens com outras distribuições de probabilidade. [Malefaki et al. 2014] adotaram Semi-Markov para aperfeiçoamento de manutenções periódicas. [Veeramany e Pandey 2011], apresentaram estudos com Semi-Markov para avaliação de confiabilidade de componentes de resfriamento de água no setor nuclear, utilizando distribuição de Weibull. Embora considere a relevância dessas propostas, este trabalho se ocupa apenas da abordagem tradicional da MCM.

2.1.1. Modelagem de Cadeias de Markov (MCM)

Para a MCM pressupõe-se que as taxas de falha (λ) e reparo (μ) do componente ou sistema (equipamento) em estudo sejam constantes. O modelo adota a distribuição exponencial para representação do equipamento. Uma característica fundamental é que o modelo não possui memória, isto é, seu passado não interfere no seu futuro, a não ser seu estado anterior ao estado presente.

A essência para a simplificação de uma rede de Markov aos modelos equivalentes é definir equações desenvolvidas para sistemas em série, onde todos os componentes devem operar para o sistema se manter operante, e para sistemas em paralelo, em que é necessário somente um componente operar para que o sistema esteja operante. Estas equações são então utilizadas para reduzir um sistema complexo em simples (equivalente). [Zhang 1998].

Segundo [Zhang 1998], para a representação de um componente com dois estados possíveis, operando (1) e reparando (2), as Equações (1) e (2) determinam as probabilidades de permanência em cada estado.

$$P_1 = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (1) \quad P_2 = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (2)$$

Para sistemas em série, Figura 1, [Rausand 2004] demonstra como calcular valores equivalentes para as probabilidades dos estados operando (P_{S1}) e reparando (P_{S2}), por meio das Equações (3) e (4). Para determinação dos valores equivalente de λ_s e μ_s utilizam-se as Equações (5) e (6). O tempo de reparo equivalente (t_s) é obtido pela Equação (7).

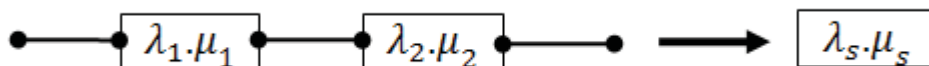


Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema em série

Fonte: Os autores (2016)

$$P_{S1} = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} \quad (3)$$

$$P_{S2} = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} \quad (4)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5)$$

$$\mu_s = \frac{P_{s1}}{1-P_{s1}} \cdot \lambda_s \quad (6) \quad t_s = \frac{\prod_{i=1}^n (\lambda_i \cdot t_i + 1) - 1}{\lambda_s}, \text{ onde } t_i = P_{i1} \cdot \lambda_s \quad (7)$$

Para sistemas em paralelo, Figura 2, [Rausand 2004] determina os valores equivalentes para as probabilidades dos estados operando (P_{p1}) e reparando (P_{p2}), por meio das Equações (8) e (9). Para calcular dos valores equivalente de λ_p e μ_p utiliza-se as Equações (10) e (11). O tempo de reparo equivalente (t_p) é obtido pela Equação (12).

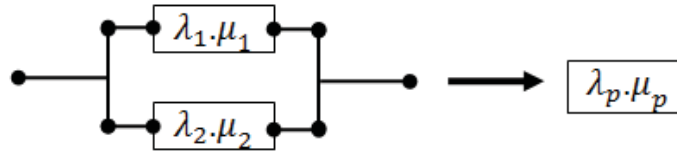


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema em paralelo

Fonte: Os autores (2016)

$$P_{p1} = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} \quad (8)$$

$$P_{p2} = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} \quad (9)$$

$$\lambda_p = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot \left[\sum_{j=1}^n \left(\prod_{i \neq j}^n t_i \right) \right]}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i \cdot t_i + 1) - \prod_{i=1}^n (\lambda_i \cdot t_i)} \quad (10)$$

$$\mu_p = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (11)$$

$$t_p = \prod_{i=1}^n t_i \cdot \left[\sum_{j=1}^n \left(\prod_{i \neq j}^n t_i \right) \right]^{-1}, \text{ onde } t_i = P_{i1} \cdot \lambda_s \quad (12)$$

Define-se o termo confiabilidade como sendo a probabilidade de um equipamento permanecer sem falhas durante um tempo estabelecido (t). Para determinação da confiabilidade $R(t)$ de um componente ou sistema considerando uma distribuição exponencial, [Lafraia 2014] apresenta a Equação (13).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (13)$$

3. Metodologia

Uma boa metodologia no desenvolvimento da MCM é a garantia de resultados satisfatórios e confiáveis. Esta pesquisa se ateve à metodologia adotada na pesquisa de [Sefidgaran, et al. 2011], no estudo de confiabilidade de transformadores elétricos por modelagem de Markov. Basicamente, a metodologia consiste nos itens exibidos na Figura 3.

