



Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE EM SEPARADORES MAGNÉTICOS EM PROL DA MELHORIA CONTÍNUA

AVAILABILITY AND RELIABILITY ANALYSIS OF MAGNETIC SEPARATORS FOR CONTINUOUS IMPROVEMENT

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE SEPARADORES MAGNÉTICOS PARA MEJORA CONTINUA

John Márcio de Oliveira Coelho ¹, Natália Fernanda Santos Pereira ^{2*}, Leandro César Mol Barbosa ³,
Clárison Gonçalves Gamarano ⁴, & Marco Antônio Sabará ⁵

^{1 2 3 4 5} Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Congonhas

¹johnmarcio09.jm@gmail.com ^{2*}natalia.pereira@ifmg.edu.br ³leandro.mol@ifmg.edu.br ⁴clarisongoncalves@gmail.com

⁵marco.sabara@ifmg.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 23.07.2023

Aprovado: 15.09.2023

Disponibilizado: 19.11.2023

PALAVRAS-CHAVE: Disponibilidade; Confiabilidade; FMEA.

KEYWORDS: Availability; Reliability; FMEA.

PALABRAS CLAVE: Disponibilidad; Confiabilidad; FMEA.

*Autor Correspondente: Pereira, N. F. S.

RESUMO

Devido a necessidade de melhoria contínua em busca da redução de falhas em separadores magnéticos no processo de concentração de uma mineração, foi realizado uma análise de disponibilidade e confiabilidade nesses equipamentos (SM-A, SM-B, SM-C e SM-D). Diante disso, o método de pesquisa foi o estudo de caso descritivo, o qual consistiu em realizar análises quantitativas dos indicadores de manutenção. Além disso, foram utilizadas as ferramentas Diagrama de Pareto e FMEA para as tomadas de decisões mais assertivas. Sendo assim, foi calculado os indicadores MTTR, MTBF e Disponibilidade no período de janeiro de 2021 à janeiro de 2023, em que se encontraram valores de disponibilidade referentes a 98,03% para o SM-A, 95,95% para o SM-B, 97,31% para o SM-C e 98,73% para o SM-D. Com o auxílio do software ProConf2000, foi modelada a distribuição Weibull para o cálculo da confiabilidade para uma missão de 360 horas, no qual obteve valores de 37,26%, 31,40%, 43,13% e 38,81% respectivamente para cada equipamento. Por fim, foi realizado o Diagrama de Pareto e discutido as principais falhas encontradas por meio do FMEA. Sendo assim, espera-se que este estudo contribua para as análises dos indicadores de manutenção no intuito de reduzir as falhas dos equipamentos.

ABSTRACT

Due to the need for continuous improvement in order to reduce failures in magnetic separators in the mining concentration process, an analysis of the availability and reliability of these equipment (SM-A, SM-B, SM-C and SM-D) was carried out. Therefore, the research method was the descriptive case study, which consisted of carrying out quantitative analyzes of the maintenance indicators. In addition, the Pareto Diagram and FMEA tools were used for

more assertive decision-making. Therefore, the MTTR, MTBF and Availability indicators were calculated from January 2021 to January 2023, in which availability values were found for 98.03% for SM-A, 95.95% for SM-B, 97.31% for SM-C and 98.73% for SM-D. With the help of the ProConf2000 software, the Weibull distribution was modeled to calculate the reliability for a 360-hour mission, which obtained values of 37.26%, 31.40%, 43.13% and 38.81% respectively for each equipment. Finally, the Pareto Diagram was performed and the main failures found through the FMEA were discussed. Therefore, this study is expected to contribute to the analysis of maintenance indicators in order to reduce equipment failures.

RESUMEN

Debido a la necesidad de mejora continua para reducir fallas en separadores magnéticos en el proceso de concentración minera, se realizó un análisis de disponibilidad y confiabilidad de estos equipos (SM-A, SM-B, SM-C y SM-D). Por lo tanto, el método de investigación fue el estudio de caso descriptivo, el cual consistió en realizar análisis cuantitativos de los indicadores de mantenimiento. Además, se utilizaron las herramientas Diagrama de Pareto y FMEA para una toma de decisiones más asertiva. Por lo tanto, se calcularon los indicadores MTTR, MTBF y Disponibilidad de enero de 2021 a enero de 2023, en los que se encontraron valores de disponibilidad de 98,03% para SM-A, 95,95% para SM-B, 97,31% para SM-C y 98,73% para SM-D. Con ayuda del software ProConf2000 se modeló la distribución de Weibull para calcular la confiabilidad para una misión de 360 horas, la cual obtuvo valores de 37.26%, 31.40%, 43.13% y 38.81% respectivamente para cada equipo. Finalmente, se realizó el Diagrama de Pareto y se discutieron las principales fallas encontradas a través del FMEA. Por lo tanto, se espera que este estudio contribuya al análisis de indicadores de mantenimiento con el fin de reducir las fallas de los equipos.



1. INTRODUÇÃO

Em um contexto global, as empresas industriais estão sempre em busca de maior produtividade como forma de se tornarem mais competitivas no mercado. Sendo assim, as mineradoras tem como objetivo em seu processo de beneficiamento manter os equipamentos confiáveis e disponíveis no intuito de aumentar cada vez mais o volume de produção e qualidade do minério de ferro.

Dentre as principais formas de alcançar esses objetivos, destacam-se as estratégias de manutenção, as quais irão reduzir as falhas dos equipamentos. Conforme Netto (2018), a manutenção tem o papel de preservar bons níveis de disponibilidade e confiabilidade para essas máquinas, de forma que mantenham sua capacidade operacional em prol da produção. Kardec e Nascif (2009) retratam a manutenção estratégica como aliada dos resultados empresarias. Para isso, ela deve ser eficaz e capaz de reduzir a probabilidade de uma parada de produção não programada.

Conforme Andrade (2011), manter um equipamento com falha zero é inviável, devido a restrições de ordem técnica e econômica. Logo, é necessário entender o comportamento de suas falhas a fim de se planejar um bom programa de manutenção.

Portanto, quando as empresas apresentam um bom controle com base em seus indicadores de manutenção, pode-se entender que seus equipamentos são confiáveis ao ponto de ampliar o lucro da empresa, aumentar sua produção e reduzir paradas não programadas que geram aumento de custos. Segundo Branco Filho (2008), a utilização dos indicadores é essencial para que a empresa tenha um direcionamento de seus objetivos. Além disso, com o Planejamento e Controle da Manutenção esses parâmetros servem para realizar melhorias contínuas no sistema. Nesse contexto, como forma de atuar e controlar essas falhas, as empresas adotam indicadores que tornam as manutenções mais assertivas.

Conforme Gomes et al. (2018), as empresas definem os indicadores para a gestão da manutenção de acordo com a estratégia adotada com o objetivo de acrescentar relevância para a empresa. Dessa forma, alguns dos indicadores podem ser sugeridos, como: *Mean Time Between Failure* (MTBF); *Mean Time to Repair* (MTTR), Disponibilidade e Confiabilidade.

Sendo assim, o presente trabalho foi realizado em uma empresa de mineração, especificamente em um processo de concentração composto por quatro separadores magnéticos com a finalidade de propor melhorias para esses equipamentos, baseando-se em uma análise diagnóstica por meio dos cálculos da confiabilidade e disponibilidade. Além disso, foram utilizadas as ferramentas como o Diagrama de Pareto para identificar e definir as principais falhas que impactam no processo e o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) para analisar tais falhas e direcionar as ações e propostas mais assertivas.

Como justificativa da aplicação do trabalho, pode-se ressaltar a necessidade de realizar a melhoria contínua desse processo, dada a importância desses equipamentos. Esses equipamentos são responsáveis por recuperar toneladas diárias de minério de ferro, reduzindo o desperdício e otimizando o uso dos recursos minerais. Além disso, esse processo



está também ligado à questão competitiva no mercado visto que ele busca aumentar o teor e qualidade do minério de ferro.

Este artigo está dividido da seguinte estrutura: além desta introdução, foi apresentado o referencial teórico, abordando os conceitos de manutenção, indicadores, falhas, confiabilidade, MTBF, MTTR, disponibilidade e manutenção centrada em confiabilidade (MCC). Buscou-se estudos nas bases de dados Scopus e Web of Science. As palavras chaves utilizadas foram: “*maintenance*”, “*indicators*”, “*failures*”, “*availability*” e “*reliability*”. Em seguida, foi descrita a metodologia, apresentando a caracterização do estudo e os passos metodológicos utilizados. Na sequência foram apresentados os resultados dos indicadores e realizada uma discussão para a proposição das melhorias cabíveis. Por fim, foram expressas as considerações finais do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Conforme a NBR 5462 (1994) a manutenção pode ser entendida como o reestabelecimento de um ativo às suas condições operacionais normais ou garantia de permanência do equipamento nessas condições, através do conjunto de atividades técnicas e administrativas. Para tanto, a manutenção deve assegurar a disponibilidade, atendendo às necessidades do setor com confiabilidade, além de promover redução de custos, segurança e preservação do meio ambiente (Soeiro et al., 2017).

Diante disso, para manter os ativos da empresa são adotadas estratégias baseadas nos tipos de manutenção, como a corretiva, preventiva e preditiva. Sendo assim, conforme a NBR 5462 (1994) a manutenção corretiva está relacionada à realização da atividade após a ocorrência de falha funcional do equipamento no intuito de recolocar o mesmo em condições operacionais. Já a manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados com a finalidade de reduzir a possibilidade de falha. Por fim, a manutenção preditiva consiste na aplicação de técnicas de análises garantindo uma qualidade de serviço desejada no intuito de reduzir a manutenção preventiva e corretiva.

