

ESTUDO DA MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE UMA USINA DE ETANOL SOB A METODOLOGIA MCC (MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE)

STUDY OF EQUIPMENT MAINTENANCE AT AN ETHANOL PLANT UNDER A RCM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE) METHODOLOGY

Elias Tadeu da Silva* eng.eliastadeu@bol.com.br

Claudio Luis Piratelli* clpiratelli@uniara.edu.br

Jorge Alberto Achcar** achcar@fmrp.usp.br

*Universidade de Araraquara (UNIARA), Araraquara-SP

**Universidade de São Paulo (USP), Ribeirão Preto-SP

Resumo: A manutenção e a sua gestão possuem uma importância substancial na busca de vantagem competitiva para as empresas. Por isso, a análise de confiabilidade de seus equipamentos é parte fundamental para a definição da estratégia de manutenção mais adequada. O objetivo deste estudo é avaliar por meio da metodologia MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) a curva do ciclo de vida de uma usina de cana de açúcar localizada na região central do Estado de São Paulo e desta forma responder se a atual estratégia é a mais adequada para o gerenciamento da sua manutenção. O método de pesquisa utilizado foi baseado na modelagem estatística aplicada aos tempos entre falhas (TBF) e aos tempos de reparo (TTR) de todos os equipamentos industriais que paralisam a operação da moenda, ou seja, a interrupção na linha de produção. Estes tempos foram modelados por uma distribuição de probabilidade de Weibull e os resultados mostram que dentre as estratégias utilizadas pela usina, o uso intensivo da manutenção preventiva sem um critério definido para vários tipos de manutenção (emergencial, preventiva, corretiva e preditiva) durante a safra não é adequado. Como a análise estatística identificou, historicamente estes equipamentos se encontram na fase de mortalidade infantil do ciclo de vida útil, portanto sugere-se eliminar a causa raiz das falhas utilizando estratégias mais apropriadas e recomendadas pela literatura como as manutenções corretivas e emergenciais.

Palavras-chave: Manutenção. Confiabilidade. MCC. Cana. Açúcar.

Abstract: Maintenance and its management are of substantial importance in the search for competitive advantage for companies. Therefore, the reliability analysis of the equipment is a fundamental part of the definition of the most appropriate maintenance strategy. The objective of this study is to evaluate through RCM (Reliability Centered Maintenance) a life cycle curve of a sugar mill plant located in the central region of the State of São Paulo and in this way to answer if the current strategy is the most adequate for the maintenance management. The research method used was the statistical modeling applied to the times between failures (TBF) and the repair times (TTR) of all industrial equipment that paralyze the mill operation, that is, the interruption in the production line. These times were modeled by a Weibull probability distribution and the results show that among the strategies used by the plant, the intensive use of preventive maintenance without a defined criterion for various types of maintenance (emergency, preventive, corrective and predictive) during the harvest it is not suitable. As the statistical analysis pointed out that the equipment was identified in the infant mortality phase of the life cycle, it is suggested to eliminate the main cause of the failures using more appropriate and recommended approaches presented by the literature as corrective and emergency maintenance.

Keywords: Maintenance. Reliability. RCM. Cane. Sugar.

1 INTRODUÇÃO

A concorrência entre as organizações demanda um planejamento de manutenção adequado para proporcionar maior confiabilidade e tempo de atividade para os equipamentos, o que reduz de forma significativa as perdas durante a produção (RUSCHEL; SANTOS; LOURES, 2017).

A adoção mais intensa de sistemas automatizados e modernos equipamentos têm levado o setor de manutenção a uma posição estratégica, em face da importância da disponibilidade operacional para o resultado global das empresas (MOREIRA NETO; TAVARES, 2015). Para Alsyouf (2009), as atividades de manutenção estão se tornando mais complexas, pois um sistema de fabricação convencional não consiste apenas dos tradicionais equipamentos mecânicos, mas incorporam em seu sistema elementos eletrônicos, hidráulicos, eletromecânicos, software e humanos. Desta forma qualquer alteração que perturbe o funcionamento do sistema pode ocorrer devido a diferentes fatores (HOLMBERG, 2001).

Instalações industriais mantidas de forma inadequada ou com sua manutenção negligenciada, em algum momento irão precisar de reparos dispendiosos, devido ao desgaste ocorrido ao longo do tempo (VISHNU; REGIKUMA, 2016). Ainda de acordo com Vishnu e Regikuma (2016) o principal objetivo da manutenção de uma planta industrial é alcançar a quebra mínima e manter os equipamentos em condições de operação ao menor custo possível.

Uma política de manutenção eficiente é a combinação entre as manutenções corretivas, preventivas e preditivas, porém o tipo de manutenção e o intervalo entre as mesmas é uma função do comportamento de sua taxa de falha e do custo global envolvido no dano ocorrido (FARRERO; TARRÉS; LOSILLA, 2002).

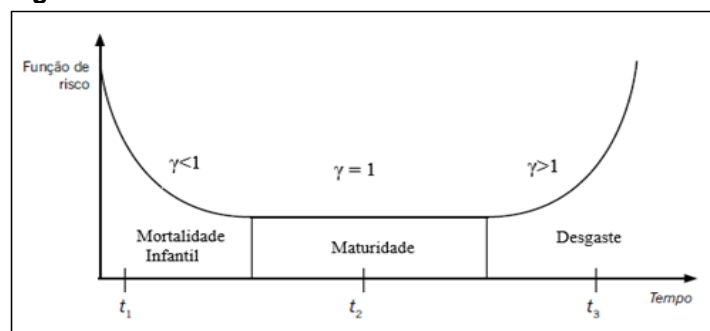
Para Flogliatto e Ribeiro (2008) a metodologia MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) é definida como um programa que associa técnicas de engenharia de manutenção com um tratamento sistemático e seu objetivo é garantir a função original dos equipamentos fabris.

Para Moreira Neto e Tavares (2015) a metodologia MCC é a aplicação de uma metodologia estruturada para definir a estratégia de manutenção mais adequada para um equipamento ou sistema, por meio de um plano concebido

mediante a análise das suas reais necessidades e o contexto que faz parte. Assim como forma de garantir a competitividade e permanência no mercado, as empresas consideradas de classe mundial utilizam as práticas da MCC para definir os planos de manutenção dos equipamentos, pois essa metodologia analisa de forma detalhada as funções e padrões de desempenho como a forma que ocorre a falha, o que causa cada falha, as consequências da falha e a forma de prevenção (SOUZA; LIMA, 2003).