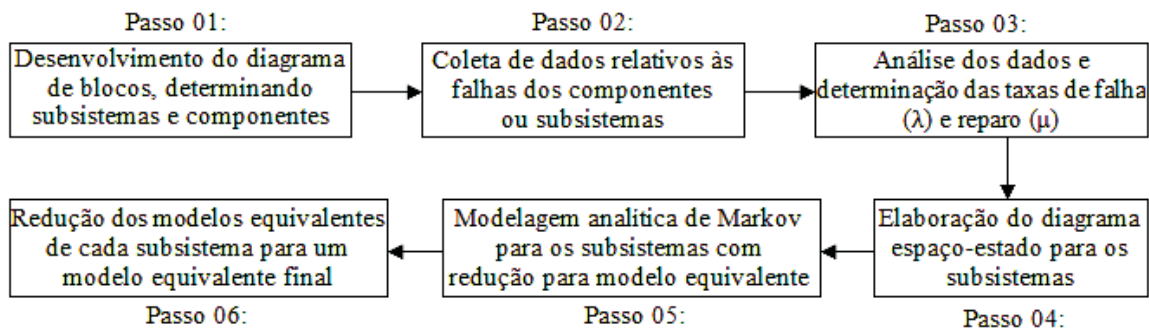


Figura 3 – Metodologia do estudo de confiabilidade por modelagem de Markov

Fonte: Os autores (2016)

4. Estudo de Caso: Avaliação de Confiabilidade das Centrífugas de Açúcar

Esta seção é destinada a apresentar o desenvolvimento do estudo de confiabilidade aplicado às centrífugas de açúcar de uma indústria sucroalcooleira, seguindo os passos descritos na seção 3, sendo que, sucintamente, se resumem em aplicar a MCM aos itens que constituem uma centrífuga. Serão obtidas as probabilidades para cada estado possível do equipamento, em seguida, será determinada a curva de confiabilidade do equipamento.

4.1. Coleta de dados

O estudo de confiabilidade foi realizado em uma indústria produtora de açúcar, etanol e energia elétrica, localizada no sudoeste de Goiás, Brasil. A companhia contava com um sistema de registro das paradas das centrífugas de açúcar, por meio de formulários diários preenchidos e validados pelos gestores industriais.

Para a pesquisa, foram selecionados os dados referentes às 04 centrífugas automáticas de açúcar, localizadas na linha de produção denominada por Fábrica de Açúcar. Esta linha de centrifugação responde por 100% do processamento da matéria prima destinada à fabricação de açúcar, trabalhando em regime contínuo, 24 horas por dia, durante aproximadamente 8 meses (safra), com capacidade para processar até 1.800 kg/ciclo de massa A (matéria prima para a centrifugação), em que um ciclo dura aproximadamente 5 minutos.

Conforme pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 4, representando o sistema de centrifugação, as 04 centrífugas de açúcar trabalham de forma paralela. Observando o conjunto que compõe uma centrífuga, qualquer falha apresentada em um dos componentes/subsistemas será equivalente a uma parada da mesma, ou seja, por se tratar de uma linha em série, qualquer falha para a centrífuga. Além disso, falhas nos subsistemas gerais de alimentação elétrica, bem como de automação, promovem paradas de todas as centrífugas simultaneamente.

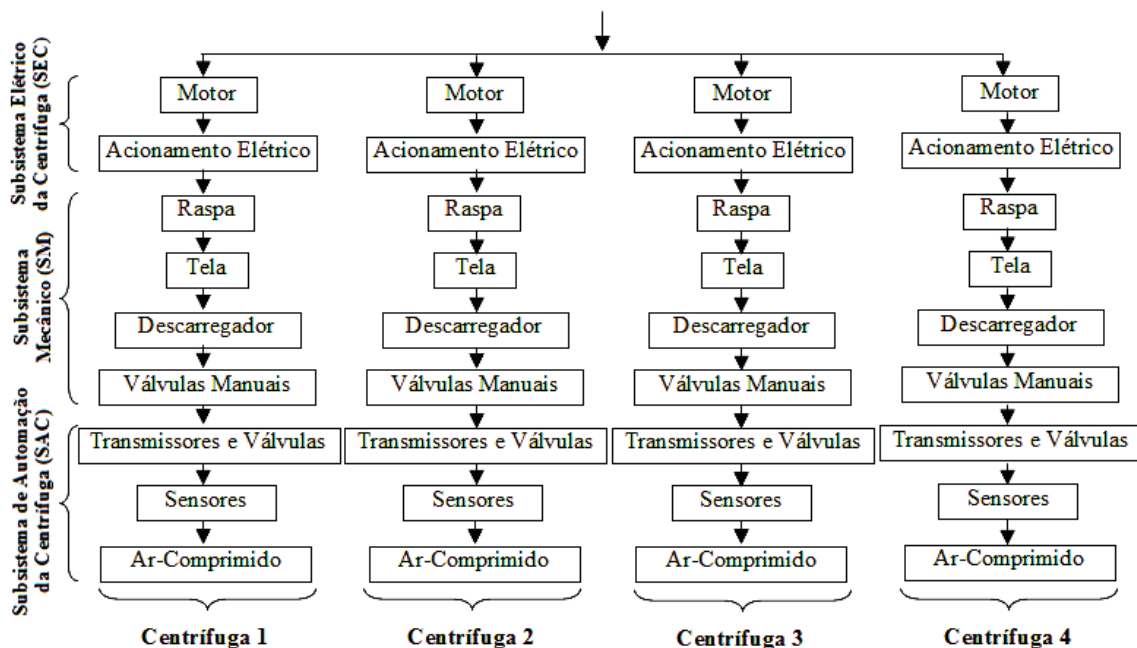


Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema de centrifugação

Fonte: Os autores (2016)