Uma definição mais moderna é proposta por Kardec e Nascif (2009) em que o objetivo da manutenção é de “garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender um processo de produção e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados”. Os autores explicam que a manutenção se encontra na sua quarta geração, cuja atividades possuem três principais objetivos: confiabilidade; disponibilidade; e manutenibilidade.

Santos et al. (2022) realizaram uma análise sistemática da literatura da aplicação da confiabilidade na manutenção de sistemas reparáveis (são passíveis de reparos após a falha) e sobre modelos probabilísticos que foram implementados na manutenção entre os anos 2018 e 2022. Os métodos tradicionais de manutenção podem levar ao desperdício de recursos de manutenção e altos custos de manutenção. As análises de priorização de confiabilidade e manutenção podem ajudar os gestores a otimizar estratégias de manutenção e reduzir o custo



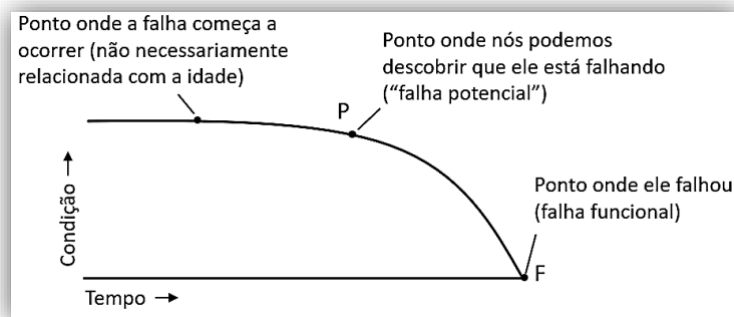
total. Sendo necessário estabelecer índice de confiabilidade na análise de priorização da manutenção.

2.2. INDICADORES DE MANUTENÇÃO

De acordo com Paschoal et al (2009), a utilização dos indicadores de manutenção é responsável em garantir as informações necessárias à avaliação das atividades de manutenção executadas, no intuito de possibilitar a correta tomada de decisões em prol do aumento da produtividade da empresa. Dessa forma, antes de conhecer os conceitos por trás de cada indicador de manutenção é necessário entender o conceito de falha, relacionado aos equipamentos.

Para Lafraia (2001) uma falha pode ser entendida como a perda de uma função. Conforme Moubray (2000), a falha pode ser representada por uma curva denominada de Potencial de Falha (PF). Essa curva apresenta relação com a confiabilidade do equipamento visto que é analisado a *performance* do mesmo sobre o seu tempo de funcionamento. Sendo assim, a curva PF demonstra a evolução da falha potencial em função do tempo (representada por uma queda na condição do equipamento) até a ocorrência da falha funcional (Figura 1). A falha potencial conhecida também como modo de falha, pode ser entendida como uma indicação ou um sinal de que uma falha funcional pode ocorrer. Já a falha funcional é aquela responsável pela incapacidade de qualquer ativo em atingir um padrão de desempenho desejado.

Figura 1. Curva Potencial de Falha.



Fonte: Adaptado de Moubray (2000).

Entre as principais medidas utilizadas na manutenção, destaca-se a confiabilidade, grandeza proporcionalmente contrária à probabilidade de falhas. Para Lafraia (2001), a confiabilidade é associada à confiança do equipamento em não apresentar falhas, ou seja, quanto menor o número de falhas, maior a confiabilidade do equipamento.

2.2.1. CONFIABILIDADE

Segundo a NBR 5462 (1994), a confiabilidade compreende a probabilidade de não ocorrer falhas durante um dado período de funcionamento de um equipamento, fazendo com que o mesmo efetue suas funções sem interrupções em um intervalo de tempo. Desta forma, um bom resultado em termos de confiabilidade indica indícios de uma operação mais eficiente, com manutenções eficazes, menor tempo de reparos, custos operacionais mais controlados e uma alta vida útil do equipamento.

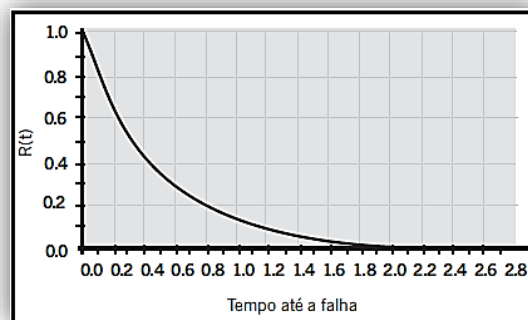


Como consequência desse contexto, a busca por uma maior confiabilidade está relacionada às vantagens, tais como: aumento dos lucros através da diminuição de paradas não programadas, muitas vezes com a eliminação de suas causas básicas; baixos custos de manutenção, operação e apoio; fornecimento de soluções conforme as necessidades das indústrias, como o aumento da produção de produtos ou unidades mais lucrativas; e investimentos em segurança, meio ambiente e continuidade operacional (Lafraia, 2001).

Para entender a confiabilidade de um determinado item, pode-se utilizar da modelagem estatística, por meio de uma distribuição de probabilidade que represente o comportamento das falhas no tempo. De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), as principais distribuições empregadas nessa análise são a Exponencial, Weibull, Gama e Lognormal.

Conforme Lafraia (2001), a distribuição exponencial é utilizada em sistemas com taxa de falhas constantes em relação ao tempo, fazendo com que a distribuição da confiabilidade apresente um aspecto exponencial. Como exemplo de sua aplicação, ela pode ser encontrada em sistemas complexos com taxas de falhas independentes, sistemas com substituições de vários componentes antes da falha devido à manutenção preventiva e em equipamentos que apresentam quantidade superior a 200 componentes submetidos a mais de três manutenções corretivas e preventivas. Essa distribuição pode ser representada na Figura 2, onde $R(t)$ é conhecido como a função da confiabilidade.

Figura 2. Representação de Confiabilidade da Distribuição Exponencial.



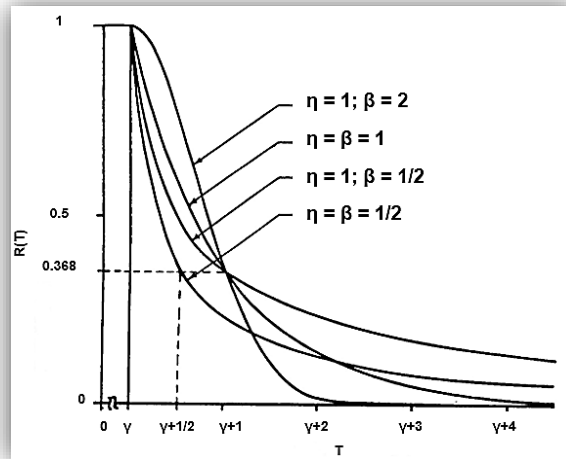
Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2009).

Quanto à distribuição de Weibull, para Pereira (2011), essa apresenta uma melhor maleabilidade para acomodar os dados de falha, exigindo menos ocorrências que as demais distribuições para a sua averiguação. Além do mais, ela permite obter uma representação gráfica simples e de prática aplicação, com poucos parâmetros significativos para a configuração da curva de falha. De acordo com Moreno et al. (2017), esses parâmetros são capazes de transformar a curva em outros tipos de distribuição, como por exemplo a exponencial. Esses são conhecidos como o parâmetro de forma Beta (β), a escala Eta (η) e o de localização Gamma (γ).

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), o parâmetro de forma β é responsável por alterar as formas que a função pode assumir. Já o parâmetro de escala η tem o papel de modificar o eixo do tempo, controlando as dimensões da curva. E o parâmetro de localização γ por sua vez, é utilizado para deslocar a distribuição ao longo do eixo horizontal (tempo) (Figura 3).



Figura 3. Representação das funções de confiabilidade de Weibull de acordo com os valores de seus parâmetros.

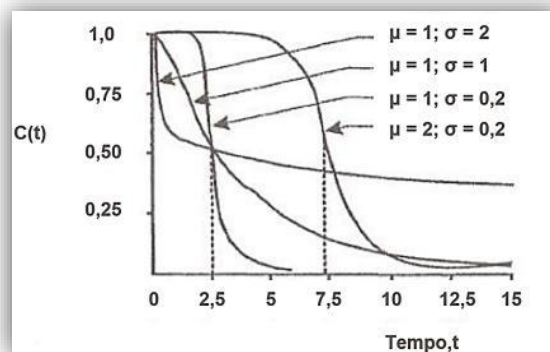


Fonte: Adaptado de Moreno et al (2017).

A distribuição Gama, de acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), pode ser entendida como uma forma generalizada da distribuição exponencial. Seu formato da densidade de distribuição apresenta similaridade com a Weibull, sendo utilizada em casos em que os tempos entre falhas podem ser distribuídos exponencialmente. Além disso, os autores retratam que é difícil identificar graficamente a diferença da distribuição Gama com a Weibull.

Por fim, conforme Lafraia (2001) a distribuição Lognormal está relacionada com a distribuição Normal de forma que a mesma apresenta forma variada e melhor ajuste da população. Ela é utilizada para componentes ou peças sujeitas ao desgaste e fadiga, tais como: rolamentos; componentes mecânicos; e resistência dos metais submetidos a esforços. Essa distribuição pode ser representada de acordo com a Figura 4, onde μ é a média, σ o desvio padrão da distribuição e $C(t)$ é a função da confiabilidade.

Figura 4. Representação de Confiabilidade da Distribuição Lognormal.



Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2017).