A curva da banheira é uma construção abstrata e representa de forma genérica a função de risco $h(t)$ a qual expressa a expectativa de falha de um item ao longo do ciclo de vida dos equipamentos (CERVEIRA; SELBITTO, 2015; LAFRAIA, 2011). De acordo com Fogliato e Ribeiro (2009) a função de risco, taxa de risco ou taxa de falha $h(t)$ é considerada a medida de confiabilidade mais difundida e seu comportamento ao longo do ciclo de vida do produto pode ser representada pela curva da banheira (ver, Figura 1). Durante a vida útil, um item apresenta valores de taxas de falha variáveis e a curva da banheira expressa a expectativa de falha desse equipamento ao longo do tempo (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). Na curva da banheira para o modelo de Weibull com parâmetro de forma γ , quando $\gamma < 1$ a taxa de falha é decrescente (fase de mortalidade infantil), $\gamma = 1$ a taxa de falha é constante (fase de maturidade) e para $\gamma > 1$ a taxa de falha é crescente (mortalidade senil ou desgaste) (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Figura 1- Gráfico da Curva da Banheira



Fonte: Adaptado Sellitto (2005)

Para cada fase do ciclo de vida de um equipamento existe uma estratégia de manutenção adequada e Sellitto (2005) relaciona o valor do parâmetro de forma de

Weibull γ com esses períodos. O Quadro 1 mostra essa relação entre fase e estratégia.

Quadro 1- Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção de equipamentos

Fase	Estratégia	Decorrência
Mortalidade infantil (Falhas decrescente) $\gamma < 1$	Emergência	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.
	Preditiva	Monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência.
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem.
Maturidade (Falhas aleatórias) $\gamma=1$	Emergência	Como se limita a trocar componentes quebrados, pode fazer retornar à mortalidade infantil se não selecionar os substitutos.
	Corretiva	É inócua quanto às falhas catastróficas, mas pode reduzir o patamar de expectativa de falhas eliminando modos de falha que passaram da primeira fase.
	Preditiva	Informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade da quebra.
	Preventiva	Retorna à mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste.
Desgaste (Falhas progressivas) $\gamma > 1$	Emergência	Permite que as quebras que vão ocorrer realmente ocorram a um custo interno mais baixo do que a preventiva.
	Corretiva	Só será útil se for capaz de retardar ou o início da falha ou a quebra que realmente vai ocorrer.
	Preditiva	Monitora os processos progressivos de falhas já iniciados predizendo aumentos na probabilidade da quebra.
	Preventiva	Previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: Adaptado Sellitto (2005)

De acordo com Souza et al. (2018) as indústrias nacionais produtoras de açúcar e álcool tem como principal prioridade em seus planejamentos a manutenção

corretiva planejada devido a características de sazonalidade de sua operação, pois existe grande disponibilidade de tempo no período conhecido como entressafra (aproximadamente seis meses).

Para Souza et al. (2018) na busca de competitividade no setor sucroalcooleiro a gestão da manutenção é estratégica, pois as usinas são responsáveis pela fabricação de todo açúcar e álcool produzido no país o que contribui de forma positiva para o saldo da balança comercial do Brasil com a venda do excedente de sua produção para o mercado externo. O açúcar e o álcool são considerados commodities pelo mercado internacional e para a sobrevivência e crescimento dessas empresas deve-se investir em fatores geradores de competitividade, ou seja, na gestão da manutenção (SOUZA et al., 2018).

A escolha da estratégia de manutenção de uma empresa deve ser direcionada pelo uso de métodos quantitativos, onde nos últimos anos várias abordagens deste tipo foram estudadas e aplicadas à manutenção em companhias de diversos segmentos como a metodologia MCC a qual identifica e investiga os riscos e os impactos dos modos de falha e propõe o melhor tipo de manutenção a ser executado para minimizar o dano (SELLITTO, 2007).

Planos de manutenção devem conter análises quantitativas para se compreender o tipo e o período mais adequado ao comportamento da taxa de falha de cada equipamento e assim selecionar atividades de manutenções que contribuam de forma efetiva para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a redução de custo das empresas (MENDES; RIBEIRO, 2014)

Após a definição do projeto cabe ao setor de manutenção manter ou recuperar o desempenho original do equipamento, porém a partir de um certo ponto na vida desse item essa capacidade é limitada, desta forma ou se reduz as expectativas de desempenho ou é necessário introduzir modificações de projeto que podem ser baseadas no conhecimento adquirido ao longo do tempo pela manutenção (SELLITTO, 2007)

Para Gandhare, Akarte e Patil (2018) uma indústria de processo exige grandes quantias de investimento e disponibilidade contínua de suas instalações, sendo a manutenção uma área crítica da companhia, pois é responsável pelo desempenho dos equipamentos. A indústria açucareira opera de forma sazonal e a

disponibilidade de sua instalação durante o período de fabricação do açúcar determina o seu desempenho (GANDHARE; AKARTE; PATIL, 2018).

A política de manutenção de uma usina de processamento de cana de açúcar, historicamente é dividida em dois períodos de safra e entressafra. De forma geral na entressafra a unidade industrial está parada para a manutenção preventiva e na safra a unidade industrial está operante e disponível para a produção.

No setor metal-mecânico, Sellitto (2005) revisou os conceitos ligados as variáveis de processos aleatórios como forma de definição das bases da confiabilidade e modelagem aplicada à gestão da manutenção. Por meio da modelagem estatística do tempo entre falhas e do tempo de reparo, foi estabelecido a estratégia de manutenção desse setor (SELLITTO, 2005).

Mengue e Sellitto (2013) definiram a estratégia de manutenção (preventiva, preditiva, corretiva ou emergencial) mais adequada para uma bomba centrífuga de uma planta petrolífera com base nos conceitos da confiabilidade. Os tempos obtidos no estudo foram modelados por distribuições de probabilidade e mediante os resultados foram determinados as funções de Confiabilidade $R(t)$, Manutenibilidade $M(t)$ e a Disponibilidade de uma bomba centrífuga (MENGUE; SELLITTO, 2013).

Komninakis (2017) avaliou a coerência da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia por meio da modelagem estatística aplicada ao tempo de reparo (TTR) e ao tempo entre falhas (TBF) de uma linha de produção constituída por seis máquinas de embalagens, no qual os dados foram modelados por distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull.