Os dados de paradas foram registrados pela companhia em formulários, contendo o tipo, o motivo e o tempo de duração. Foram utilizados os dados das paradas das 04 centrífugas automáticas de açúcar de 06/04/2015 (início da safra) a 03/12/2015 (última semana de safra), totalizando 5760 horas de observação. Por meio de dados das falhas (atribuídas às paradas), determinou-se as Taxas de Falha (λ) e Taxas de Reparo (μ) dos componentes e subsistemas, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Diagrama de blocos do sistema de centrifugação

Subsistema	Componente	Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
Subsistema elétrico da Centrífuga (SEC)	Motor (M)	λ_M	$4,4 \times 10^{-5}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_M	$1,6 \times 10^{-2}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Acionamento elétrico (AE)	λ_{AE}	$8,7 \times 10^{-5}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_{AE}	$1,3 \times 10^0$	reparo/h	Taxa de reparo
Subsistema mecânico (SM)	Raspa (R)	λ_R	$2,6 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_R	$2,0 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Tela (T)	λ_T	$3,4 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_T	$3,0 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Descarregador (D)	λ_D	$1,7 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_D	$8,6 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo
Subsistema automação da centrífuga (SAC)	Válvulas manuais (VM)	λ_{VM}	$4,4 \times 10^{-5}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_{VM}	$2,8 \times 10^{-2}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Transmissores e válvulas (TV)	λ_{TV}	$3,1 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_{TV}	$8,7 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Sensores (S)	λ_S	$1,3 \times 10^{-3}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_S	$1,7 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo
	Ar-comprimido (AC)	λ_{AC}	$4,4 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha
		μ_{AC}	$5,4 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo

Fonte: Os autores (2016)

A princípio, para o desenvolvimento da MCM, os componentes que constituem a centrífuga de açúcar foram classificados em três subsistemas: subsistema elétrico da centrífuga (SEC), subsistema mecânico (SM) e subsistema de automação (SAC).

4.2. Modelagem do Subsistema Elétrico da Centrífuga (SEC)

O subsistema elétrico das centrífugas automáticas pode falhar basicamente de 02 maneiras distintas, sendo, a primeira, falha do motor elétrico (M) responsável pela rotação da centrífuga, e, a segunda, falha do acionamento elétrico (AE) composto por um inversor de frequência e seus componentes associados. Desta maneira, são possíveis três estados do SEC, representados na Figura 5, em que o estado 01 indica M e AE operantes e sem falhas; o estado 02 indica M com falha e o estado 03 representa AE com falha. Como M e AE estão em série, conforme Figura 4, qualquer falha significa uma parada da centrífuga.

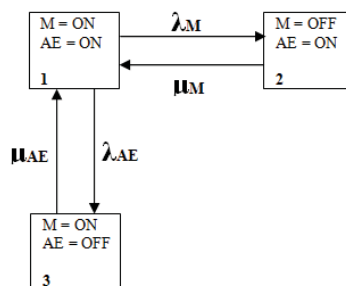


Figura 5 – Modelo espaço-estado do SEC

Fonte: Os autores, (2016).

Como os componentes estão em série, utilizando as Equações (5), (6) e (7), é possível calcular a taxa de falha (λ_{SEC}), reparo (μ_{SEC}) e o tempo de reparo (t_{SEC}) equivalentes, Equações (14), (15) e (16). Assim, encontra-se a modelagem equivalente para o SEC, Figura 6, em que o estado 1 representa SEC operando e o estado 2, SEC em falha. Por meio das Equações (17) e (18), pode-se calcular a Probabilidades de cada estado (P_{SEC1} e P_{SEC2}).

$$\lambda_{SEC} = \lambda_M + \lambda_{AE} \quad (14) \quad \mu_{SEC} = \frac{\left(\frac{\mu_M \cdot \mu_{AE}}{(\lambda_M + \mu_M) \cdot (\lambda_{AE} + \mu_{AE})}\right) \lambda_{SEC}}{1 - \left(\frac{\mu_M \cdot \mu_{AE}}{(\lambda_M + \mu_M) \cdot (\lambda_{AE} + \mu_{AE})}\right)} \quad (15)$$

$$t_{SEC} = \frac{\lambda_M \cdot t_M + \lambda_{AE} \cdot t_{AE} + \lambda_M \cdot t_M \cdot \lambda_{AE} \cdot t_{AE}}{\lambda_M + \lambda_{AE}} \quad (16) \quad P_{SEC1} = \frac{\mu_{SEC}}{(\lambda_{SEC} + \mu_{SEC})} \quad (17) \quad P_{SEC2} = 1 - P_{SEC1} \quad (18)$$

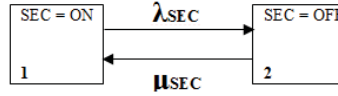


Figura 6 – Modelo espaço-estado equivalente do SEC
 Fonte: Os autores (2016)

4.3. Modelagem do Subsistema Mecânico (SM)

O subsistema mecânico das centrífugas automáticas pode falhar basicamente de 04 maneiras distintas: falha na raspa, falha na tela, falha no descarregador ou falha nas válvulas manuais. Logo, 05 estados são possíveis para o SM, sendo o estado 01 representando o SM operante, sem falha de nenhum componente e os outros 04 estados representando a falha pertinente a cada componente, conforme ilustra o diagrama de espaço-estado, Figura 7. Da mesma forma do SEC, os componentes estão em série, ou seja, a falha de qualquer componente reflete na parada da respectiva centrífuga.