Para uma aplicação, com o auxílio de *softwares* de modelagem é possível determinar qual curva melhor se adequa aos dados apresentados. Como exemplo, o programa ProConf 2000 desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul tem a finalidade de ajustar as distribuições de tempos de falhas para dados de confiabilidade, por meio de gráficos e análises, como afirma Fritsch e Ribeiro (1998).



Esse *software* foi utilizado para os estudos de confiabilidade no livro “Confiabilidade e Manutenção Industrial” realizado pelos autores Fogliatto e Ribeiro (2009). Como também em trabalhos relacionados à “Estratégia de Manutenção em Funções de Confiabilidade para uma Bomba Centrífuga Petrolífera” (Mengue & Sellitto, 2013), “Análise de Indicadores de Desempenho da Manutenção de um Moinho de Bolas” (Gomes et al., 2013) e “Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise Quantitativa de um Forno Elétrico a Indução” (Cerveira & Sellitto, 2015).

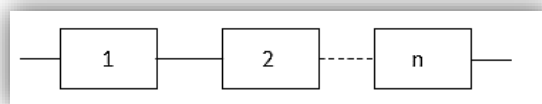
2.2.2. CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Assim como a confiabilidade de um equipamento pode ser expressa por meio de uma curva de probabilidade, a determinação da confiabilidade de um sistema também pode ser calculada. Desta forma, a interação entre equipamentos que se relacionam entre si pode ser utilizada para determinar a confiabilidade de um processo ou sistema (Lafraia, 2001). Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), sistemas são um conjunto de componentes interconectados os quais devem executar funções com um bom desempenho e confiabilidade.

Para se calcular a confiabilidade de um sistema simples, esse deve ser representado por diagramas de blocos, com a confiabilidade de seus componentes isolados. Esses sistemas podem ser representados em série, em paralelo, ou por uma mescla de ambos (Lafraia, 2001). A representação por diagrama de blocos apresenta fácil visualização de todas as partes que compõem o sistema. É importante que a probabilidade e taxa de falhas dos componentes sejam determinadas com a finalidade de encontrar a confiabilidade do sistema como um todo (Azevedo et al., 2012).

Nesse contexto, Fogliatto e Ribeiro (2009) apontam que os sistemas em série são componentes conectados de forma que a falha de um deles impactam em um todo, ou seja, para que o sistema funcione é necessário que todos os itens estejam operantes (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de blocos em sistema em série.



Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009).

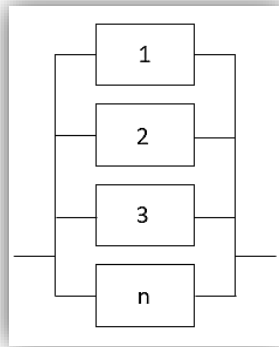
Para se obter a confiabilidade de um sistema em série baseando-se na confiabilidade de cada componente, deve-se fazer uso da Equação 1 (Lafraia, 2001):

$$C_0(t) = C_1(t) \times C_2(t) \times \dots \times C_n(t) \quad \text{Equação 1}$$

Já no sistema paralelo, conforme Lafraia (2001), os componentes se conectam de forma que a falha no sistema como um todo ocorre quando todos os componentes estiverem simultaneamente interrompidos, ou seja, é necessário que todos falhem para o sistema falhar (Figura 6).



Figura 6. Diagrama de blocos em sistema em série



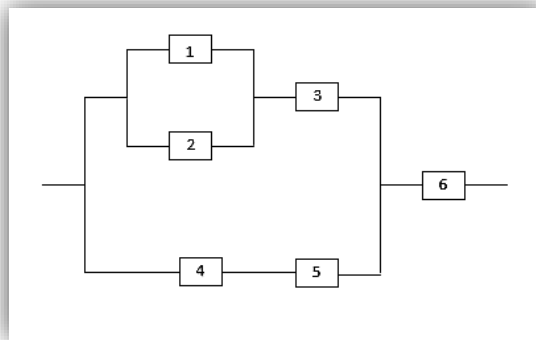
Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

A Equação 2 é utilizada para obter confiabilidade de um sistema em paralelo em função da confiabilidade de cada componente, conforme indicado por (Lafraia, 2001):

$$C_0 = 1 - \{[1 - C_1(t)] \times [1 - C_2(t)] \times [1 - C_3(t)] \times \dots \times [1 - C_n(t)]\} \quad \text{Equação 2}$$

Os sistemas mistos compreendem a combinações dos sistemas em série e em paralelo, podendo ser simples ou complexos, conforme sua configuração (Figura 7).

Figura 7. Diagrama de blocos em sistema misto



Fonte: Adaptado de Azevedo e Ferreira (2012)

2.2.3. ÍNDICES MTBF, MTTR E DISPONIBILIDADE

Além da determinação da confiabilidade, existem outros índices que são utilizados pela equipe de manutenção para a verificação das condições de operação de um determinado equipamento. Dentre eles está o *Mean Time Between Failures* (MTBF) ou, traduzido para o português, Tempo Médio entre Falhas (TMEF). Ele é um indicador definido como a divisão da soma das horas disponíveis do equipamento para operação (HD), pelo número de intervenções corretivas (NC) no período, conforme a Equação 3 (Viana, 2002):

$$MTBF = \frac{HD}{NC} \quad \text{Equação 3}$$

Para Soeiro et al. (2017), entende-se que esse indicador é utilizado apenas para componentes reparáveis, o qual está ligado proporcionalmente à disponibilidade, em que quanto maior for o MTBF, maior será a disponibilidade do equipamento. De acordo com Silva (2018), a análise desse indicador deve ser realizada em períodos longos, acima de um ano, no intuito de verificar o maior número de quebras possíveis, tornando o MTBF mais assertivo. Assim, quanto maior o tempo maior será a probabilidade de as falhas ocorrerem.



Outro indicador bastante utilizado é o *Mean time to Repair* (MTTR) ou Tempo Médio para Reparo (TMPR), definido como a divisão da soma das horas de indisponibilidade devido à manutenção (HIM), pelo número de intervenções corretivas realizadas nesse período (NC), (Equação 4) (Viana, 2002):

$$MTTR = \frac{HIM}{NC} \quad \text{Equação 4}$$

De acordo com Soeiro et al. (2017), o MTTR contabiliza o tempo de reparo a partir do início da ocorrência da falha do equipamento até a finalização dela a qual é encerrada por meio do reestabelecimento das condições operacionais do equipamento para a produção. Conforme Silva (2018), as empresas buscam o menor MTTR possível, pois quer dizer que a resposta de manutenção é rápida e as falhas dos equipamentos ocorrem poucas vezes.

Outro indicador importante na manutenção é a disponibilidade. A NBR 5462 (1994) refere-se à disponibilidade como a capacidade de um ativo exercer suas condições funcionais em um período determinado, considerando os aspectos de confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção. Para se ter um ganho nesse indicador, é necessário aumentar o intervalo entre as falhas e diminuir o tempo de reparo (Mengue & Sellito, 2013).

De acordo com Viana (2002), a disponibilidade é bastante importante para a manutenção, pois ela visa disponibilizar o equipamento com o maior número de horas possíveis para a operação. Além disso, esse indicador é ideal para a empresa, devido ao mesmo analisar o comportamento dos ativos e verificar qual deles estão impactando negativamente na disponibilidade da planta. Conforme Kardec e Nascif (2009), a disponibilidade inerente pode ser calculada por meio da Equação 5 a qual considera os tempos entre falhas e os tempos de reparo dos equipamentos:

$$\text{Disponibilidade Inerente (\%)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

2.3. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)

Após o entendimento dos indicadores é necessário ter o conhecimento de como utilizá-los para aumentar as chances de sucesso da empresa. Sendo assim, uma das principais metodologias que visa a prevenção de falhas e a melhoria dos indicadores é a MCC que, de acordo com Moubray (2000), estuda o comportamento dos equipamentos, analisando suas falhas e definindo as melhores estratégias de manutenções.

Segundo Kardec e Nascif (2009) os resultados da MCC são válidos para um melhor conhecimento do funcionamento do equipamento visto que é necessário estudar suas falhas e desenvolver métodos para evitá-las. Esses métodos a partir de um bom programa de manutenção são capazes de alterar uma baixa confiabilidade para uma alta confiabilidade de um equipamento (Lafraia, 2001).

Diante disso, uma das principais ferramentas que auxiliam na aplicação da MCC é a FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* ou Análise de Modos de Falhas e Efeitos). De acordo Lafraia (2001), utiliza-se essa metodologia para auxiliar na identificação dos modos de falhas, capazes de levar à falha funcional do ativo. Para tal, em sua aplicação, não se deve listar todos os modos de falhas possíveis, mas sim aqueles que apresentam maior probabilidade de



ocorrência. De acordo com Moubray (2000), após identificar cada modo de falha é possível entender suas consequências (efeitos da falha), investigá-las e tomar as devidas decisões para antecipar, corrigir, prevenir ou reprojeter o item ou até mesmo todo o sistema.

Segundo Lafraia (2001), o passo a passo para a implementação da FMEA conta com a identificação dos modos de falhas, suas causas básicas e os efeitos das falhas para cada ativo. Além disso, conforme Kardec e Nascif (2009), é realizado uma análise crítica de forma quantitativa a respeito desses modos de falhas, à qual é denominada de NPR (Número de Prioridade de Risco). Esse índice é calculado a partir do produto da “Frequência” pela “Detectabilidade” dos modos de falha e pela “Gravidade” da falha, fazendo com que sejam priorizadas as tratativas para solucionar cada risco da falha.