Identificar o trecho que o equipamento está situado no ciclo de vida da curva da banheira é fundamental para a formulação estratégica e gestão da manutenção industrial (SELLITTO, 2007).

O objetivo deste trabalho é avaliar por meio da MCC a curva de confiabilidade da linha industrial de uma usina que produz açúcar e gera energia elétrica para responder a seguinte questão de pesquisa: A atual estratégia de manutenção da empresa objeto de estudo, é a mais adequada para o seu gerenciamento da sua manutenção?

Este artigo está, além da introdução, estruturado da seguinte forma: na seção 2 é apresentado um referencial teórico sobre modelos de confiabilidade. A seção 3

apresenta uma breve revisão bibliográfica com trabalhos nacionais e internacionais que usaram a metodologia MCC para avaliação de estratégia de manutenção. A seção 4 apresenta a metodologia da pesquisa. Na seção 5 é apresentada a empresa objeto de estudo e a definição da amostra. Na Seção 6 são apresentados os resultados, baseados em uma análise de variância (ANOVA) e em modelos de confiabilidade; na seção 7 são apresentadas as conclusões e as considerações finais.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica do trabalho por meio da apresentação dos modelos de confiabilidade e o uso da distribuição de Weibull para os tempos de manutenção

2.1 Modelos de Confiabilidade

Na análise de sobrevivência ou análise de confiabilidade, há dois tipos de modelos de análise:

- modelos não-paramétricos, onde não é necessária a especificação de nenhuma distribuição de probabilidade para os dados de tempo de vida de um componente ou sistema (RAUSAND, 1994);
- modelos paramétricos ou probabilísticos, onde é necessária a especificação de uma distribuição de probabilidade adequada aos dados (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

O uso de métodos não-paramétricos nos permite ganhar perspectiva quanto a natureza da distribuição de dados a partir do qual foi desenhada sem, no entanto, selecionar uma distribuição específica (LEWIS, 1994).

Para Giolo e Colosimo (2006), o uso de técnicas paramétricas tem sido mais frequente na área industrial que na área médica, razão pela qual, na indústria os estudos envolvendo componentes e equipamentos podem ser planejados e, fontes de perturbação, podem ser controladas. Apesar de algumas distribuições de

probabilidade serem, certamente, mais conhecidas, como a Normal e a Binomial, quando se trata de descrever a variável “tempo entre falhas”, outras distribuições mostram-se mais adequadas. E, embora haja uma variedade de modelos probabilísticos utilizados na análise de sobrevivência, alguns ganham posição de destaque, por apresentarem comprovada adequação em distintas situações, como os modelos Exponencial, Weibull e o log-normal (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

A seguir são apresentadas algumas das principais distribuições de probabilidade usadas na análise de confiabilidade.

2.2 Uso da distribuição de Weibull para os tempos de manutenção

A distribuição de Weibull, amplamente conhecida em virtude de sua simplicidade e flexibilidade em acomodar diferentes formas de função de risco, é talvez o modelo de distribuição mais utilizado em análise de tempos de vida (WEIBULL, 1951; GIOLO; COLOSIMO, 2006). Para uma variável aleatória T com distribuição Weibull, a função de densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\}, \quad t \geq 0, \quad (2.1)$$

em que t é o tempo até a falha, γ é um parâmetro de forma e θ é um parâmetro de escala, todos positivos. Denota-se a distribuição Weibull (3.13) por $T \sim \text{Wei}(\gamma, \theta)$.

Para a distribuição de Weibull, a função de sobrevivência (ou confiabilidade) $R(t) = P(T > t)$ é dada por,

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\} \quad (2.2)$$

A taxa de falha é dada por:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1}, \quad (2.3)$$

para $t \geq 0$, γ e $\theta > 0$.

A forma da curva de sobrevivência é determinada exclusivamente pelo parâmetro γ . Se a população considerada tem taxa de falha que aumenta com o tempo, o valor de γ será maior que 1. Para taxa de falha constante, o valor de γ será igual a 1. Caso a taxa de falha for decrescente com o tempo, o valor de γ será menor que 1.

Neste caso, pode-se ter riscos (taxas de falha) crescentes para $\gamma > 1$; decrescentes para $\gamma < 1$ e constante para $\gamma = 1$.

As expressões para o tempo médio de vida $E(T)$ e a variância $Var(T)$ do modelo de Weibull são dados por,

$$E(T) = \theta \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right], \quad (2.4)$$

$$Var(T) = \theta^2 \left[\Gamma \left[1 + \left(\frac{2}{\gamma} \right) \right] - \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]^2 \right], \quad (2.5)$$

sendo a função gama, $\Gamma(k)$, definida por:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} \exp\{-x\} dx \quad (2.6)$$

O percentil 100p%, ou vida residual, é dado por:

$$P(T \leq t_p) = t_p = \theta [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.7)$$

onde p é o percentil em que ocorrem as falhas, t_p é o provável tempo em que $p\%$ das falhas ocorrerão.

Sellitto (2005) relaciona as fases do ciclo de vida da curva da banheira com os valores do parâmetro de forma γ de Weibull, que representa o comportamento da curva de falhas do equipamento, elencando os tipos de falhas mais comuns encontradas em cada fase, a saber:

- na fase de mortalidade infantil, onde $\gamma < 1$, a taxa de falhas é alta, porém decrescente ao longo do tempo. As falhas são prematuras, normalmente

originadas por deficiências no processo de fabricação, instalação incorreta, ou materiais fora de especificação;

- na fase de maturidade, onde $\gamma = 1$, a taxa de falhas é sensivelmente menor e oscila ao redor de uma média constante. As falhas são casuais e decorrentes de fatores menos controláveis, tais como: mau uso do equipamento, ultrapassagem de resistência ou fenômenos naturais imprevisíveis;
- na fase de mortalidade senil ou desgaste, em que $\gamma > 1$, a taxa de falha é crescente. Essas falhas são causadas por envelhecimento, degradação mecânica, elétrica ou química, fadiga, corrosão, ou vida de projeto muito curta. É o fim da vida útil do equipamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA METODOLOGIA MCC

No âmbito nacional a metodologia MCC é tratada em sua forma básica, porém em vários artigos internacionais a metodologia MCC é citada como uma ferramenta já consolidada e de acordo com Aziz et al. (2019, p.349) “ o gerenciamento da manutenção com base na confiabilidade já é uma técnica comprovada”, onde indústrias como dos setores de energia nuclear, aviação, automóvel, offshore já integram o conceito de confiabilidade no início do projeto (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011). Por isso a metodologia MCC nesses artigos é apresentada como uma forma de validação estruturada de diversas outras novas abordagens como: gravata borboleta, RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), CIBOCOF (*Center for Industrial Management Maintenance Concept Development Framework*), AHP (*Analytical Hierarchy Process*), PSO (Otimização por exame de partículas) e RRCM (*Reliability and Risk Centered Maintenance*), ou seja, internacionalmente a metodologia MCC deixou de ser o objeto de estudo para ser o suporte das novas ferramentas. Na sequência é apresentada uma breve revisão bibliográfica dos principais artigos selecionados durante a pesquisa.

