

Análise de estratégia de manutenção baseado em confiabilidade de equipamentos em uma empresa do ramo de transmissão de energia elétrica

Jorge Anderson de Moura Arlindo, Claudio Luís Piratelli

Resumo: Objetivo deste artigo é investigar se a atual estratégia de manutenção adotada pela empresa estudada (preventiva), é a mais adequada para o equipamento. O método de pesquisa foi a modelagem estatística, baseada em Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). Análises quantitativas de confiabilidade e disponibilidade foram usadas para a verificação da efetividade da atual estratégia de manutenção do equipamento. Para a pesquisa, foram coletados dados históricos de tempo até o reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF) do equipamento em estudo. Com o auxílio do software STAT FIT 2.0, foram identificadas e modeladas as distribuições mais adequadas para esses tempos: Weibull. Com os valores obtidos foi possível calcular a disponibilidade do equipamento, $A_v = 98,18\%$, e o parâmetro de forma $\alpha < 1$ da distribuição de Weibull. Foi possível posicionar o equipamento na curva da banheira, na fase de INFANTILIDADE e definir a melhor estratégia de manutenção para este caso, a corretiva. Por fim, discutiu-se a estratégia adotada atualmente pela empresa e apresentaram-se sugestões de desenvolvimento para esta estratégia.

Palavras chave: Modelagem estatística, Manutenção centrada em confiabilidade, Transmissão de energia elétrica.

Maintenance strategy analysis based on equipment reliability in a power transmission company

Abstract: The objective of this article is to investigate if the current maintenance strategy adopted by the company is the most adequate for the equipment. The research method was the statistical modeling, based on Reliability Centered Maintenance (MCC). Quantitative reliability and availability analyses were used to verify the effectiveness of the current equipment maintenance strategy. For the research, historical data from time to repair (TTR) and time between failures (TBF) of the equipment under study were collected. With the help of STAT FIT 2.0 software, the most appropriate distributions for these times were identified and modeled: Weibull. With the values obtained it was possible to calculate the availability of the equipment, $A_v = 98.18\%$, and the shape parameter $\alpha < 1$ of the Weibull distribution. It was possible to position the equipment in the curve of the bathtub, in the phase of INFANTILITY and define the best maintenance strategy for this case, the predictive one. Finally, the strategy currently adopted by the company was discussed and development suggestions for this strategy were presented.

Key-words: Statistical modeling, Reliability-centric maintenance, Electric power transmission

1. Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico e o crescimento da população, a demanda por energia elétrica vem cada vez mais aumentando, e devido a isso as produtoras de energia vem buscando maneiras de manter o fornecimento de energia elétrica mais eficiente possível.

Segundo SOUZA (2014), devido a necessidade de manter o consumidor (cliente) com abastecimento de energia elétrica ininterrupto, há uma grande preocupação das empresas de transmissão em criar rotinas de manutenção para sempre manter um nível aceitável de confiabilidade.

A ANEEL é o órgão responsável pela fiscalização dos agentes transmissores de energia elétrica quanto à ininterrupção dos seus serviços com base em requisitos específicos, para Martins e Sellitto (2006) a correta avaliação desses requisitos é importante para as empresas no direcionamento de suas estratégias e no correto investimentos de manutenção. Ainda segundo Martins e Sellitto (2006) para cada etapa de vida útil do equipamento existe uma estratégia de manutenção mais adequada a ser usada, seja ela preditiva, preventiva ou corretiva.

De acordo Rodríguez (2017) o fornecimento de energia elétrica para o consumidor de forma contínua juntamente com a busca por altos níveis de confiabilidade, tem sido um dos maiores desafios das empresas de distribuição de energia.

Kominakis et al. (2018) menciona que tradicionalmente, as estratégias de manutenção não é algo planejada com base em dados reais, mas sim elaboradas a partir da junção do conhecimento e experiência adquirida dos funcionários envolvidos e as informações dos manuais dos fabricantes, e que para se ter um melhor aproveitamento dessas estratégias deve-se haver um equilíbrio entre manutenções preditivas, preventivas e corretivas.