3. METODOLOGIA

Este artigo teve como objetivo a realização de uma análise diagnóstica a partir dos cálculos de confiabilidade e disponibilidade em um processo de concentração, composto por quatro separadores magnéticos em prol da melhoria contínua. Sendo assim, optou-se por realizar um estudo de caso como procedimento de pesquisa, conforme se descreve no tópico 3. Já no tópico 3.2 é apresentado o detalhamento deste estudo de caso.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Yin (2015), para se escolher o método de pesquisa a ser adotado, uma condição primordial e importante é o tipo de questão que se busca responder. O autor indica o estudo de caso como o método de pesquisa ideal, se as questões que envolvem a identificação do tipo “como” e “porque” certos fenômenos ocorrem. O presente trabalho buscou verificar “como” aumentar o desempenho de separadores magnéticos por meio da análise dos dados de tempo de falha, gerando informações sobre a confiabilidade e disponibilidade dos mesmos e “porque” aumentar a confiabilidade e disponibilidade é importante para a empresa em estudo.

Ainda segundo Yin (2015), o estudo de caso pode ser definido em duas partes. A primeira parte investiga um fenômeno contemporâneo (“o caso”) em seu contexto no mundo real. E a segunda parte aponta para o projeto e a coleta de dados, por exemplo, como a triangulação de dados ajuda a tratar a condição técnica distintiva, por meio do qual um estudo de caso terá mais variáveis de interesse do que pontos de dados. Dessa forma, o estudo de caso é o método de pesquisa mais adequado ao estudo que este trabalho propõe desenvolver. O autor Gil (2002) complementa que o estudo de caso permite a análise detalhada dos objetos de pesquisa de forma a obter um amplo conhecimento a seu respeito. Trata-se de um estudo aprofundado, que tem como base a coleta e análise de informações (Prodanov & Freitas, 2013).

O estudo de caso proposto é de caráter descritivo que, segundo Sellitz et al. (1965) e Gil (2002), apresenta e descreve uma situação, em que permite abranger com exatidão as características do objeto estudado, de forma a desvendar a relação entre os eventos e as variáveis intrínsecas a ele. Neste estudo pretende-se analisar o comportamento dos equipamentos em relação a suas falhas a partir de seus indicadores.



Quanto a sua abordagem, a pesquisa pode ser considerada como quantitativa. Para Prodanov e Freitas (2013), considera-se uma abordagem quantitativa aquela capaz de interpretar em números as informações, de forma a classificar e analisar fenômenos. Além disso, também requer recursos e técnicas estatísticas. Neste estudo, serão utilizados dados quantitativos para análise da disponibilidade, assim como métodos estatísticos para o cálculo da confiabilidade.

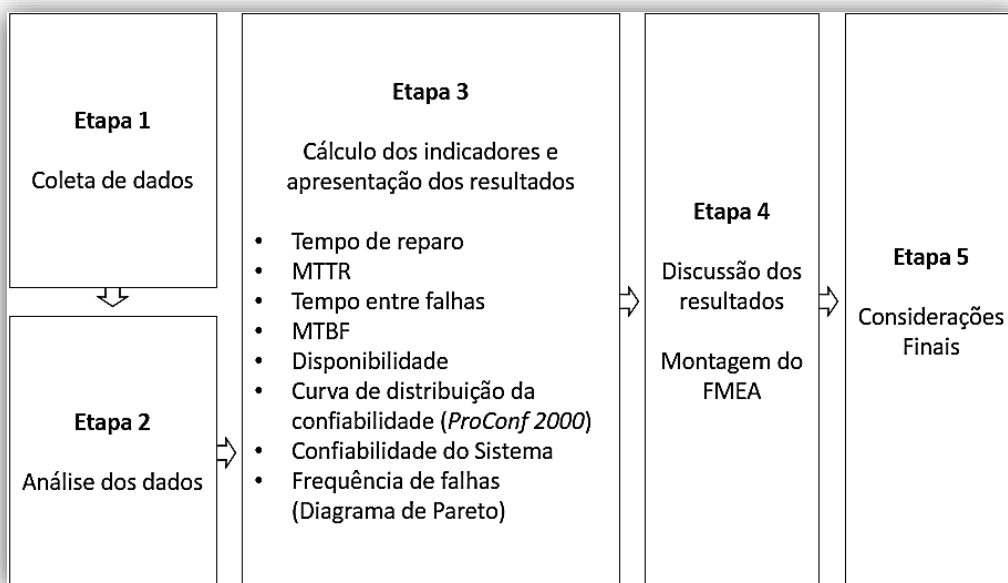
3.2. ESTUDO DE CASO

O processo de separação magnética é um método de concentração de minérios que utiliza a propriedade magnética para separar o minério. Dessa forma, esse método se baseia na aplicação de um campo magnético, fazendo com que o minério com alto teor de ferro seja atraído e separado dos minerais não magnéticos. Sendo assim, os equipamentos deste estudo tratam-se de separadores magnéticos que utilizam rotores giratórios para realizar o processo. À medida que o material a ser separado é alimentado, as partículas magnéticas são atraídas pelo campo magnético e aderem as matrizes que estão montadas nos rotores, enquanto as partículas não magnéticas seguem o fluxo normal e são descarregadas separadamente.

Diante disso, o processo analisado é composto por quatro separadores denominados de SM-A, SM-B, SM-C e SM-D. As máquinas SM-A e SM-B realizam a etapa inicial do processo e alimentam as máquinas SM-C e SM-D com a finalidade de recuperar ainda mais os minerais valiosos que não foram concentrados anteriormente, aumentando o rendimento do processo.

Com base nas falhas recorrentes, foi proposto a otimização e aperfeiçoamento do processo, de forma que os equipamentos estejam disponíveis e confiáveis para a produção. Os separadores magnéticos são de elevada importância para a empresa, pois são capazes de recuperar pequenas partículas de minério de ferro como também aumentar a qualidade do produto, fazendo com que a organização aumente sua receita na venda (Figura 8).

Figura 8. Passos metodológicos.



Fonte: Autores



Os dados utilizados foram provenientes do banco de dados do sistema da empresa. Nele, todos os eventos de parada dos equipamentos são registrados pelos operadores responsáveis de cada turno. O registro é feito em uma planilha que contém o motivo da parada, a data do evento e as horas inativas de cada equipamento.

O tratamento dos dados foi realizado da seguinte forma: primeiramente, foi feita uma revisão dos dados inseridos no sistema, de forma a filtrar todos os tempos de inatividade relacionados às falhas de cada separador magnético no período entre janeiro de 2021 a janeiro de 2023, totalizando 2 anos e assim garantir uma maior confiabilidade dos dados. Esta revisão, através dos descritivos dos apontamentos, consistiu em analisar se o evento estava relacionado a uma falha funcional que ocasionou as paradas no equipamento. Ela foi realizada com cuidado de identificar as falhas funcionais por profissionais que conhecem os separadores, pois a partir desses dados que foram realizados os cálculos de tempos de reparo.

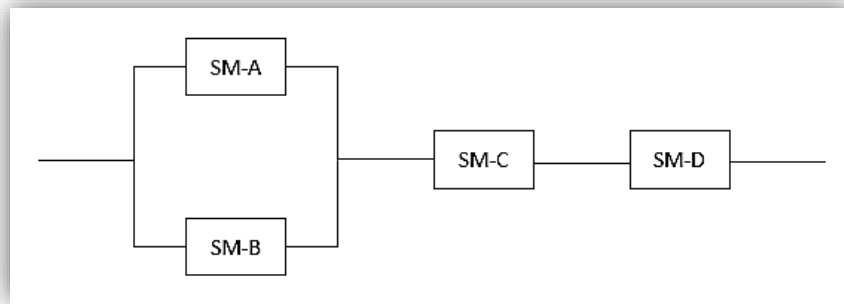
Em uma segunda etapa, já de posse do tempo de inatividade dos equipamentos, foram obtidos os tempos para reparo. Já o tempo entre falhas foi calculado por meio dos intervalos de tempo decorrido entre o final do reparo de uma falha e o início do reparo de uma nova falha subsequente, considerando o tempo de funcionamento das máquinas. Dessa forma, por meio das fórmulas apresentadas na seção 2.2.3, foi possível encontrar o MTTR e o MTBF de cada equipamento e, conseqüentemente, a disponibilidade de cada equipamento.

Com auxílio do *software* ProConf 2000, foi calculada a confiabilidade dos equipamentos. O programa contém as principais distribuições de confiabilidade utilizadas para estudos do tipo, englobando: Exponencial; Weibull; Lognormal; e Gama. Dessa forma, a partir dos dados de tempos de falhas inseridos no programa, faz-se a seleção da distribuição mais adequada ao comportamento do equipamento, por meio de testes analíticos Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, como também pelo método gráfico do papel de probabilidade. Além disso, após selecionar o melhor modelo de distribuição, foi calculada a confiabilidade de cada equipamento, considerando uma missão de 360 horas. Essa missão foi definida com base no intervalo de manutenções preventivas, portanto, é necessário que os separadores magnéticos sejam confiáveis nesse espaço de tempo para que não ocorram paradas indesejadas e não programadas que impactam diretamente na produção.

Após encontradas as confiabilidades individuais de cada equipamento, foi calculada a confiabilidade do sistema. Dessa forma, foi montado um diagrama de blocos baseado no fluxograma do processo (Figura 9). Sendo assim, os separadores magnéticos são identificados como SM-A, SM-B, SM-C e SM-D, onde o processo é iniciado pelo o SM-A e SM-B, os quais alimentam o SM-C que posteriormente é finalizado pelo SM-D. O cálculo da confiabilidade foi feito com base nas equações de sistemas em série e em paralelo citadas na seção 2.2.2.