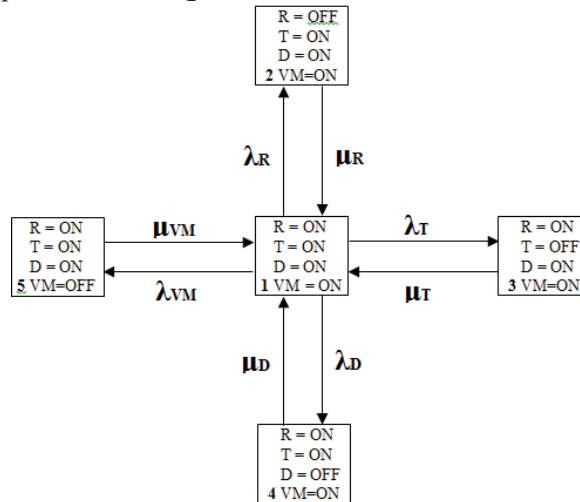


Figura 7 – Modelo espaço-estado do SM
 Fonte: Os autores (2016)

Como os componentes estão em série, utilizando as Equações (5), (6) e (7), pode-se estimar a taxa de falha (λ_{SM}), reparo (μ_{SM}) e o tempo de reparo (t_{SM}) equivalentes, Equações (19), (20), (21), (22) e (23), determinando-se a modelagem equivalente para o SM, Figura 8, em que o estado 1 representa SM operando e o estado 2, SM em falha. Por meio das Equações (24) e (25), é possível calcular a Probabilidades de cada estado (P_{SM1} e P_{SM2}).

$$\lambda_{SM} = \lambda_R + \lambda_T + \lambda_D + \lambda_{VM} \quad (19) \quad \mu_{SM} = \frac{\left(\frac{\mu_R \cdot \mu_T \cdot \mu_D \cdot \mu_{VM}}{(\lambda_R + \mu_R) \cdot (\lambda_T + \mu_T) \cdot (\lambda_D + \mu_D) \cdot (\lambda_{VM} + \mu_{VM})}\right) \lambda_{SM}}{1 - \left(\frac{\mu_R \cdot \mu_T \cdot \mu_D \cdot \mu_{VM}}{(\lambda_R + \mu_R) \cdot (\lambda_T + \mu_T) \cdot (\lambda_D + \mu_D) \cdot (\lambda_{VM} + \mu_{VM})}\right)} \quad (20)$$

$$t_1 = \frac{\lambda_R t_R \lambda_T t_T \lambda_D t_D \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_R t_R \lambda_T t_T \lambda_D t_D + \lambda_T t_T \lambda_D t_D \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_R t_R \lambda_T t_T + \lambda_R t_R \lambda_D t_D \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_R t_R \lambda_D t_D}{\lambda_R + \lambda_T + \lambda_D + \lambda_{VM}} \quad (21)$$

$$t_2 = \frac{\lambda_R t_R \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_R t_R + \lambda_T t_T \lambda_D t_D \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_T t_T \lambda_D t_D + \lambda_T t_T \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_T t_T + \lambda_D t_D \lambda_{VM} t_{VM} + \lambda_D t_D + \lambda_{VM} t_{VM}}{\lambda_R + \lambda_T + \lambda_D + \lambda_{VM}} \quad (22)$$

$$t_{SM} = t_1 + t_2 \quad (23) \quad P_{SM1} = \frac{\mu_{SM}}{\lambda_{SM} + \mu_{SM}} \quad (24) \quad P_{SM2} = 1 - P_{SM1} \quad (25)$$

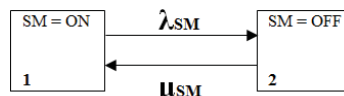


Figura 8 – Modelo espaço-estado equivalente do SM
 Fonte: Os autores (2016)

4.4. Modelagem do Subsistema de Automação da Centrífuga (SAC)

O SAC pode falhar basicamente de 03 maneiras distintas: falha nos transmissores e válvulas automáticas, falhas nos sensores ou falha na alimentação de ar-comprimido.

Para o SAC foram identificados 04 estados-espaço possíveis, Figura 9, em que o estado 1 representa o SAC operando e sem nenhuma falha de seus componentes e os outros estados representam as falhas pertinentes a cada componente. Sabe-se que os componentes do SAC estão em série, isto é, a falha de qualquer componente leva a parada da centrífuga.