De acordo com Sellitto (2007), o uso da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade (RCM – Centered Maintenance) é de grande importância para a elaboração de um plano de manutenção que objetiva aumentar a confiabilidade e a disponibilidade de equipamentos.

O ambiente deste estudo é uma empresa do setor de distribuição de energia elétrica que utiliza uma estratégia de manutenção preventiva baseada em informações determinadas pelo fabricante. A questão de pesquisa que esta pesquisa quer responder é: as estratégias atuais de manutenção adotadas pela empresa são as mais adequadas para a maior disponibilidade dos equipamentos?

O objetivo desta pesquisa é avaliar se atuais estratégias de manutenção usadas pela empresa são as mais adequadas, baseando-se na confiabilidade dos equipamentos em uma empresa Transmissora de energia elétrica em corrente contínua (HVDC - High Voltage Direct Current) localizada no interior do Estado de São Paulo.

O referido trabalho de pesquisa divide-se em introdução, com a contextualização do tema; revisão literária sobre os modelos de manutenção e confiabilidade de equipamentos; análise estatística dos desligamentos ocorridos; descrição dos resultados obtidos e as considerações finais.

2. Confiabilidade e manutenção centrada na confiabilidade (MCC)

A capacidade que um equipamento tem de desempenhar sua função sob condições especificadas durante um certo período de tempo é a definição de confiabilidade de acordo com a NBR-5462, enquanto que, de acordo com Gomes et al. (2018) cita que confiabilidade é a probabilidade que um equipamento tem de sua função sob condições especificadas durante um certo período de tempo.

Lafraia (2001) diz que a confiabilidade em um equipamento está ligada diretamente a confiança que sem no mesmo para que ela não venha a falhar, e segundo ele deve ser tratada na fase de projeto, pois após a entrega do projeto quase nada pode ser feito para aumentar os níveis de confiabilidade, somente para manter os níveis aceitáveis.

Para Pereira (2009), MCC se define como método, onde através da análise quali-quantitativa

de falhas é possível reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas, e redução dos custos de manutenção, pela substituição de atividades preventivas de alto custo por procedimentos mais adequados e de menor custo. Sandhan (2013) acrescenta que reliability centered maintenance – RCM (ou MCC) é uma abordagem de melhoria industrial focada na identificação e estabelecimento de políticas operacionais, de manutenção e de melhoria de capital que gerenciarão os riscos de falha do equipamento com mais eficiência.

De acordo com Morais (2004) com RCM não somente se busca que o equipamento cumpra a função para a qual foi projetado, mas que isso seja feito de forma confiável, através de combinações e melhorias do uso das políticas de manutenção disponíveis. Para que esse objetivo seja atingido a RCM requer que as equipes envolvidas tanto na operação e manutenção dos equipamentos respondam algumas questões como: quais as consequências da falha? É possível prever ou prevenir a falha? Caso não, que outra política de manutenção pode ser utilizada para impedir a ocorrência da falha?

2.1. Curva da banheira e distribuição de Weibull

A Curva da banheira é utilizada para analisar o comportamento da taxa de falhas de um equipamento ao longo do tempo, representada por uma curva que possui a forma de uma banheira, a curva da banheira (*bathtub curve*- figura 1). Na curva são representadas as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. As fases estão associadas ao fator de forma α , que é um dos parâmetros da distribuição de Weibull que descreva a confiabilidade do equipamento (WUTTIKE e SELLITO, 2008).

Uma das maneiras de se calcular a confiabilidade e a mais comumente usada é a distribuição de Weibull (MENGUE; SELLITO, 2013; SELLITO, 2006). Por meio dela é possível atribuir a variável aleatória de interesse uma função de distribuição de probabilidade ela também fazer previsões sobre a vida de um equipamento através das análises das falhas ocorridas (LEWIS, 1996).