Figura 9. Diagrama de Blocos Separação Magnética.



Fonte: Autores

Com base nos dados obtidos de disponibilidade e confiabilidade, foi utilizado o Diagrama de Pareto para identificar as falhas funcionais dos equipamentos que apresentam maior frequência de ocorrência. De acordo com Seleme e Stadler (2010), essa ferramenta consiste em identificar e classificar aqueles problemas que apresentam uma maior importância e que devem ser corrigidos primeiramente, auxiliando na análise dos dados e tomadas de decisão.

Após isso, foi utilizada a ferramenta FMEA para discussão e análise dos modos das principais falhas funcionais levantadas e para o cálculo do NPR, de forma a promover a priorização de tais modos de falhas e assim detalhar as ações recomendadas. As ações levantadas resumem-se à implementação de novas estratégias de manutenções para que as falhas dos equipamentos sejam eliminadas ou reduzidas.

Para a realização do FMEA foram realizadas técnicas de *brainstorming* com representantes das áreas de manutenção, operação, inspeção e engenharia, a fim de identificar os principais modos de falhas, suas causas e efeitos. Além disso, também foram discutidos os índices de severidade, ocorrência e detecção para o cálculo do NPR.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o levantamento dos indicadores de manutenção dos separadores magnéticos, primeiramente foram coletados e analisados os dados de inatividade corresponde às falhas de cada equipamento. Diante disso, foram identificadas 30 falhas relacionadas ao SM-A, 39 ao SM-B, 28 ao SM-C e 26 ao SM-D.

Essas foram catalogadas com seus respectivos tempos de reparo em horas e de acordo com a ordem de ocorrência, conforme apontado nas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1. Tempos de reparo em horas para cada falha (SM-A).

Tempo de reparo (SM-A)					
9,27	4,75	4,33	6,05	12,00	2,42
0,75	3,75	12,52	3,50	3,62	38,75
2,17	0,63	0,92	6,00	2,50	3,02
6,00	7,08	10,73	6,00	1,37	4,65
19,00	21,28	6,25	4,27	6,00	67,73

Fonte: Autores



Tabela 2. Tempo de reparo em horas para cada falha (SM-B).

Tempo de reparo (SM-B)							
0,27	0,47	1,25	3,88	4,50	9,00	124,25	5,33
6,33	6,00	5,25	20,75	0,95	6,63	6,00	40,25
4,42	1,25	2,58	0,82	60,33	15,17	5,27	5,17
0,33	40,17	8,63	2,27	12,78	10,50	1,53	8,82
31,17	18,00	13,38	25,33	54,75	12,00	4,33	

Fonte: Autores

Tabela 3. Tempo de reparo em horas para cada falha (SM-C).

Tempo de reparo (SM-C)						
12,08	15,42	137,77	1,33	8,08	1,00	8,33
4,08	0,50	4,00	1,92	14,25	11,70	3,00
9,25	28,25	6,00	10,83	7,50	9,17	19,65
3,67	16,92	4,67	12,42	11,50	9,45	19,75

Fonte: Autores

Tabela 4. Tempo de reparo em horas para cada falha (SM-D).

Tempo de reparo (SM-D)					
3,30	1,58	3,00	10,75	4,50	11,17
9,17	4,08	1,33	9,50	3,67	6,00
6,00	2,05	1,83	6,00	5,83	17,00
3,67	6,00	17,50	7,95	12,05	18,25
3,58	9,92				

Fonte: Autores

Dados os tempos de reparos para cada falha identificada, foi realizado o cálculo do MTTR para os equipamentos, utilizando a Equação 4 apresentada na seção 2.2.3. A Tabela 5 demonstra o resultado desse indicador para os separadores magnéticos.

Tabela 5. MTTR dos separadores magnéticos.

Equipamento	MTTR
SM-A	9,24
SM-B	14,87
SM-C	14,02
SM-D	7,14

Fonte: Autores

Com isso, pode-se concluir que o SM-B é o que apresenta maior índice de MTTR, ou seja, é o ativo que possui o maior tempo médio de reparo da manutenção corretiva. Esse é seguido pelos equipamentos SM-C, SM-A e SM-D. O SM-C também apresentou valores elevados de MTTR, com pouca diferença comparado ao SM-B.

É importante ressaltar que, de acordo com a Figura 9, a parada tanto do SM-C quanto do SM-D acarreta a interrupção de todo o sistema analisado, pois os mesmos estão conectados em série conforme explicado na seção 2.2.2. Nota-se então o impacto negativo elevado, principalmente no equipamento SM-C, no qual obteve tempos de reparo elevados.

Após o cálculo do MTTR, foi realizado o levantamento dos tempos entre falhas para cada separador magnético. Esses encontram-se nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.



Tabela 6. Tempo entre falhas em horas (SM-A).

Tempo entre falhas (SM-A)					
100,28	323,13	153,00	71,03	20,10	93,90
940,30	9,25	537,07	795,68	451,85	30,05
673,28	63,42	415,52	1145,77	6,00	542,17
6,00	478,26	6,00	1429,83	2012,82	655,87
933,33	165,72	1535,32	149,50	24,00	6,00

Fonte: Autores

Tabela 7. Tempo entre falhas em horas (SM-B).

Tempo entre falhas (SM-B)							
276,48	459,60	24,57	12,87	6,00	49,50	0,25	651,00
558,19	232,03	1708,98	230,83	282,42	21,65	317,05	18,50
553,33	860,40	730,92	1519,93	300,72	24,83	196,32	1063,48
424,07	483,27	12,00	4,77	25,55	45,50	822,35	437,20
105,58	102,00	169,13	293,15	449,47	269,95	6,00	

Fonte: Autores

Tabela 8. Tempo entre falhas em horas (SM-C).

Tempo entre falhas (SM-C)						
276,77	353,67	163,95	57,83	711,92	54,88	428,97
479,12	1026,78	75,25	1783,32	238,42	47,88	66,00
31,37	997,02	448,92	12,00	272,97	3272,13	539,28
528,72	422,27	356,83	985,97	49,08	537,47	2,55

Fonte: Autores

Tabela 9. Tempo entre falhas em horas (SM-D).

Tempo entre falhas (SM-D)					
2211,99	168,08	21,91	1117,40	84,63	36,00
278,75	1026,40	2184,82	419,63	68,50	20,33
5,00	6,00	376,60	2256,30	1282,85	1254,48
624,38	20,33	36,00	359,52	142,62	337,23
28,17	15,50				

Fonte: Autores

Por meio dos tempos entre falhas levantados, foi possível calcular conforme a Equação 3 (seção 2.2.3), o MTBF para cada equipamento (Tabela 10).

Tabela 10. MTBF dos separadores magnéticos.

Equipamento	MTBF
SM-A	459,15
SM-B	352,56
SM-C	507,90
SM-D	553,21

Fonte: Autores

Assim, pode-se concluir que o SM-B é o que apresenta menor índice de MTBF, ou seja, é o ativo que possui o menor tempo entre falhas. Esse é seguido pelos equipamentos SM-A, SM-C e SM-D.

Baseado nos resultados dos indicadores MTTR e MTBF, foi possível calcular a disponibilidade inerente para cada separador magnético. Para isso, foi utilizada a Equação 5 (seção 2.2.3) (Tabela 11).



Tabela 11. Disponibilidade Inerente.

Equipamento	Disponibilidade
SM-A	98,03%
SM-B	95,95%
SM-C	97,31%
SM-D	98,73%

Fonte: Autores

Em função dos dados levantados, algumas conclusões podem ser tiradas sobre a disponibilidade. Segundo Imam et al. (2013), a disponibilidade é considerada padrão de classe mundial quando as empresas ultrapassam o valor de 97%, ou seja, é um padrão de referência ótimo. Esse padrão indica que as organizações são capazes de competir em qualquer lugar do mundo. Portanto, apenas o SM-B não atingiu esse parâmetro. Conforme mostrado na Tabela 11, o SM-B apresentou uma disponibilidade de 95,95%.

Como o cálculo da disponibilidade considera a relação entre o tempo total disponível e o tempo de reparo, pode-se entender que a diminuição das falhas implica diretamente no aumento desse indicador. Essa diminuição faz com que o equipamento reduza o tempo total de paradas indesejadas e reparos. Além disso, de forma análoga, os intervalos dos tempos entre falhas serão maiores, contribuindo também para o aumento da disponibilidade. Logo, foi realizado o cálculo da confiabilidade, de forma a auxiliar nas análises dessas falhas.

Para realizar o cálculo de confiabilidade dos equipamentos, foi utilizado o *software* ProConf 2000. Diante disso, foram inseridos os tempos entre falhas de cada equipamento para que o *software* informasse se os dados apresentam aderência às principais distribuições de probabilidade utilizadas para representar a confiabilidade. Dessa forma, pelo ProConf 2000 verificou-se tais dados a partir dos testes estatísticos Qui-Quadrado (χ^2) e Kolmorov-Smirnov (K-S). Foi utilizado um intervalo de confiança de 95%. A Tabela 12 apresenta os resultados dos testes de aderência, assim como o resultado da hipótese de ajustamento dos dados, se rejeita ou não rejeita a distribuição.

Tabela 12. Testes de Aderência.