Sellitto, Borchardt e Araújo (2002) por meio da MCC e suas ferramentas como FTA (Análise de Árvore de Falhas), FMEA (Modo de Falha e Análise de Causa e Efeito) e Análise de Weibull determinaram o MTBF e o intervalo de tempo ideal entre

os reparos ao analisar as embreagens de uma frota de ônibus de uma empresa de transporte de passageiros.

Na indústria metal-mecânica dentro da cadeia de suprimentos da indústria automobilística, Sellitto (2007) mapeou o processo e identificou os equipamentos para possibilitar a coleta dos tempos até a falha e os tempos até o reparo das máquinas. Com essas informações foi possível estimar o parâmetro de forma γ da distribuição de Weibull e assim identificar em que ponto da curva da banheira o equipamento está situado e desta forma definir uma estratégia para cada máquina da linha de produção.

Para analisar a coerência da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia, Komninakis (2017) aplicou a análise de confiabilidade com auxílio da modelagem estatística das distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull dos tempos de reparo e dos tempos de falha de uma linha de produção composta de 6 máquinas de embalagens. O resultado da modelagem estimou o parâmetro de forma da distribuição de Weibull como $\gamma < 1$, situando os equipamentos na fase de mortalidade infantil na curva da banheira o que implica a necessidade da adoção de estratégias de manutenção corretiva com foco na eliminação das causas reais dos defeitos de fabricação, de projeto, de instalação ou de operação.

Pela perspectiva de novas abordagens de manutenção, Waeyenbergh (2009) desenvolveu um conceito que pode ser personalizado e específico para cada empresa. O modelo CIBOCOF fornece subsídios para a escolha da política e modelo de manutenção mais apropriada, de forma mais simples e prática que os modelos descritos pela literatura. O desenvolvimento dessa ferramenta foi possível devido aos modelos matemáticos e árvores de decisão propostas pela RCM. Em seu trabalho foi realizado um estudo de caso com a implementação da CIBOCOF em uma empresa que produz produtos de iluminação e os conceitos apresentados na pesquisa atenderam a diversas áreas problemáticas da empresa e também forneceram informações úteis para o desenvolvimento de uma manutenção estruturada

Vishnu e Regikumar (2016) elaboraram um modelo geral de RCM que é adequado para todos os tipos de plantas de processos com subsistemas complexos interligados e componentes críticos, para isso foi elaborado uma estrutura seguindo

a metodologia baseada na AHP para desenvolver um sistema de banco de dados que monitora as ações de manutenção e as informações dos equipamentos para assim definir formas econômicas para aumentar a disponibilidade e lucratividade da indústria.

Para Aziz (2019) o planejamento e o gerenciamento da manutenção com base na confiabilidade é uma realidade consolidada e a prática é comum em operações marítimas, desta forma não é incomum estudos sobre essa metodologia. Em seu artigo é apresentado uma abordagem prática e estruturada conhecida como metodologia da gravata borboleta para avaliar e quantificar os riscos relativos a diferentes sistemas de um navio. A utilização desta metodologia foi possível, pois os dados de falha e as probabilidades de falhas foram calculados a partir do banco de dados histórico do navio e a confiabilidade foi utilizada para validar o modelo. Desta forma essa estrutura poderia servir como uma ferramenta útil para gerenciar a segurança de uma embarcação com relação aos riscos quantitativos e no auxílio na priorização eficaz dos recursos e na prevenção de eventos indesejados.

4 METODOLOGIA

A pesquisa utilizada neste trabalho foi descritiva, pois teve como objetivo, elaborar um modelo estatístico que descreve as falhas que ocorrem nos equipamentos de uma indústria e desenvolver um perfil com suas características. Esta análise foi realizada por meio das informações contidas e armazenadas em um banco de dados da própria empresa. A coleta de dados foi por meio da extração dos dados históricos de alteração de rotação e paradas de moenda disponíveis no sistema de gestão. A abordagem utilizada foi a quantitativa, e o método utilizado foi modelagem estatística com o cálculo da confiabilidade dos equipamentos por meio da modelagem dos tempos entre falhas (TBF) e da sobrevida dos equipamentos industriais de uma usina de cana de açúcar.

O método proposto foi dividido nas seguintes etapas: (1) definir a escala a ser utilizada no estudo para ter melhor normalidade para os dados (em horas) considerando dados na escala original ou dados na escala logarítmica (em horas) especialmente para o uso de modelos de ANOVA que requer normalidade dos dados, (2) verificar por meio de modelos de ANOVA se existe diferenças

significativas entre as médias dos tempos de manutenção para os anos usando dados transformados para a escala logarítmica, (3) modelar os tempos entre falhas (MTBF) por uma distribuição de Weibull, obtendo os estimadores de máxima verossimilhança dos parâmetros de forma (γ) para cada ano e, por fim, (4) concluir se o modelo de manutenção adotado pela empresa está adequado de acordo com os resultados da análise estatística elaborada.

5 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada é uma usina de cana de açúcar localizada na região central do interior de São Paulo com fundação em meados do século XX. No decorrer dos anos passou por inúmeras reformas e ampliações. No ano de 2020 com a safra de 8 meses (abril a novembro), sua produção está estimada em 160.000ton de açúcar, 50.000m³ de etanol. A exportação de energia elétrica para a concessionária está previsto para 32.000 MWh com excedente de aproximadamente 40.000 ton. de bagaço que são destinados para transferências ou venda para os mais diferentes fins.

A indústria possui cerca de 170 funcionários, sendo que 45 são dedicados exclusivamente à manutenção da planta que funciona 24 horas por dia, sete dias por semana, em períodos conhecidos como safra e entressafra, conforme histórico do setor e condições climáticas.