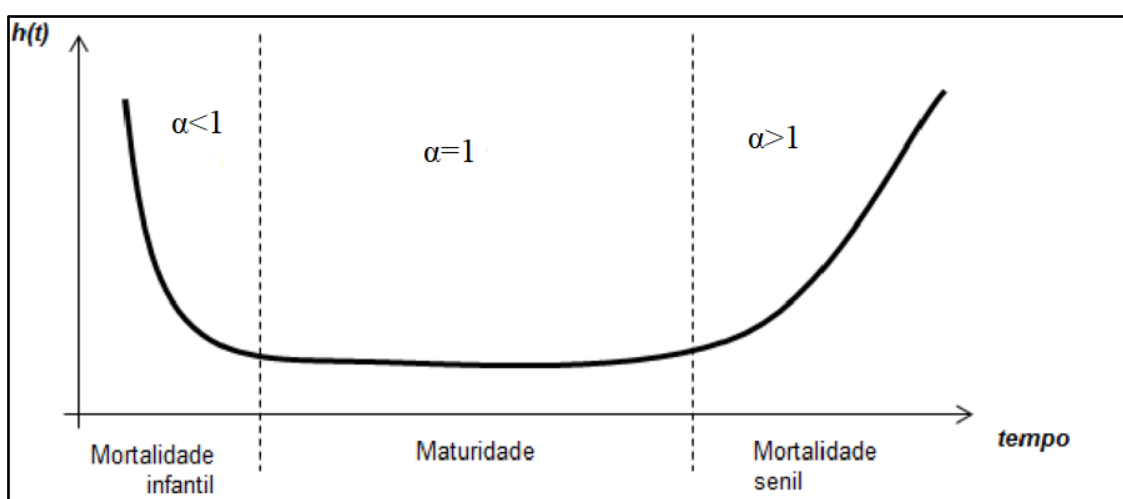


Figura 1 – Curva da banheira

Usualmente a distribuição de Weibull segue o seguinte formato (SELLITTO et al, 2002; SELLITTO et al, 2006; SELLITTO 2007): (i) Coleta de amostras de tempos até a falha do objeto; (ii) Plotagem dos tempos em papel de probabilidade ou uso de software estatístico para verificação de aderência à distribuição de Weibull e estimativa de seus parâmetros. (iii) Não

havendo ajustes ou há mistura de dados, (dados provêm de mais de uma população) ou outra distribuição deve ser tentada; (iv) Uso dos parâmetros da distribuição para previsão de falhas; (v) Uso de cálculos econômicos pertinentes envolvendo custos e riscos para gerar ações corretivas como políticas de inspeção, reparos ou trocas.

Com base no valor do fator de forma(α) da distribuição Weibull é possível identificar em que fase do ciclo de vida encontra-se o elemento em estudo, pois o valor desse fator define o tipo da função de risco. Quando o fator de forma $\alpha < 1$ a função de risco $h(t)$ é crescente mostrando que o item está na região inicial chamada por (SELLITTO, 2005) de mortalidade infantil, nessa região as falhas são prematuras decorrentes por problemas na sua maior parte ocasionado por erros do fabricante, nessa região as taxas de falhas são altas, porém $h(t)$ decrescentes, a estratégia de manutenção mais adequada para esta fase seria a manutenção corretiva. Quando o $\alpha = 1$ a função de risco $h(t)$ é constante, as falhas encontram-se em uma região chamada por (SELLITTO, 2005) de maturidade, $h(t)$ são constantes e acontecem aleatoriamente ocasionadas por fatores menos controláveis, a estratégia de manutenção mais adequada para esta fase seria a manutenção preventiva. E quando o $\alpha > 1$ a função de risco $h(t)$ é crescente mostrando que o item está da fase final, chamada por (SELLITTO, 2005) de mortalidade senil onde o equipamento encontra-se no fim da sua vida útil e a taxa de falha é crescente, ocasionadas por desgastes naturais do item, a estratégia de manutenção mais adequada para esta fase seria a manutenção preditiva.