Análise de Confiabilidade				
Equipamento	Distribuição	Teste χ^2	Teste K-S	Decisão
SM-A	Exponencial	0,6244	0,0026	Rejeitada
	Weibull	0,3029	0,1691	Não rejeitada
	Gama	0,2731	0,3023	Não rejeitada
	Lognormal	0,0303	0,0255	Rejeitada
SM-B	Exponencial	0,935	0,0001	Rejeitada
	Weibull	0,4011	0,0516	Não rejeitada
	Gama	0,3592	0,1906	Não rejeitada
	Lognormal	0,0102	0,011	Rejeitada
SM-C	Exponencial	0,0193	0,0164	Rejeitada
	Weibull	0,3356	0,2397	Não rejeitada
	Gama	0,3705	0,2491	Não rejeitada
	Lognormal	0,5199	0,0496	Rejeitada
SM-D	Exponencial	0,014	0,0001	Rejeitada
	Weibull	0,3869	0,205	Não rejeitada
	Gama	0,4693	0,1567	Não rejeitada
	Lognormal	0,3749	0,189	Não rejeitada

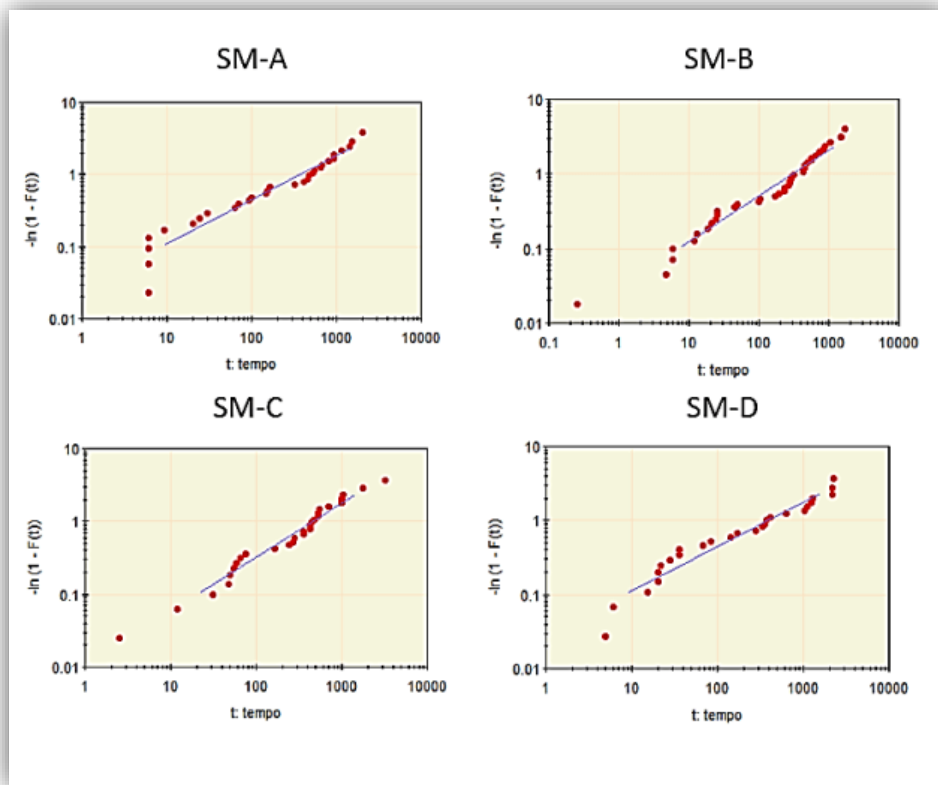
Fonte: ProConf 2000



De acordo com Floguiatto e Ribeiro (2009), a distribuição de Weibull apresenta boa flexibilidade e amostras de tempo de falha sendo representadas com comportamentos distintos. Além disso, conforme Cerveira e Sellito (2015), essa distribuição é denotada para sistemas que contêm diversos modos de falha. Esses modos de falha trabalham em série de forma que quando o primeiro componente falha, impacta em todo o conjunto.

A Figura 10 demonstra os gráficos do papel de probabilidade da distribuição de Weibull para cada separador magnético. Os pontos plotados próximos a um alinhamento representam que os dados estão ajustados para essa distribuição. Conforme Fritsch e Ribeiro (1998), esse método plota os dados em escalas transformadas com o uso da regressão, em que a distribuição é mais adequada quanto mais os pontos estiverem próximos a uma linha reta. Assim, o eixo y (vertical) é representado pelos dados de forma linearizada da função distribuição acumulada de falhas e o eixo x (horizontal) o tempo.

Figura 10. Gráfico papel da probabilidade Weibull.



Fonte: Autores

Dessa forma, como essa distribuição não foi rejeitada nos testes de aderência para os equipamentos, apresentando valores de nível de significância maiores que 0,05 (Tabela 12) devido ao intervalo de confiança de 95% e os pontos plotados no papel de probabilidade estão próximos a um alinhamento, sendo que a presença de poucos *outliers* estão relacionados aos eventos de tempos entre falhas que ocorreram em curtos intervalos em relação aos demais, percebe-se que ela descreve satisfatoriamente os tempos entre falhas dos separadores magnéticos. Sendo assim, esse comportamento corrobora com os estudos de Gomes et al (2018) que utilizaram a distribuição de Weibull para a análise de confiabilidade.



Após isso, o programa retornou através da estimativa os parâmetros de Weibull para o cálculo da confiabilidade de cada equipamento. Desse modo, foi utilizado o método da máxima verossimilhança para encontrar os parâmetros de forma β e escala η (seção 2.2.1). Conforme Floguiatto e Ribeiro (2009), o estimador da máxima verossimilhança é um dos melhores métodos utilizados para obter os parâmetros da distribuição (Tabela 13).

Tabela 13. Parâmetros da Distribuição Weibull.

Equipamento	Forma (β)	Escala (η)
SM-A	0,6875	366,8489
SM-B	0,7185	293,3634
SM-C	0,7995	447,0204
SM-D	0,6255	393,0367

Fonte: ProConf 2000

Diante disso, pode-se notar que os parâmetros β dos equipamentos estão entre 0,5 e 1. Sendo assim, a curva da distribuição irá apresentar aspecto semelhante às curvas com o β de 1/2 e 1 (Figura 3).

Por meio do ProConf 2000, calculou-se a confiabilidade para uma missão de 360 horas. A Tabela 14 mostra os resultados encontrados. Na sequência as Figuras 11, 12, 13 e 14 retratam a curva da confiabilidade $R(t)$.

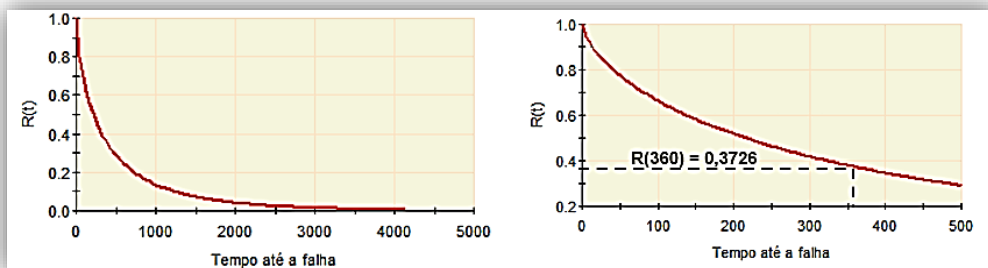
Tabela 14. Confiabilidade dos Equipamentos.

Equipamento	Confiabilidade
SM-A	37,26%
SM-B	31,40%
SM-C	43,13%
SM-D	38,81%

Fonte: ProConf 2000

Dessa forma, como a confiabilidade está relacionada à probabilidade de não ocorrer falhas em um determinado período de tempo, percebe-se que para uma missão de 360 horas, os equipamentos são mais propícios a falharem do que operarem sem interrupções dados os valores encontrados de confiabilidade na Tabela 14.

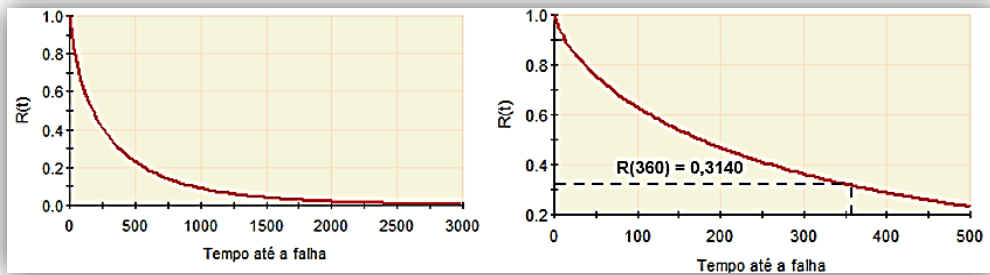
Figura 11. Curva da Função de Confiabilidade SM-A.



Fonte: ProConf 2000

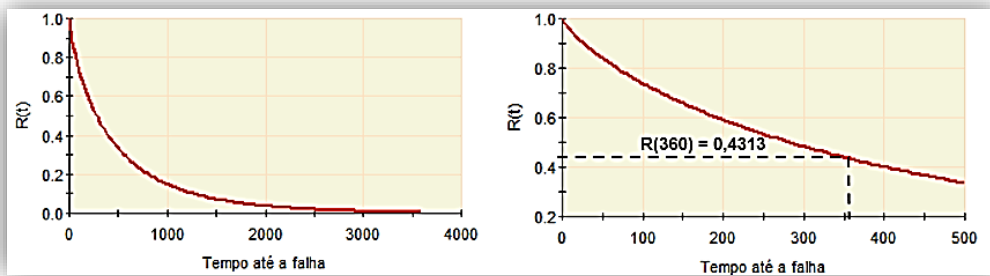


Figura 12. Curva da Função de Confiabilidade SM-B.