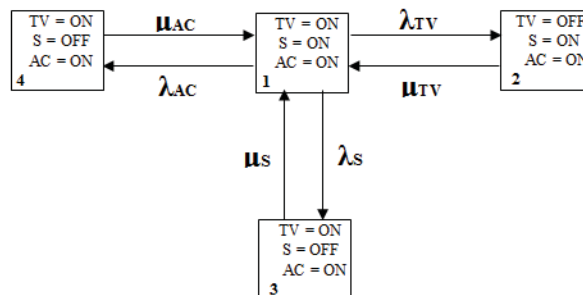


Figura 9 – Modelo espaço-estado do SAC
 Fonte: Os autores (2016)

Como os componentes estão em série, utilizando as Equações (5), (6) e (7), os valores das taxas de falha (λ_{SAC}), reparo (μ_{SAC}) e o tempo de reparo (t_{SAC}) equivalentes são encontrados utilizando as Equações (26), (27) e (28). Pode-se então chegar à modelagem equivalente do SAC, Figura 10, em que o estado 1 representa SAC operando e o estado 2 SAC em falha. Por meio das Equações (29) e (30), pode-se calcular a Probabilidades de cada estado (P_{SAC1} e P_{SAC2}).

$$\lambda_{SAC} = \lambda_{TV} + \lambda_S + \lambda_{AC} \quad (26) \quad \mu_{SAC} = \frac{\left(\frac{\mu_{TV} \cdot \mu_S \cdot \mu_{AC}}{(\lambda_{TV} + \mu_{TV}) \cdot (\lambda_S + \mu_S) \cdot (\lambda_{AC} + \mu_{AC})}\right) \lambda_{SAC}}{1 - \left(\frac{\mu_{TV} \cdot \mu_S \cdot \mu_{AC}}{(\lambda_{TV} + \mu_{TV}) \cdot (\lambda_S + \mu_S) \cdot (\lambda_{AC} + \mu_{AC})}\right)} \quad (27)$$

$$t_{SAC} = \frac{\lambda_{TV} t_{TV} \lambda_S t_S \lambda_{AC} t_{AC} + \lambda_{TV} t_{TV} \lambda_S t_S + \lambda_{TV} t_{TV} \lambda_{AC} t_{AC} + \lambda_{TV} t_{TV} + \lambda_S t_S \lambda_{AC} t_{AC} + \lambda_S t_S + \lambda_{AC} t_{AC}}{\lambda_{TV} + \lambda_S + \lambda_{AC}} \quad (28)$$

$$P_{SAC1} = \frac{\mu_{SAC}}{\lambda_{SAC} + \mu_{SAC}} \quad (29)$$

$$P_{SAC2} = 1 - P_{SAC1} \quad (30)$$

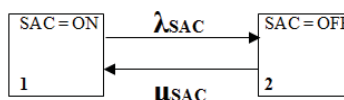


Figura 10 – Modelo espaço-estado equivalente do SM
 Fonte: Os autores (2016)

4.5. Modelagem equivalente da centrífuga de açúcar

A centrífuga de açúcar, conforme mostra o diagrama de blocos na Figura 4, é composta por três subsistemas em série, os quais foram modelados nas subseções 4.2, 4.3 e 4.4 deste artigo. Diante disso, define-se que a centrífuga de açúcar pode falhar basicamente de basicamente de 03 maneiras distintas: falha no SEC, falha no SM ou falha no SAC. Desta forma, são identificados 04 espaço-estados possíveis para a centrífuga de açúcar, Figura 11, em que o estado 1 representa a centrífuga sem falha de seus subsistemas (operante) e os outros estados representam as falhas pertinentes a cada subsistema. Sabe-se que os subsistemas estão em série, conforme apresenta a Figura 4, desta forma, qualquer falha leva a uma parada da centrífuga.

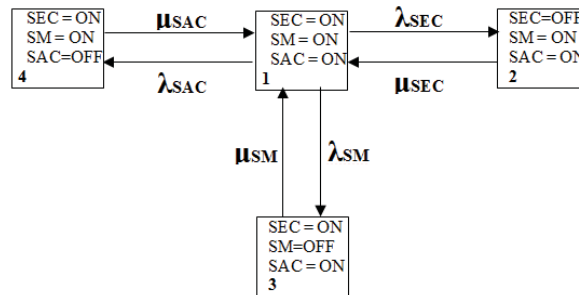


Figura 11 – Modelo espaço-estado da Centrifuga de Açúcar
Fonte: Os autores (2016)

Como os componentes estão em série, utilizando as Equações (5), (6) e (7), determina-se as taxas de falha (λ_{cent}), reparo (μ_{cent}) e o tempo de reparo (t_c) equivalentes por meio das Equações (31), (32) e (33). Desta forma é obtido a modelagem equivalente para a centrifuga de açúcar, Figura 12, em que o estado 1 representa a centrifuga operando e o estado 2, a centrifuga em falha. Por meio das Equações (34) e (35), pode-se calcular a Probabilidades de cada estado (P_{cent1} e P_{cent2}).