2.2. Revisão a respeito de confiabilidade na formulação de estratégias de manutenção

Para o auxílio diretamente desta pesquisa, podemos citar alguns artigos que se armaram da mesma.

Kominakis et al. (2018), relata o uso da confiabilidade na verificação da coerência da atual estratégia de manutenção de equipamentos de uma empresa da indústria alimentícia. Foram utilizadas modelagens estatísticas aplicadas aos tempos de reparo (TTR) e tempos entre falhas (TBF) de um conjunto de 6 máquinas de embalagem de uma das linhas de produção, o autor também relacionou cada fase do ciclo de vida da curva da banheira com o comportamento da taxa de falha do equipamento. Com base nos resultados, o autor verificou que a modelagem da confiabilidade apontou que equipamento se encontrava na fase de mortalidade infantil, o que sugeria uma estratégia de manutenção corretiva – objetivando eliminar as reais causas dos possíveis defeitos de fabricação ou de projeto do equipamento.

Sellitto (2007) relata a aplicação da análise estratégica da manutenção em uma linha de produção metal-mecânica com base em estudos de confiabilidade sistêmica. Por meio de um estudo de caso descritivo, apresentou e testou um método quantitativo e objetivo para a formulação de estratégias de manutenção de equipamentos complexos de produção. A aplicação do método indicou a estratégia de manutenção preventiva para quatro das seis máquinas estudadas, em duas delas de forma pura, em outras duas, de forma combinada com a estratégia preditiva. Com isso, foi possível se calcular intervalos ótimos de intervenção, gerando ganho de escala no serviço e redução do custo de manufatura. Em uma máquina, chegou-se a uma estratégia de manutenção preditiva pura e em outra máquina não se pôde descartar nenhuma das estratégias.

3. Metodologia

O objetivo geral deste trabalho é, com base principalmente nos estudos de Sellitto (2006), avaliar a coerência da atual estratégia de manutenção utilizada para os equipamentos de uma

empresa de transmissão de energia elétrica por meio da função de confiabilidade.

Para este trabalho, os seguintes procedimentos foram adotados a partir de Cerveira (2015):

- Obtenção dos dados dos tempos entre falhas e tempos até o reparo do bipolo (foram coletadas e analisadas 92 amostras);
- Análise dos dados por modelagem pelo software STAT FIT 2.0;
- Escolha da melhor distribuição baseando-se nos testes de máxima verossimilhança e no princípio da pesquisa;
- Identificação do ponto no ciclo de vida em que o equipamento se encontra;
- Cálculo das funções confiabilidade e disponibilidade (equações 1 e 2 respectivamente); e
- Discussão dos resultados, análise da estratégia atual.

$$Av = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (1)$$

$$R(t) = e^{[-(\frac{t}{\beta})^\alpha]} \quad (2)$$

4. Análise dos dados e discussão dos resultados

A empresa estudada é do ramo de transmissão de energia elétrica em alta tensão (600 kV), ela é responsável por duas linha de transmissão Porto Velho-Araraquara que totaliza 2.385 quilômetros de extensão, bem como por uma estação retificadora em Rondônia e uma inversora em São Paulo, cada inversora e retificadora são compostas por dois equipamentos chamados polos (conjunto este chamado de bipolo), que transformam corrente alternada em corrente contínua e vice-versa com potência total instalada de 3.150 MW.

Para aplicação dos conceitos objetivados, foi selecionado um sistema de transmissão de energia elétrica (bipolo) que abrange aproximadamente 5% do fornecimento de energia elétrica do Brasil. A partir dos dados obteve-se estimativas de parâmetros de uma distribuição de Weibull e os testes realizados foram os testes de aderência de Anderson Darling (A^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS). Para fins metodológicos, o bipolo estudado será considerado como um sistema único.