O período de safra é compreendido entre o início do mês de abril até o final do mês de novembro, cerca de 240 dias. Nesse período a usina opera de forma integral e constante, com paradas mensais periódicas de 6 horas destinadas a manutenções programadas conciliadas a uma rotina diária de manutenção corretiva emergencial e preditiva. Ainda nesta fase tem-se o planejamento da manutenção de entressafra com os dados e demandas coletados por meio dos históricos, experiência dos operadores mais antigos e relatórios de preditiva. Na entressafra, início do mês de dezembro e final do mês de março, a operação da indústria está totalmente paralisada, devido término da colheita de cana de açúcar. Por isso, a indústria está disponível para a manutenção preventiva, de acordo com o planejamento e o orçamento previamente estabelecido durante a safra.

5.1 Definição da Amostra

Os dados coletados para a análise estatística deste trabalho consistem de 211 registros de falhas da empresa no período de abril de 2018 a Agosto de 2020, divididos em 3 anos de safras (71 ocorrências em 2018 e 70 ocorrências em cada ano 2019 e 2020); entretanto a atual safra (2020) ainda não foi finalizada e está com previsão de término para a segunda quinzena de novembro.

Os registros contêm os tempos entre falhas (TBF) e os tempos de reparo (TTR) relacionados a diferentes equipamentos que podem paralisar indústria, ou seja, neste momento o processo de moagem é interrompido e a moenda é parada.

6 APLICAÇÕES DE MODELOS DE CONFIABILIDADE AOS DADOS DE MANUTENÇÃO

Nessa seção são apresentadas as análises estatísticas dos dados de manutenção da empresa considerada no estudo.

6.1 Resultados

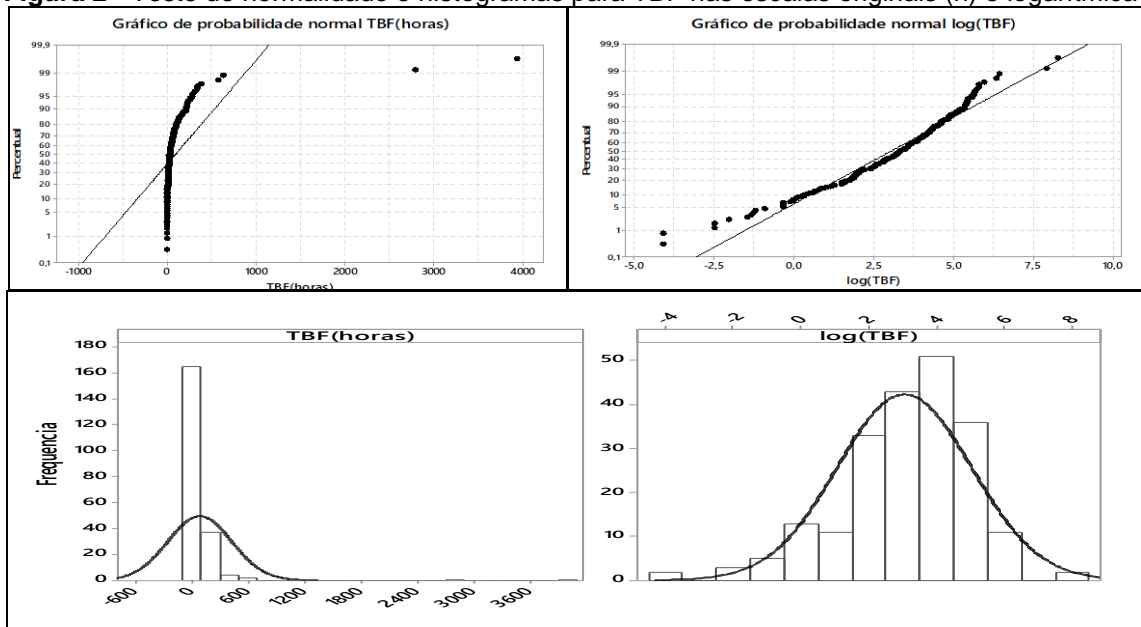
Inicialmente nas Figuras 2 e 3 são verificadas as escalas que melhor se ajustam à distribuição normal para os dados (suposição necessária para usar modelos de ANOVA). Por meio de um teste de normalidade e de histogramas foram comparados os dados de TBF e TTR para as 211 paradas em suas escalas originais e logarítmicas e assim foi possível verificar que em ambos os casos a normalidade foi melhor ajustada usando a escala logarítmica para os dados (ver Figuras 2 e 3).

A Figura 4 apresenta os box-plots dos tempos entre falhas (TBF) e tempos de reparos (TTR) na escala logarítmica para todos os equipamentos que falharam e interromperam o funcionamento da moenda e conseqüentemente pararam o processo industrial. A partir dos gráficos da Figura 4, tem-se algumas conclusões preliminares:

- Log(TBF): tempos entre falhas aparentemente maiores para o ano de 2018.

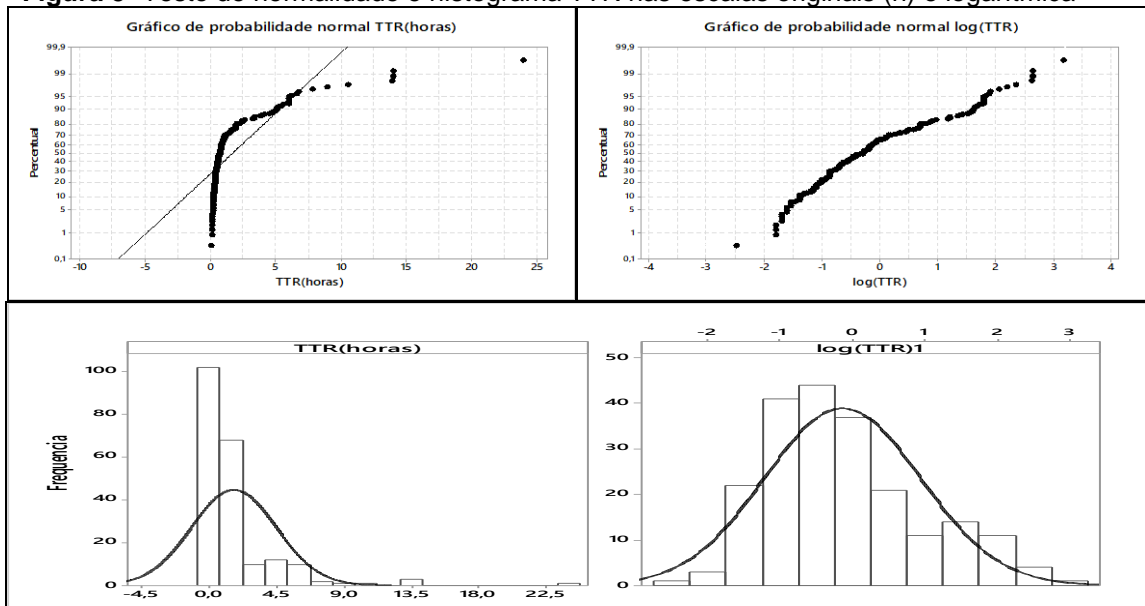
- Log(TTR): tempos de reparos aparentemente maiores para o ano de 2019.