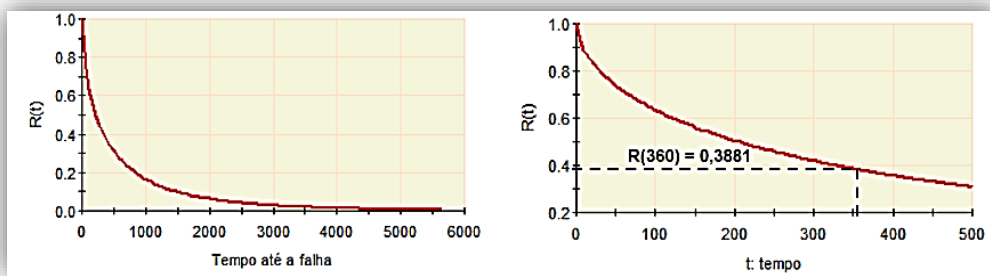
Fonte: ProConf 2000

Figura 13. Curva da Função de Confiabilidade SM-C.



Fonte: ProConf 2000

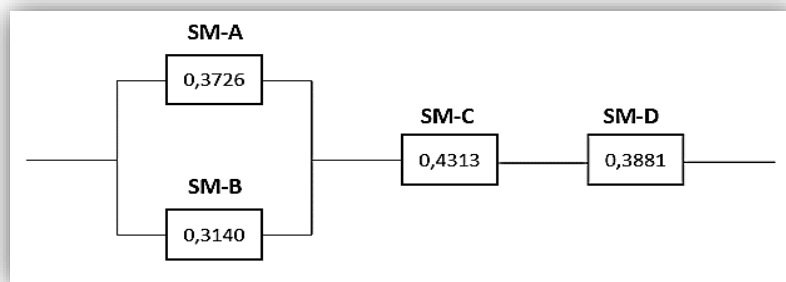
Figura 14. Curva da Função de Confiabilidade SM-D.



Fonte: ProConf 2000

Com base nos valores de confiabilidade de cada equipamento, foi realizado o cálculo da confiabilidade do sistema, considerando as equações apresentadas na seção 2.2.2 e o diagrama de blocos da Figura 9. Para isso, primeiramente foi determinada a confiabilidade do conjunto em paralelo (SM-A e SM-B), a qual resultou em um conjunto em série (Figura 15). Com base no cálculo do sistema em série resultante, foi calculada a confiabilidade do sistema.

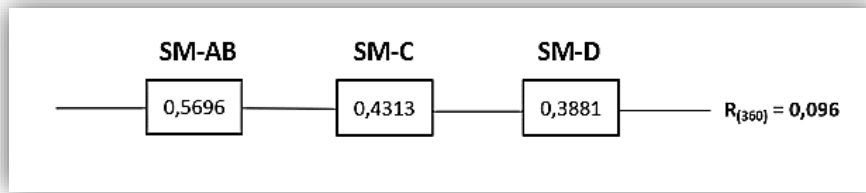
Figura 15. Diagrama de Blocos com os resultados de Confiabilidade.



Fonte: Autores



Figura 16. Diagrama de Blocos com os resultados de Confiabilidade.

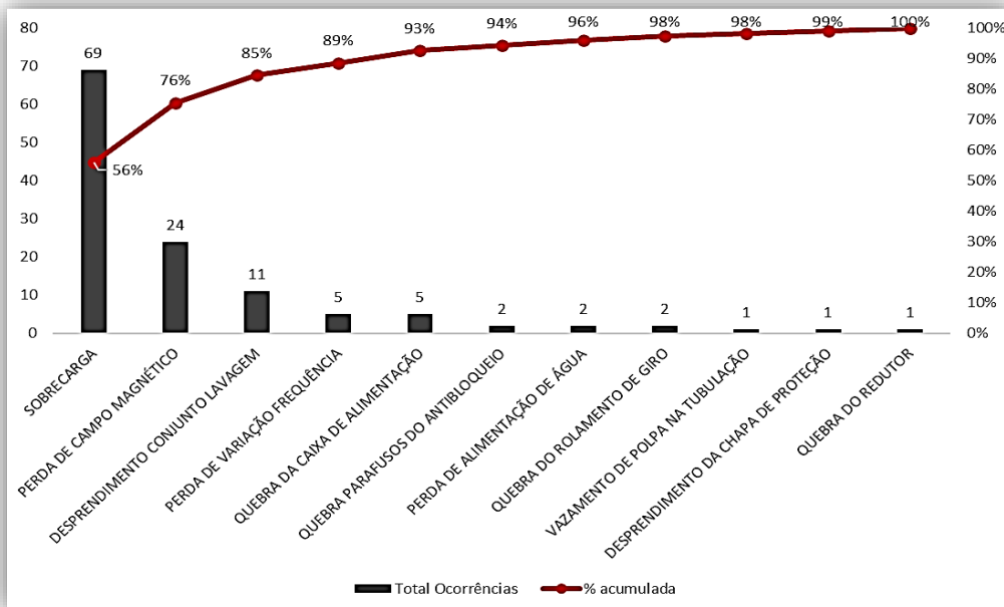


Fonte: Autores

Portanto, pode-se concluir que a probabilidade de o sistema estar funcionando sem falhas é de 0,096 ou 9,6%. Em outras palavras, constata-se que a probabilidade de falhas do processo é de 90,4%, mostrando que é necessário diminuir esses eventos para que haja o aumento do desempenho desse indicador.

Dado que ainda existe espaço para a melhoria da confiabilidade, foi possível realizar um levantamento de todas as falhas dos separadores magnéticos e empregar o diagrama de Pareto, conforme a Figura 17. Por meio dele, foi possível determinar as falhas que apresentam maior frequência de ocorrência.

Figura 17. Diagrama de Pareto das Falhas Funcionais dos Separadores Magnéticos SM-A, B, C e D.



Fonte: Autores

Sendo assim, foram identificadas 11 falhas funcionais que acarretam a interrupção do funcionamento dos equipamentos. Essas falhas apresentaram um total de 123 ocorrências. Foi constatado no Pareto que somente 3 falhas funcionais (sobrecarga, perda de campo magnético e desprendimento do conjunto de lavagem) são responsáveis por 85% da frequência dessas ocorrências.

Além disso, essas 3 falhas funcionais afetam 72% do tempo total de reparo das 4 máquinas. Portanto, percebe-se que as mesmas devem ser priorizadas para as devidas tratativas a fim de melhorar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Para isso, foi realizado um FMEA para discussão dessas falhas (Quadro 1).



Quadro 1. FMEA.

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos								
Falha Funcional	Modo de Falha	Causas	Efeitos da Falha	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR	Ações Recomendadas
Sobrecarga	Desgaste no rotor.	A alimentação por polpa de minério no rotor ocasiona o desgaste no mesmo.	Ocorre a parada da máquina, devido a matriz apresentar batimentos na placa de fechamento ao entrar no campo magnético, fazendo com que gere sobrecarga.	7	5	7	245	Inserir nos planos de manutenção de 360 horas para realizar a recuperação do rotor com material específico.
	Desgaste das placas de fechamento.	Fim de vida útil.	Ocorre a parada da máquina, pois a placa irá apoiar na chapa estrutural da região do polo magnético.	6	6	6	216	Realizar a troca de todas as placas a cada 8760 horas.
	Erro de montagem das placas de fechamento.	Torque inadequados dos parafusos de fixação.	Ocorre a parada da máquina, pois a placa irá apoiar na chapa estrutural da região do polo magnético.	7	7	8	392	Aplicar torque de 180N.m nos parafusos de fixação conforme orientação do fabricante e conferir o aperto a cada 360 horas, substituindo aqueles que estiverem com elevado afrouxamento.
	Desgaste das placas de apoio.	Fim de vida útil.	Ocorre a parada da máquina, pois a matriz estará mal posicionada apoiando na estrutura inferior da máquina.	5	4	4	80	Realizar a troca de todas as placas a cada 8760 horas.
Perda de campo magnético	Temperatura alta na bobina, acima de 80°C.	Baixo nível de óleo.	Ocorre a parada da máquina, pois o funcionamento da bobina será interrompido por temperatura alta.	8	6	4	192	Inserir no plano de manutenção de 360 horas para verificar a integridade das vedações das tampas das válvulas, trocar as vedações se necessário. Também, realizar a limpeza do filtro de ventilação do radiador.
		Obstrução no filtro de ventilação do radiador.						
	Sensor de temperatura descalibrado.	Perda de referência.	O sensor irá indicar uma falsa temperatura que desarma o equipamento.	3	3	4	36	Realizar testes no sensor a cada 360 horas.
	Baixa resistência no isolamento	Fim de vida útil das conexões elétricas.	Ocorre a parada da máquina, pois a bobina irá perder sua eficiência.	3	2	5	30	Substituir todas as conexões a cada 7000 horas.
Desprendimento do conjunto de lavagem.	Afrouxamento dos parafusos de fixação do conjunto.	Pressão excessiva de água.	Ocorre a parada da máquina, pois o conjunto irá se desprender.	5	5	4	100	Montar um transmissor de pressão para utilizar a pressão de trabalho entre 3 a 6 kgf/cm ² .

Fonte: Autores



Desse modo, observa-se que foram identificados 8 modos de falhas com suas respectivas causas, consequências e as ações recomendadas para as tratativas. Esses modos foram tratados conforme a priorização do NPR. Para a escolha dos índices de severidade, ocorrência e detecção foram considerados os critérios apresentados no Quadro 2, adaptando-os às condições da empresa.

Quadro 2. Critérios para o cálculo do NPR.