Através dos sistemas de informações da empresa foram coletados dados de desligamentos (interrupções) imprevistas não transitórias -foram 92 amostras no total no período entre 2017 e 2018. A partir dos dados obteve-se estimativas de parâmetros de uma distribuição de Weibull e os testes realizados foram os testes de aderência de Anderson Darling (A^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS). A hipótese de que a amostra segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada. As figuras 2 e 3 apresentam respectivamente o teste do papel de probabilidade Weibull e o gráfico de tempo x frequência de falhas, a tabela 1 representa os resultados dos ajustes e as fórmulas 1 e 2 respectivamente representam o cálculo de disponibilidade e confiabilidade a partir das variáveis encontradas nos testes. Usou-se o software STATFIT 2.0 para o ajuste e testes.

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
Weibull(0.17, 0.669, 143)	84.	do not reject
Gamma(0.17, 0.622, 303)	77.3	do not reject
Lognormal(-1.67, 4.31, 1.51)	49.7	do not reject
LogLogistic(0.17, 1.08, 79.3)	48.8	do not reject
Inverse Gaussian(-10., 63.8, 198)	28.2	do not reject
Inverse Weibull(-15.4, 0.998, 1.67e-002)	20.3	do not reject
Pearson 5(-30.4, 1.51, 131)	12.	do not reject
Pearson 6(-21.2, 19.6, 6.34, 1.54)	6.25	do not reject
Beta(0.17, 3.55e+003, 0.359, 3.19)	2.75e-002	reject
Exponential(0.17, 188)	6.22e-003	reject
Johnson SB(-0.705, 643, 1.14, 0.551)	1.17e-014	reject
Erlang(0.17, 1., 303)	0.	reject
Normal(188, 310)	0.	reject
Logistic(129, 113)	0.	reject
Extreme Value IA(113, 243)	0.	reject
Triangular(-0.421, 2.13e+003, -1.41e-002)	0.	reject
Pareto(0.17, 0.167)	0.	reject
Extreme Value IB(388, 582)	0.	reject
Rayleigh(-218, 361)	0.	reject
Uniform(0.17, 2.1e+003)	0.	reject
Power Function(0.17, 2.21e+003, 0.276)	0.	reject
Chi Squared	no fit	reject