$$\lambda_{cent} = \lambda_{SEC} + \lambda_{SM} + \lambda_{SAC} \quad (31) \quad \mu_{cent} = \frac{\left(\frac{\mu_{SEC} \cdot \mu_{SM} \cdot \mu_{SAC}}{(\lambda_{SEC} + \mu_{SEC}) \cdot (\lambda_{SM} + \mu_{SM}) \cdot (\lambda_{SAC} + \mu_{SAC})}\right) \lambda_{cent}}{1 - \left(\frac{\mu_{SEC} \cdot \mu_{SM} \cdot \mu_{SAC}}{(\lambda_{SEC} + \mu_{SEC}) \cdot (\lambda_{SM} + \mu_{SM}) \cdot (\lambda_{SAC} + \mu_{SAC})}\right)} \quad (32)$$

$$t_c = \frac{\lambda_{SEC} t_{SEC} \lambda_{SM} t_{SM} \lambda_{SAC} t_{SAC} + \lambda_{SEC} t_{SEC} \lambda_{SM} t_{SM} + \lambda_{SEC} t_{SEC} \lambda_{SAC} t_{SAC} + \lambda_{SEC} t_{SEC} + \lambda_{SM} t_{SM} \lambda_{SAC} t_{SAC} + \lambda_{SM} t_{SM} + \lambda_{SAC} t_{SAC}}{\lambda_{SEC} + \lambda_{SM} + \lambda_{SAC}} \quad (33)$$

$$P_{cent1} = \frac{\mu_{cent}}{\lambda_{cent} + \mu_{cent}} \quad (34) \quad P_{cent2} = 1 - P_{cent1} \quad (35)$$

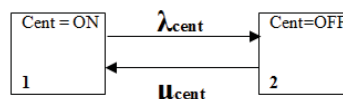


Figura 12 – Modelo espaço-estado equivalente da centrifuga de açúcar
Fonte: Os autores (2016)

4.6. Modelagem do sistema de centrifugação

O sistema de centrifugação de açúcar estudado possui 04 centrifugas trabalhando em paralelo, conforme demonstra o diagrama de blocos, Figura 4. A MCM de uma centrifuga foi desenvolvida na subseção 4.6 deste artigo. Desta forma, é possível modelar o paralelo das 04 centrifugas a fim de representar o sistema de centrifugação como um todo. Contudo, conclui-se que o sistema de centrifugação pode permanecer em 05 estados diferentes: operando com 04 centrifugas sem falha, com 03 centrifugas operando e 01 em falha, com 02 operando e 02 em falha, com 01 operando e 03 em falha ou com 04 centrifugas em falha.

As Equações (36), (37), (38), (39) e (40) nos permitem calcular as probabilidades para cada espaço-estado apresentado no modelo da Figura 13, fornecendo uma visão ampla sobre a confiabilidade do sistema, estabelecendo uma ferramenta importante para estratégias da gestão de manutenção e produção.

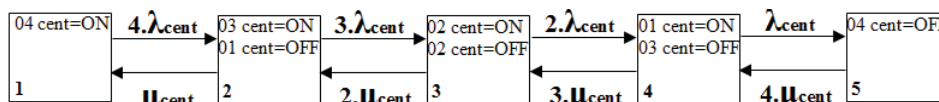


Figura 13 – Modelo espaço-estado para o Sistema de Centrifugação (SC)
Fonte: Os autores (2016)

$$P_{SC1} = \frac{\mu_{cent}}{4 \cdot \lambda_{cent} + \mu_{cent}} \quad (36) \quad P_{SC2} = \frac{4 \cdot \lambda_{cent} \cdot 2 \cdot \mu_{cent}}{(4 \cdot \lambda_{cent} + \mu_{cent}) \cdot (3 \cdot \lambda_{cent} + 2 \cdot \mu_{cent})} \quad (37)$$

$$P_{SC3} = \frac{3 \cdot \lambda_{cent} \cdot 3 \cdot \mu_{cent}}{(3 \cdot \lambda_{cent} + 2 \cdot \mu_{cent}) \cdot (2 \cdot \lambda_{cent} + 3 \cdot \mu_{cent})} \quad (38) \quad P_{SC4} = \frac{2 \cdot \lambda_{cent} \cdot 4 \cdot \mu_{cent}}{(2 \cdot \lambda_{cent} + 3 \cdot \mu_{cent}) \cdot (\lambda_{cent} + 4 \cdot \mu_{cent})} \quad (39)$$

$$P_{SC5} = \frac{\lambda_{cent}}{\lambda_{cent} + 4 \cdot \mu_{cent}} \quad (40)$$

4.7. Resultados

Por meio dos equacionamentos obtidos nas modelagens realizadas nas subseções 4.2 até 4.6, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 2, fornecendo suporte quantitativo para as avaliações e conclusões que estão apresentadas na subseção 4.8.