Índice	Severidade	Ocorrência	Detecção
1	Mínima - Parada de Produção menor que 2 horas.	Remota - dificilmente ocorre a causa que leva à falha	Muito Grande - Certamente será detectado
2 3	Pequena - Parada de Produção entre 2 e 5 horas.	Pequena - ocorre a causa da falha em pequena escala	Grande - Grande probabilidade de ser detectado
4 5 6	Moderada - Parada de Produção entre 5 a 18 horas.	Moderada - às vezes ocorre a causa que leva à falha	Moderada - Provavelmente será detectado
7 8	Alta - Parada de Produção maior que 18 horas.	Alta - ocorre a causa da falha com certa frequência	Pequena - Provavelmente não será detectado
9 10	Muito alta - idem ao anterior, porém afeta a segurança (operadores).	Muito Alta - ocorre a causa da falha em vários momentos	Muito Pequena - Certamente não será detectado

Fonte: Adaptado de Brand et al. (2013)

Sendo assim, o NPR ajudou a entender a prioridade de tratamento dos modos de falhas e que as medidas foram estipuladas conforme essa prioridade.

As ações recomendadas para cada modo de falha referem-se principalmente a atividades inseridas no plano de manutenção preventiva e troca por vida útil. Para o modo de falha “Afrouxamento dos parafusos de fixação do conjunto” foi discutida uma melhoria no sistema para evitar as pressões excessivas de água. Essas ações estipuladas foram definidas conforme a ordem de prioridade de cada modo de falha em prol do desempenho dos equipamentos e indicadores de manutenção.

Portanto, as ações que são referentes aos modos de falhas “Erro de montagem das placas de fechamento”, “Desgaste no rotor”, “Desgaste das placas de fechamento”, “Temperatura alta na bobina, acima de 80° C” já foram implementadas conforme priorização do NPR. As demais estão em processo de implementação conforme ordem de prioridade calculada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo abordou ações de melhoria, contendo a análise dos indicadores de manutenção em um processo de quatro separadores magnéticos, com a finalidade de aumentar a disponibilidade e confiabilidade desses equipamentos. Para uma análise mais completa, fez-se uso de outras ferramentas, sendo essas o Diagrama de Pareto e o FMEA, de forma a gerar uma visão mais assertiva para tratar as falhas. Sendo assim, foi possível identificar os valores de disponibilidade e confiabilidade, assim como as falhas que mais impactaram, de acordo com os indicadores estudados. Além disso, foram investigados e discutidos os modos de falhas e sua priorização para as tomadas de decisões.

Assim, foram encontrados os seguintes valores de disponibilidade para os equipamentos SM-A, SM-B, SM-C e SM-D: 98,03%, 95,95%, 97,31% e 98,73%, respectivamente. Desse modo, percebe-se que apesar de três dessas máquinas apresentarem parâmetros de disponibilidade



dentro daqueles conhecidos como classe mundial (maior do que 97%), a melhoria deste indicador se mostrou importante para a empresa, dada a relevância desses equipamentos para o processo. Já em termos de confiabilidade, verificou-se para uma missão de 360 horas, índices para os equipamentos SM-A, SM-B, SM-C e SM-D, correspondentes a 37,26%, 31,40%, 43,13% e 38,81%, respectivamente. Portanto, percebe-se a necessidade de melhoria desse indicador devido aos equipamentos apresentarem uma maior probabilidade de falhas em relação a não ocorrência das mesmas. Além disso, para o cálculo de confiabilidade do sistema foi encontrado um valor de 9,6%.

Diante disso, o Gráfico de Pareto retratou que as falhas funcionais relacionadas à sobrecarga, perda de campo magnético e desprendimento do conjunto de lavagem são responsáveis por 85% da frequência das ocorrências de todas as falhas. Sendo assim, identificou-se através da metodologia FMEA os principais modos dessas falhas e seus efeitos, onde realizou-se estudos para controle ou eliminação dos mesmos. Como exemplo, o principal modo de falha de acordo com o NPR é o “Erro de montagem das placas de fechamento”, onde sua medida de ação recomendada está relacionada a realizar o torque de aperto dos parafusos de fixação conforme recomendação do fabricante, conferir afrouxamentos a cada 360 horas e substituir aqueles que estiverem em condições de afrouxamentos elevados.

Como limitação deste estudo, destaca-se o registro adequado dos modos de falhas, uma vez que no banco de dados da empresa são registradas somente as falhas funcionais dos equipamentos. Sendo assim, foi preciso reunir representantes de cada área responsável pelos separadores magnéticos para o levantamento dos demais modos. Porém, é importante ressaltar que, devido à vivência desses profissionais em campo, o trabalho foi concluído com êxito.

Dessa forma, espera-se que este estudo contribua para as análises dos indicadores de manutenção, deixando os equipamentos disponíveis e confiáveis em prol da produção. Também, que auxilie o setor de Engenharia da Manutenção para as futuras análises de tais indicadores, sendo essa uma proposição para a realização de novos estudos, que no qual deve prezar pela melhoria da aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade, com o emprego do FMEA para a análise das falhas funcionais.

REFERÊNCIAS

- Andrade, J. J. O. (2011). Emprego da Confiabilidade na Gestão Estratégia da Manutenção: Estudos de Caso. *Simpósio Internacional de Confiabilidade*, 1-11. Recuperado de <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12825192/simposio-internacional-de-confiabilidade-fortaleza-2011>
- ABNT. (1994). *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade*. ABNT.
- Azevedo, R. V., Ferreira, R. J., Furtado, P. A. A., Moura, M. C., & Droguett, H. L. (2012). Diagrama de Blocos e Processos de Renovação Generalizados para Modelagem de Bancos de Dados de Confiabilidade. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2901-2912. Recuperado de <http://ws2.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2012/pdf/arg0414.pdf>.
- Branco Filho, G. (2008). A organização, o planejamento e o controle da manutenção. *Ciência Moderna*.
- Brand, F. A., Dalmolin, C., Júnior, X. L. T., & Pachekoski, W. M. (2013). Avaliação da metodologia FMEA como ferramenta para reduzir impactos ambientais no processo manutenção industrial. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 2081-2090. Recuperado de <https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/7447>



- Brandão, M. O. & Resende A. P. C., de. (2018). Modelagem dos dados de falhas de um pasteurizador de garrafas de cerveja. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 10(2), 172-181. Recuperado de <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11902>
- Cerveira, D. S. & Sellitto, M. A. (2015). Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. *Revista Produção Online*, 15(2), 405-432. Recuperado de <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1615/1266>
- Fogliatto, F. & Ribeiro, J. (2009). Confiabilidade e manutenção industrial. *Belo Horizonte: Elsevier*.
- FRITSCH, C. & Ribeiro, J. (1998). PROCONF: um software orientado para análises de confiabilidade. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 18. Recuperado de https://abepro.org.br/biblioteca/enegep1998_art234.pdf
- Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas.
- Gomes, M. C., Resende, A. P. C., de. & Costa, T. F. (2018). Análise de indicadores de desempenho da manutenção de um moinho de bolas. *Revista Thema*, 15(3), 1089-1103. Recuperado de <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/910/877>
- Imam, S. F., Raza, J., & Ratnayake, R. C. (2013). World Class Maintenance (WCM): Measurable indicators creating opportunities for the Norwegian Oil and Gas industry. In *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1479-1483. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6962656>
- Kardec, A. & Nascif, J. (2009). *Manutenção: função estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás.
- Lafraia, J. R. B. (2001). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Qualitymark Editora Ltda.
- Mengue, D. C. & Sellitto, M. A. (2013). Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. *Revista Produção Online*, 13(2), 759-783. Recuperado de <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1341/1032>
- Moreno, R. S., Rodríguez, E. F., Cruz, I. L., Aguilar, A. B. (2017). Confiabilidad y Análisis de Fallas utilizando la Distribución Weibull. *Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas*, 5-16. Recuperado de https://dicea.chapingo.mx/wp-content/uploads/2018/05/MEMORIA_MESA_1A_CONGRESO2017.pdf
- Moubray, J. (2000). *Manutenção Centrada em Confiabilidade*. São Paulo: Aladon Ltda.
- Netto, A.P. (2018). *Manutenção Industrial. Indaial*.
- Paschoal, D. R., Mendonça, M. A., Morais, R. D., Gitahy, P. F., & Lemos, M. A. (2009). Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade. *Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA*, 1-14. Recuperado de http://fsma.edu.br/EP/Artigos/REV_ENG_3_artigo_3.pdf
- Pereira, M. J. (2011). *Engenharia de manutenção: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna.
- Prodanov, C. C. & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. Editora Feevale. Recuperado de <https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>
- Santos, B. L. P., Campos, M. S., Viana, F. D. F., Freitas, D. M., & Silva, A. L. (2022). *Aplicação da engenharia da confiabilidade na manutenção de sistemas reparáveis: uma revisão sistemática da literatura*. XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção.
- Seleme, R. & Stadler, H. (2010). *Controle da Qualidade – As Ferramentas Essenciais*. Curitiba – Pr: Xibpex.
- Selltiz, C., Wrightsman, L. S., & Cook, S. W. (1965). *Métodos de pesquisa das relações sociais*. São Paulo: Herder.
- Silva, G. E. S. D. (2018). *Estudo dos indicadores MTBF (tempo médio entre falhas) e MTTR (tempo médio para reparo) aplicado em processos produtivos*. Recuperado de <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/4823/1/Gleiton%20Eder%20Sanchez%20da%20Silva.pdf>
- Soeiro, M. D. A., Olivio, A., & Lucato, A. V. R. (2017). *Gestão da manutenção*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional SA.
- Viana, H. R. G. (2002). *PCM – Planejamento e Controle da Manutenção*. Qualitymark Editora Ltda.
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5 ed. Porto Alegre: Bookman.