Figura 2 - Teste de normalidade e histogramas para TBF nas escalas originais (h) e logarítmica



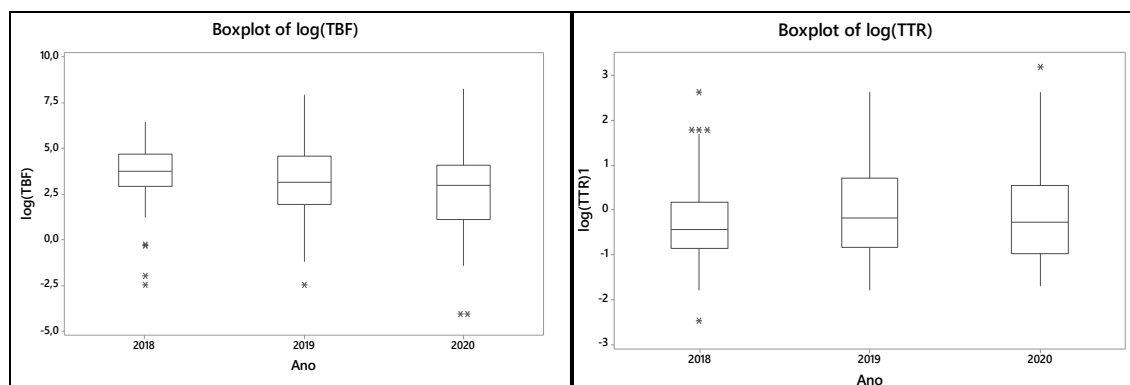
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 3- Teste de normalidade e histograma TTR nas escalas originais (h) e logarítmica



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 4 - Box-plots dos tempos entre falhas (TBF) e tempos de reparos (TTR) para os anos



Fonte: Próprio Autor (2020)

6.2 Uso de um modelo de análise de variância (ANOVA) para comparar as médias de TBF e TTR

A Análise de Variância (ANOVA) é uma metodologia estatística utilizada para testar se um determinado fator tem efeito significativo sobre a variável dependente. Assim, para verificar estatisticamente se há diferenças significativas entre as médias anuais de TTR e TBF para os diferentes fatores considera-se o uso de um modelo de análise de variância com uma classificação (MONTGOMERY; RUNGER, 2010).

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados de ANOVA com uma classificação, obtida usando o software Minitab® para comparar as médias de TBF e TTR na escala logarítmica (melhor normalidade para os dados). Dos resultados dessa tabela em conjunto com os gráficos da Figura 5 (intervalos de confiança 95% para as médias), observou-se que houve diferenças significativas entre as médias do TBF para os anos considerando-se um nível de significância igual a 5%. As suposições necessárias para validação das inferências no modelo de ANOVA foram verificadas a partir de gráficos dos resíduos (normalidade e variância constante dos resíduos).

Tabela 1- Resultados do Modelo de ANOVA para LOG(TBF)

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-p
Ano	2	95,61	47,8025	71,33	< 0,001
Erro	205	137,39	0,6702		
Total	207	232,99			

Fonte: Próprio Autor (2020)

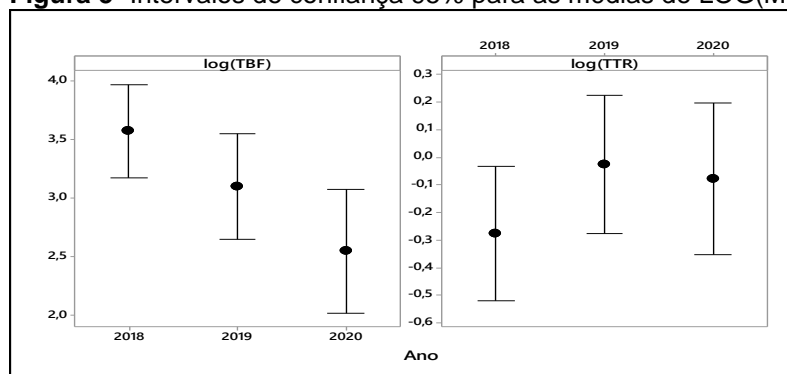
Tabela 2- Resultados do Modelo de ANOVA para LOG(TTR)

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-p
Ano	2	0,5114	0,2557	1,17	0,312
Erro	208	45,4657	0,2186		
Total	210	45,9772			

Fonte: Próprio Autor (2020)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que o valor- $p < 0,001$, isto é, bem menor do que 0,05 o que implica que há diferença significativa entre as médias de TBF (escala logarítmica) entre os anos; por isso é pertinente analisar sob um enfoque de confiabilidade a performance da manutenção para o TBF entre os anos para verificar se a política utilizada é apropriada. Essa análise estatística será apresentada na próxima seção. O mesmo não ocorre para os dados de TTR, pois de acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, temos um valor- $p > 0,05$ e por isso não há evidências de diferenças significativas entre os anos analisados, assim, não são realizadas análises estatísticas complementares sob um enfoque de confiabilidade para os tempos TTR.

Figura 5- Intervalos de confiança 95% para as médias de LOG(MTBF) e log(TTR)



Fonte: Próprio Autor (2020)

6.3 Uso de um modelo de Confiabilidade para os dados TBF na escala original

Nesta seção os dados TBF foram analisados por modelos de confiabilidade assumindo os dados na escala original para verificar a performance da manutenção entre os anos. Duas distribuições de probabilidade muito usadas em dados de confiabilidade dada a flexibilidade de ajuste, são as distribuições de Weibull apresentada na seção 2.2 e a distribuição log-normal (caracterizada pela distribuição normal para os logaritmos dos dados). A partir de gráficos de probabilidade Weibull

e log-normal obtidos a partir dos modelos ajustados pelos estimadores de máxima verossimilhança (EMV) usando o software Minitab®, observou-se que a distribuição Weibull foi mais bem ajustada pelos dados (pontos mais próximos da reta no gráfico de probabilidade Weibull do que no gráfico de probabilidade Log-normal) conforme observado nos gráficos da Figura 6.