Tabela 2 – Resultados da modelagem de Markov

Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
λ_{SEC}	$1,31 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha do SEC
μ_{SEC}	$4,73 \times 10^{-2}$	reparo/h	Taxa de reparo do SEC
t_{SEC}	$7,26 \times 10^{-5}$	h	Tempo de reparo do SEC
P_{SEC1}	$9,97 \times 10^{-1}$	%	Probabilidade do SEC estar operando
P_{SEC2}	$2,76 \times 10^{-3}$	%	Probabilidade do SEC estar em falha
λ_{SM}	$8,20 \times 10^{-4}$	falha/h	Taxa de falha do SM
μ_{SM}	$1,92 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo do SM
t_{SM}	$2,63 \times 10^{-4}$	h	Tempo de reparo do SM
P_{SM1}	$9,96 \times 10^{-1}$	%	Probabilidade do SM estar operando
P_{SM2}	$4,26 \times 10^{-3}$	%	Probabilidade do SM estar em falha
λ_{SAC}	$2,08 \times 10^{-3}$	falha/h	Taxa de falha do SAC
μ_{SAC}	$2,25 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo do SAC
t_{SAC}	$9,88 \times 10^{-4}$	h	Tempo de reparo do SAC
P_{SAC1}	$9,91 \times 10^{-1}$	%	Probabilidade do SAC estar operando
P_{SAC2}	$9,16 \times 10^{-3}$	%	Probabilidade do SAC estar em falha
λ_{cent}	$3,03 \times 10^{-3}$	falha/h	Taxa de falha da Centrífuga de Açúcar
μ_{cent}	$1,85 \times 10^{-1}$	reparo/h	Taxa de reparo da Centrífuga de Açúcar
t_c	$3,03 \times 10^{-3}$	h	Tempo de reparo da Centrífuga de Açúcar
P_{cent1}	$9,84 \times 10^{-1}$	%	Probabilidade da Centrífuga estar operando
P_{cent2}	$1,61 \times 10^{-2}$	%	Probabilidade da Centrífuga estar em falha
P_{SC1}	$9,39 \times 10^{-1}$	%	Probabilidade do 04 Centrífugas estarem operando
P_{SC2}	$6,00 \times 10^{-2}$	%	Probabilidade do 03 Centrífugas estarem operando
P_{SC3}	$2,37 \times 10^{-2}$	%	Probabilidade do 02 Centrífugas estarem operando
P_{SC4}	$1,07 \times 10^{-2}$	%	Probabilidade do 01 Centrífuga estar operando
P_{SC5}	$4,07 \times 10^{-3}$	%	Probabilidade do 00 Centrífuga estar operando

Fonte: Os autores (2016)

4.7.1. Cálculo da confiabilidade da centrífuga de açúcar

Por meio da taxa de falha equivalente da centrífuga de açúcar (λ_{cent}) apresentada na Tabela 2, e da Equação (13), determinou-se a confiabilidade $R(t)$. A Figura 14 apresenta a curva de confiabilidade.

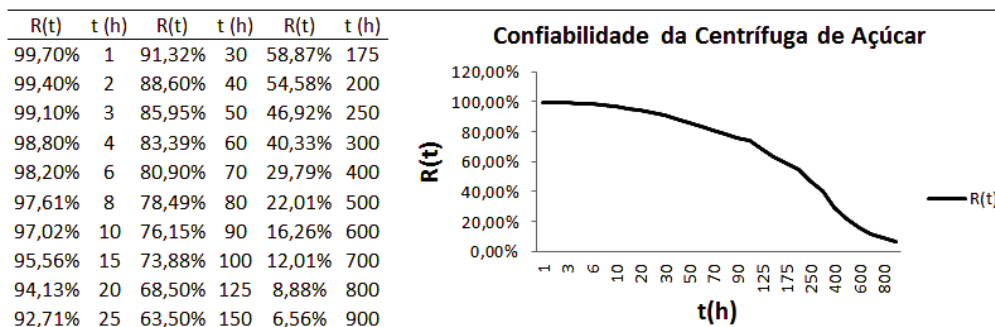


Figura 14 – Curva de confiabilidade da centrífuga de açúcar

Fonte: Os autores (2016)

5. Conclusão

A metodologia empregada neste trabalho é muito conhecida nos campos de conhecimento sobre confiabilidade. Trata-se de uma modelagem prática, frequentemente solicitada em estudos de confiabilidade, que permite visualizar aspectos importantes sobre o equipamento estudado. Embora a utilização da MCM tradicional esteja condicionada a alguns fatores, como por exemplo, o uso da distribuição exponencial, é possível compreender estados e probabilidades preciosas à avaliação de confiabilidade.

Dentre os 03 subsistemas que compõem a centrífuga, o subsistema de automação da centrífuga (SAC) apresentou uma probabilidade de estar no estado em reparo (P_{SAC1}) no valor de 0,91 – Tabela 2. Isso demonstra que este subsistema possui a menor confiabilidade e conseqüentemente tem provocado o maior número de falhas nas centrífugas. Avaliando as centrífugas de açúcar, nota-se que todos os seus estágios são automáticos, ou seja, possui um complexo sistema de automação, composto por itens relativamente sensíveis, o que reduz a confiabilidade diante das condições desfavoráveis fornecidas aos componentes do SAC, por exemplo, alta temperatura ambiente, alta vibração, alta sujidade e alta umidade.