Figura 2 – Nível de significância do ajuste aos modelos de distribuição

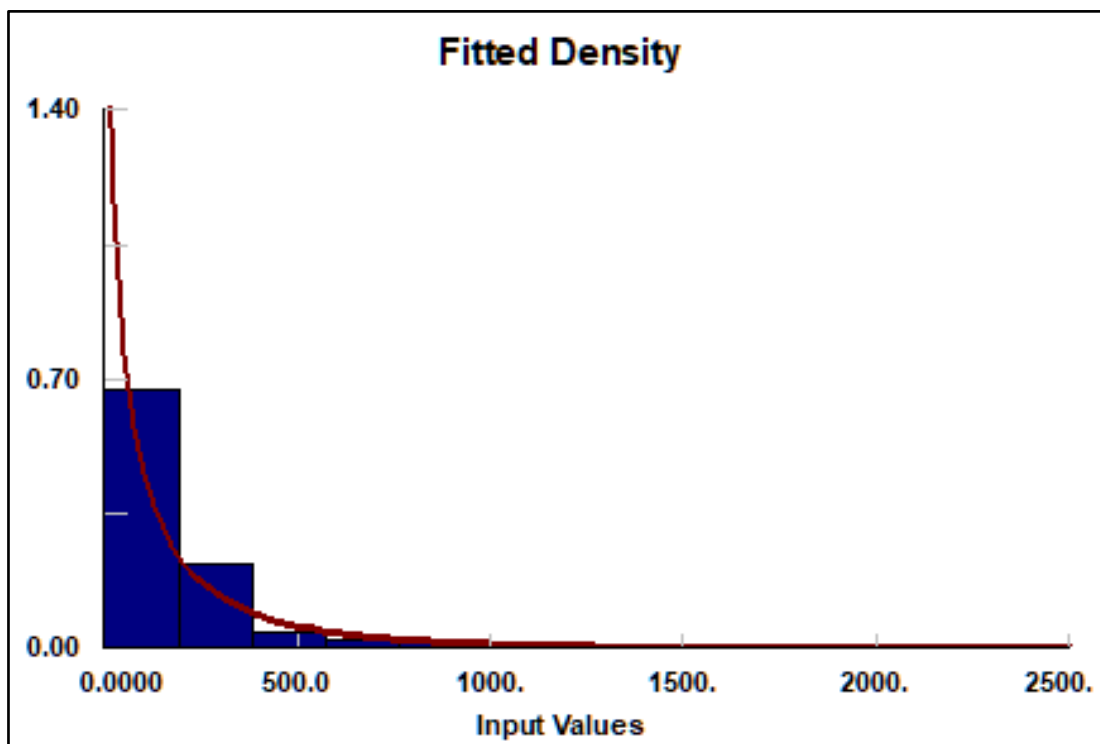


Figura 3 – tempo x frequência de falhas

Parâmetro	Resultados
Max. TBF (horas)	2102,35
MTBF (horas)	188,41
Min. TBF (horas)	0,17
Max. TTR (horas)	13,45
MTTR (horas)	1,04
Min. TTR (horas)	0,00
α	0,668934
β	142,784

Fonte: Autor com o software STAT FIT 2.0

Tabela 1 - Resultados dos ajustes

5. Análise e discussão dos resultados

A análise dos resultados da modelagem dos dados a seguir seguem baseados em Sellitto (2005, 2007), Mengue e Sellitto (2013) e Komninakis (2018).

O bipolo apresenta tempo médio de reparo de 62,4 minutos (MTTR = 1,04 horas), com máximo de 807 (Max. TBR = 13,45 horas) minutos e mínimo de 0 minutos (Min. TBR = 0 h). Tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 188,41 horas, máximo de 2.102,35 horas e 0,17 horas de mínimo, o parâmetro de forma (α) igual a aproximadamente 0,67, pode-se deduzir que a taxa de falhas é decrescente e que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, uma vez que $\alpha < 1$. O bipolo apresenta uma disponibilidade de 99,45% ou seja 99,45% do tempo ele está em operação. Para o modelo de Weibull, dado um tempo t qualquer, por exemplo, $t = 100$ horas, tem-se que a confiabilidade da bipolo funcionar por 100 horas consecutivas é de aproximadamente 45,48 %, ou seja, existe a probabilidade de 54,52 % do bipolo falhar antes da conclusão deste tempo.

A partir do parâmetro de forma calculado com base nos dados fornecidos, pode-se dizer que a principal conclusão obtida, é que o bipolo encontra-se na idade de mortalidade infantil do ciclo de vida da curva banheira. Foram também obtidos valores de disponibilidade e confiabilidade, sendo este segundo um dado preocupante, pois no período calculado de 100 horas, apenas 45,48 % do tempo o bipolo é confiável e não poderá apresentar qualquer tipo de falha.

Na fase da mortalidade infantil as falhas são originadas no projeto, na especificação ou na instalação do equipamento, neste caso em específico a inexperiência do fabricante com este tipo de projeto também pode ter algum tipo de contribuição. Os erros de projeto, instalação ou fabricação devem ser reconhecidos e ao menos impedidos, se não for possível eliminá-lo. A decorrência de não se fazer a manutenção corretiva é a impossibilidade de se entrar na região de maturidade ou vida útil do equipamento (SELLITTO, 2005).

6. Conclusão

O referido artigo teve como objetivo principal verificar se atual estratégia de manutenção adotada pela empresa, é a mais adequada para o período de vida útil do bipolo (escolhida entre preventiva, preditiva, corretiva ou emergencial), com base em cálculos probabilísticos e de confiabilidade.