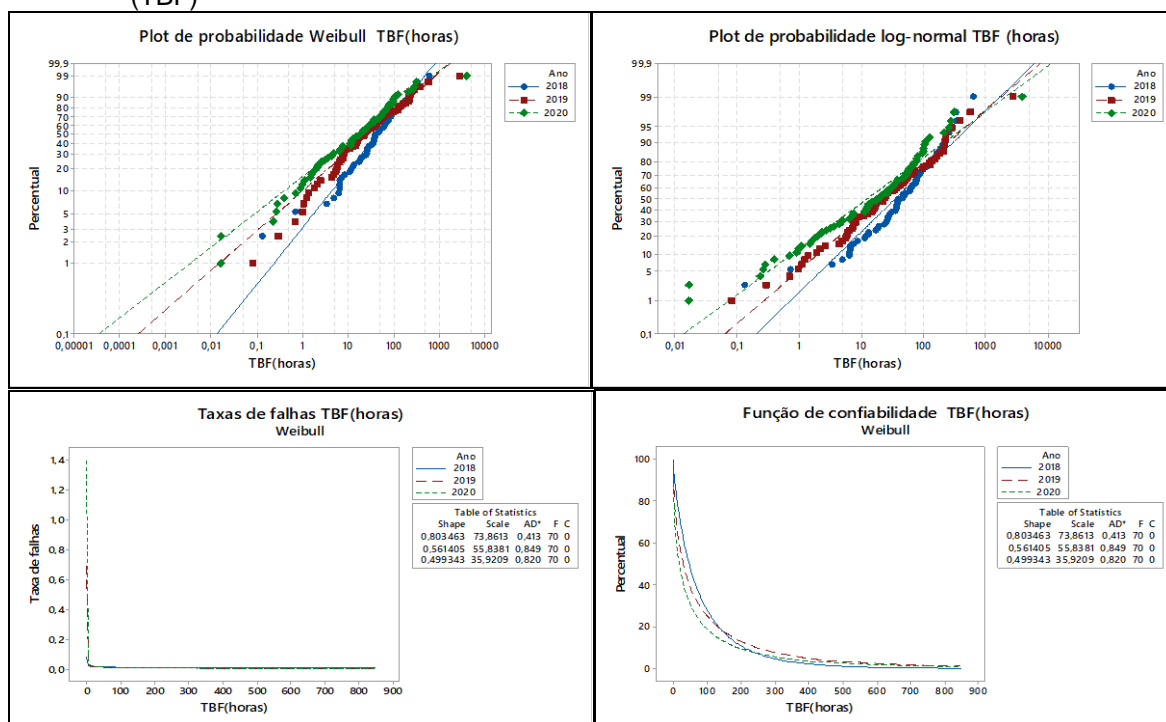
Assim, foi utilizada a distribuição Weibull para obtenção das curvas de confiabilidade estimadas pelo método de máxima verossimilhança para os tempos MTBF nos diferentes anos reportados no banco de dados; as taxas de falhas, as funções de confiabilidades e os estimadores (EMV) dos parâmetros de forma e escala foram também apresentados na Figura 6.

Com os resultados obtidos da análise estatística assumindo o modelo de confiabilidade de Weibull foi possível estimar o parâmetro de forma γ ao longo dos anos e assim projetar o ciclo de vida dos equipamentos da empresa. A Figura 7 apresenta a curva da banheira e mostra a provável posição da linha de produção ao longo de seu ciclo de vida.

A Figura 8 mostra que o parâmetro de forma (γ) associado a cada ano foi estimado por um valor $\gamma < 1$, bem distante de $\gamma \cong 1$ o que indica que a manutenção usada pela empresa está fora da fase de maturidade. Também é possível observar que houve uma tendência de queda no valor do parâmetro de forma durante os anos subsequentes.

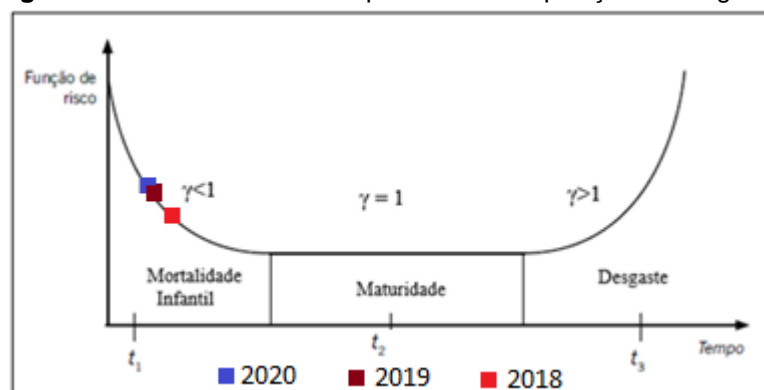
Como foi mostrado anteriormente podemos constatar que 2018 foi o ano com melhores resultados referentes aos parâmetros analisados, pois teve maior confiabilidade, menor taxa de falha e o parâmetro de forma mais próximo da fase de maturidade $\gamma \cong 1$ (isso significa maiores tempos entre falhas, também confirmado nas Figuras 4 e 5). Em contrapartida o ano de 2020 obteve piores resultados, porém deve-se levar em conta que diferente dos demais os dados desse ano são parciais e devem ser alterados com o decorrer da safra.

Figura 6- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal taxas de falhas e confiabilidade Weibull (TBF)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 7- Curva da banheira representando a posição ao longo dos anos



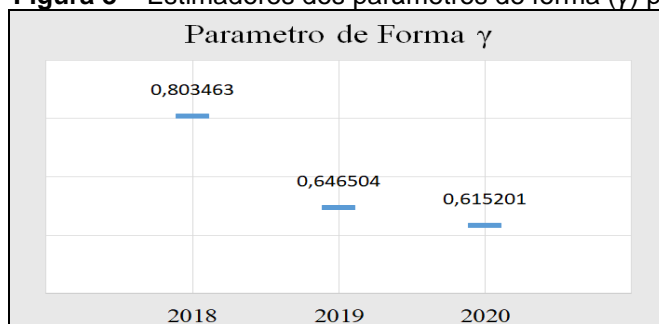
Fonte: Próprio Autor (2020)

7 Conclusões e considerações finais

O objetivo deste artigo foi verificar por meio do uso da metodologia MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) se a estratégia de manutenção adotada por uma Usina de Cana-de-açúcar era a mais adequada para o gerenciamento da sua manutenção. Para isso fez-se necessário a definição da posição global da unidade industrial no ciclo de vida da curva da banheira. O método de pesquisa adotado apoiou-se na modelagem estatística mediante o emprego de modelos de

ANOVA aos tempos de reparo (TTR) e aos tempos entre falhas (TBF) na escala logarítmica e modelos de confiabilidade aos tempos entre falhas (TBF) na escala original.