Quanto ao modelo equivalente da centrífuga, verificou-se que a probabilidade do equipamento permanecer no estado operante (P_{cent1}) é de 0,984 – sendo um índice aceitável com oportunidades de melhoria. A probabilidade de tempo inoperante é 0,060 – o que, para produções em grande escala como a de açúcar, pode resultar em reduções de capacidade de processamento. Para um dia (24 horas) de utilização contínua da centrífuga, a curva de confiabilidade, Figura 14, exibe um valor de aproximadamente 93%. Este nível de confiabilidade é baixo para um equipamento com alta criticidade e significa dizer que o equipamento tem elevado número de falhas (paradas), mesmo que seja por curtos períodos de tempo.

A análise do sistema de centrifugação (SC), constituído por 04 centrífugas em paralelo, apresentou resultado muito importante para a gestão estratégica da companhia. Este trabalho concluiu que a probabilidade de se ter 04 centrífugas operando (P_{SC1}) é de 0,939 – conforme Tabela 2. Isto sugere que a probabilidade de SC estar operando com 03 ou menos centrífugas, é de 0,061. Logo, durante a etapa de planejamento das capacidades industriais, este valor deverá ser considerando para evitar erros no planejamento de produção. Medidas estratégicas de manutenção, juntamente com projetos de investimentos, que juntos, possam melhorar a confiabilidade das centrífugas e seus subsistemas, deverão ser adotadas. Como ideia inicial, manifesta-se a necessidade de melhoria no SAC que apresentou os piores resultados. Métodos como análise de causas raízes e a Manutenção Centrada em Confiabilidade poderão contribuir.

Referências

- CUNHA, A. M. (2009). *Movimentos de Cabeça Guiados pela Voz*. 2009. 79 f. Tese (Doutorado em Matemática). Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, IMPA, Rio de Janeiro.
- FILHO, A. B. (2010). **Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil**. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. V.2, abr. 2010. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arg_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/Fundamentos%20da%20crise%20-abr%2009%20-2%C2%AA%20edi%C3%A7%C3%A3o%20-%20PDF.pdf. Acesso em: 23 abr. 2016.
- HORESTANI, A. K.; GOLSHAN, M. E. H.; HOSEINABADI, H. H. (2013). Reliability modeling of TCR-FC type SVC using Markov process. *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier, v.55, p.305-311. [doi:10.1016/j.ijepes.2013.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.09.010).
- LAFRAIA, J. R. B. (2014). **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 5.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora - PETROBRAS. 374p.

LANDON, J.; OZEKICI, S.; SOYER, R. (2013). A Markov modulated Poisson model for software reliability. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v.229, p.404-410. [doi:10.1016/j.ejor.2013.03.014](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.014)

LIU, Z.; LIU, Y.; CAI, B. (2014). Reliability analysis of the electrical control system of subsea blowout preventers using Markov Models. *PLoS ONE*, v.9, n.11, p.1-9. [doi:10.1371/journal.pone.0113525](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113525).

MALEFAKI, S.; LIMNIOS, N.; DERSIN, P. (2014). Reliability of maintained systems under a semi-Markov setting. *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, v.131, p.282-290. [doi:10.1016/j.res.2014.05.003](https://doi.org/10.1016/j.res.2014.05.003).

MAPA – Ministério da Agricultura. (2016). Agronegócio responde por mais da metade de todas as vendas externas do Brasil em março. Abr. 2016. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2016/04/agronegocio-responde-por-mais-da-metade-de-todas-as-vendas-externas-do-brasil-em-marco>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

PINJALA, S.; PINTELON, L.; VERECKA, A. (2006). An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *International Journal of Production Economics*, v.104, n.3, p.214-229. [doi:10.1016/j.ijpe.2004.12.024](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.12.024).

POPESCU, D.; RADU, C. (2011). Strategies to increase the competitiveness of industrial products in the context of the global economic crisis. In: DAAAM – Danube Adria Association for Automation & Manufacturing. Vienna, Austria.

RAUSAND, M. (2004). **System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications**. 2.ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 636p.

SEFIDGARAN, M.; MIRZAIE, M.; EBRAHIMZADEH, A. (2011). Reliability modelo f the power transformer with ONAF cooling. *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier, v.35, p.97-104. [doi:10.1016/j.ijepes.2011.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.10.002).

VALAKEVICIUS, E.; SNIPAS, M.; RADZIUKYNAS, V. (2013). Markov chain reliability modelo f cogeneration power plant substation. *Elektronika ir elektrotechnika*, v.19, n. 5, p.61-66. [doi:10.5755/j01.eee.19.5.1214](https://doi.org/10.5755/j01.eee.19.5.1214).

VEERAMANY, A.; PANDEY, M. D. (2011). Reliability analysis of nuclear component cooling water system using semi-Markov process model. *Nuclear Engineering and Desing*, Elsevier, v.241, p.1799-1806. [doi:10.1016/j.nucengdes.2011.01.040](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.01.040).

ZHANG, W. (1998). Reliability evaluation of bulk power system using analytical and equivalent approaches. 1998. 274f. Thesis (Degree of Doctor in Electrical Engineering). University of Saskatchewan. Saskatton.

ZIO, E. (2013). **The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis**. 1.ed. London: Springer - Reliability Engineering. 198p. [doi:10.1007/978-1-4471-4588-2_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4588-2_1).