A manutenção do bipolo para sistema elétrico brasileiro é um processo importante, já que

qualquer interrupção da energia resulta em faltas de fornecimento ao consumidor final desde estresses aos demais equipamentos de outros agentes que tem relação direta ou indireta com o equipamento em estudo. Nota-se que outros além dos fatores já citados, existem outros que podem influenciar no gerenciamento da manutenção como todo, tais como pressão dos órgãos reguladores e da diretoria da empresa visando a reduzir ao máximo a perda de receita por conta da indisponibilidade do equipamento.

Com isso, os resultados obtidos respondem à questão de pesquisa, e demonstram que a estratégia de manutenção preventiva utilizada atualmente pela empresa não é coerente para a posição que estes se encontram na curva da banheira, já que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil e a manutenção corretiva seria a mais adequada. Porém, sabe-se que nessa fase além da manutenção corretiva deve-se sempre buscar sempre a causa do problema, e não apenas realizar a substituição do componente em falha, pois sem esta ação pós corretiva o equipamento permanecerá na região de mortalidade infantil e para Sellitto (2005) isso impossibilitará o equipamento de entrar na região de maturidade ou vida útil.

Para trabalhos futuros sugere-se que os estudos de confiabilidade e disponibilidade sejam feitos para cada polo separadamente, e não, para o conjunto (bipolo) para assim termos uma melhor visão de qual equipamento terá necessidade de um acompanhamento mais íntimo da manutenção.

Referências

CERVEIRA, Diego Santos; SELLITTO, Miguel Afonso. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015.

BRANDÃO, Mariane Olivier; ANDRADE, Paulo César de Resende. Modelagem dos dados de falhas de um pasteurizador de garrafas de cerveja. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 2 (2018).

ELSAIED, E. **System reliability engineering**. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.

GOMES, Milla Caroline; DE RESENDE ANDRADE, Paulo César; COSTA, Thonson Ferreira. Análise de indicadores de desempenho da manutenção de um moinho de bolas. **Revista Thema**, v. 15, n. 3, p. 1089-1103, 2018.

KOMNINAKIS, Denis; PIRATELLI, Cláudio Luis; ACHCAR, Jorge Alberto. Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 560-592, 2018.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual De Confiabilidade, Manutenibilidade: E DISPONIBILIDADE**. Qualitymark Editora Ltda, 2001.

LEWIS, Elmer Eugene. **Introduction to reliability engineering**. 1987.

MARTINS, J. CAMPOS; SELLITTO, M. AFONSO. Análise da estratégia de manutenção de uma concessionária de energia elétrica com base em estudos de confiabilidade. **XXVI ENEGEP-Fortaleza, CE, Brasil**, v. 9, 2006.

MENGUE, Denis Carlos; SELLITTO, Miguel Afonso. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.

MOUBRAY, John. Introdução à manutenção centrada na confiabilidade. **São Paulo: Aladon**, p. 129, 1996.

NBR5462, A. B. N. T. Confiabilidade e Manutenibilidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro**, 1994.

PEREIRA, Mário Jorge. **Engenharia de manutenção: teoria e prática**. Editora Ciência Moderna, 2009.

RODRÍGUEZ, Antonio Misari. Planejamento de tarefas de manutenções centradas em confiabilidade para redes de distribuição de energia elétrica. 2017.

SANDHAM, J. **Reliability Centred Maintenance (RCM)**. 2013. Disponível em: <<http://www.ebme.co.uk/articles/management/327-reliability-centred-maintenance-rcm>>. Acessado em: 23/10/2016.

SELLITTO, Miguel Afonso. Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metal-mecânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos. **Revista GEPROS**, n. 2, p. 97, 2007.

SOUZA, A. C. V. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada à gestão de linhas transmissão localizadas em áreas de irregular de faixa de passagem. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Campina Grande - PB, 2014.

SILVA FILHO, Olívio; SELLITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e posição no ciclo de vida de três linhas de produção de uma empresa da indústria química. **Engevista**, v. 16, n. 4, p. 414-430.

WUTTKE, Régis André; SELITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. **Revista Produção Online**, v. 8, n. 4, 2008.