Figura 8 – Estimadores dos parâmetros de forma (γ) para os anos (TBF)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Tabela 3 – Estratégia de manutenção do ciclo de vida de Mortalidade infantil e o praticado pela empresa

Fase	Estratégia	Decorrencia	Recomendado	Empresa
Mortalidade infantil (Falhas decrescente) $\gamma < 1$	Emergência	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.	SIM	SIM
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.	SIM	SIM
	Preditiva	Monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência.	NÃO	SIM
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem.	NÃO	SIM

Fonte: Próprio Autor (2020)

Após análise dos dados foi possível identificar que, na curva da banheira, a indústria estava em fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) e desta forma deveria utilizar a estratégia de manutenção adequada para esse período. A Tabela 3 mostra um comparativo entre as práticas de manutenções recomendadas para fase de Mortalidade infantil de acordo com Sellitto (2005) e a praticada pela empresa.

Mediante os resultados obtidos e a identificação da posição da linha de produção na curva da banheira, fica notório que a estratégia de manutenção

adotada durante todo o período não é a mais adequada, porque utiliza de forma intensa a manutenção preventiva e aplica de forma precipitada a manutenção preditiva.

Na região de mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras devido a erros nos processos de fabricação, na instalação ou na aplicação dos materiais dos equipamentos (MENGUE; SELLITTO, 2013). De acordo com a Tabela 3, as estratégias de manutenção recomendadas seriam a corretiva e a emergencial, pois buscariam a causa raiz dos possíveis defeitos e os eliminaria da operação. Porém o setor sucroalcooleiro, assim como a empresa analisada possui como prática apoiar suas decisões nas experiências dos funcionários e no histórico de quebras e com isso utiliza de forma intensa a manutenção preventiva durante a entressafra, por meio da substituição maciça de itens estáticos e rotativos (elétricos e mecânicos) sem um critério bem definido por inspeções, laudos técnicos ou estudos detalhados.

Com tudo que foi analisado e discutido neste trabalho espera-se que os resultados possam contribuir com futuras pesquisas e incentivo para o aprimoramento das técnicas de confiabilidade para o setor, já que a confiabilidade mostrou-se ser uma poderosa ferramenta para auxiliar os gestores de manutenção nas decisões de escolha da estratégia mais adequada para os equipamentos.

Como proposta de continuidade deste trabalho, sugere-se ampliar para a modelagem estatística para os equipamentos causadores das paradas e os impactos da manutenção preditiva de hibernação na conservação dos ativos de uma usina durante o período de entressafra.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6023**: informação e documentação: elaboração: referências. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10520**: informação e documentação: citação em documentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 7 p.

ALSYOUF, I. Maintenance practices in swedish industries: survey results. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 1, p. 212-223, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.005>

AZIZ, A., AHMED, S., KHAN, F., STACK, C., LIND, A. Operational risk assessment model for marine vessels. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 185, p. 348-361, 2019. [https://doi.org/10.1002/1099-1638\(200007/08\)16:4<313::AID-QRE434>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1099-1638(200007/08)16:4<313::AID-QRE434>3.0.CO;2-U)

BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 16, n. 4, p. 313-324, 2000.

CERVEIRA, D.; SELLITTO, M. A.. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1615>

FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. **Industrial Management & Data Systems**, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002. <https://doi.org/10.1108/02635570210423226>

FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J. L. D.; **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GANDHARE, B. S.; AKARTE, M. M.; PATIL, P. P. Maintenance performance measurement— a case of the sugar industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 1, p. 79-100, 2018. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2016-0031>

GIOLO, S. R.; COLOSIMO, E. A. **Análise de sobrevivência aplicada**. Edgard Blucher, 2006.

HAMEED, Z.; VATN, J.; HEGGSET, J. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2154-2165, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.008>

HOLMBERG, K.. **Competitive reliability 1996–2000**. Technology Programme Report, v.5, 2001. Final Report, National Technology Agency, Helsinki, 2001.

KOMNINAKIS, D.. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) UNIARA, Araraquara 2017.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitmark, 2001.

LEWIS, E.E. **Introduction to reliability engineering**. John Wiley & Sons, 1994.

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D.. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da mcc em um cenário de produção JIT. **Revista Produção**, Porto Alegre, v. 24, n. 3, p. 675-686, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000065>

MENGUE, D. C.; SELLITTO, M. A. Estratégia de manutenção baseada em funções de

confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v.13, n. 2, p. 759-783, 2013. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v13i2.1341>

MOREIRA NETO, L. S.; TAVARES, D. M. L.. Aplicabilidade da mcc em uma empresa de mineração. In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35, 2015, Fortaleza. **Anais** [...] Fortaleza, 2015. [CE.]

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)83005-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)83005-6)

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; LOURES, E. F. R.. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 45, p. 180-194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.09.003>

SELLITTO, M. A. 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.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132005000100005>

SELLITTO, M.; BORCHARDT, M.; ARAÚJO, D. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. In: ENEGEP, ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2022. **Anais** [...]. Curitiba: ABEPRO, 2002.

SOUZA, A. L. B.; SANTOS, J. S.; SILVA, J. C.; BRAGA, D.; TAVARES NETO; J. I. H.. Gestão da manutenção no setor de produção de açúcar em uma indústria sucroalcooleira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 38, 2018, Maceió. **Anais** [...]. Maceió. [AL.] https://doi.org/10.14488/ENEGEP2018_TN_STP_258_483_36030

SOUZA, S. S.; LIMA, C. R. C.. Manutenção Centrada em Confiabilidade como ferramenta estratégica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23, 2003, Ouro Preto. **Anais** [...] Minas Gerais, 2015. [MG.]

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. **Procedia technology**, v. 25, p. 1080-1087, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211>

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L.. CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 633-640, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.012>

WEIBULL, W. A. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, 1951,18, 292–297.



Artigo recebido em: 17/09/2020 e aceito para publicação em: 11/12/2020
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v20i4.4130>