



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E  
TECNOLOGIA CURSO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**



**MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (MCC) APLICADA A  
BOMBAS DE POLPA DE BAUXITA**

**GABRIEL FELIPE CARVALHO SILVA**

**São Luís - MA  
2022**

**GABRIEL FELIPE CARVALHO SILVA**

**MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (MCC) APLICADA A BOMBAS  
DE POLPA DE BAUXITA**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Engenharia Mecânica, como  
requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz

**São Luís - MA  
2022**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

SILVA, GABRIEL FELIPE CARVALHO.

MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE MCC APLICADA A  
BOMBAS DE POLPA DE BAUXITA / GABRIEL FELIPE CARVALHO  
SILVA. - 2022.

74 p.

Orientador(a): GLAUBER CRUZ.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal do Maranhão, SÃO LUÍS - MA, 2022.

1. Bombas de polpa. 2. Gestão da Manutenção. 3.  
Manutenção Centrada em Confiabilidade. I. CRUZ, GLAUBER.  
II. Título.

GABRIEL FELIPE CARVALHO SILVA

**MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (MCC) APLICADA A  
BOMBAS DE POLPA DE BAUXITA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

São Luís, 22 de dezembro de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Glauber Cruz  
(Orientador – CCEM/ UFMA)

---

Prof. Dr. Elson César Moraes  
(Avaliador Interno – CCEM/ UFMA)

---

Prof. Dr. Dener Silva de Almeida  
(Avaliador Interno – CCEM/ UFMA)



*DEDICATÓRIA*

Dedico à minha família por me mostrar o valor da educação e sempre me incentivar e me apoiar nessa jornada que é a educação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve comigo, me guardando, me protegendo, e me guiando ao longo da minha jornada. À minha família: minhas mães, pais, tios, tias, irmãs e primos que fizeram e fazem parte da minha história e das minhas lutas diárias. São as principais pessoas na minha vida e que eu tenho profundo amor e carinho. Obrigado a todos vocês: Ivonete, Aldenora, Neilson, Walmir, Wilna, Rubenir, William, Gabriele, Daniele, Jualiana, Walmir Neto, Waldete, Claudio e Apollo.

Agradeço aos meus amigos de longas datas, a começar por Ana Carolina, que sempre esteve em meus momentos de vitórias e fracassos desde a infância. Aos amigos que fiz durante a faculdade, Lorena, Luziana, Ana Karoliny, Mateus Barros, Yuri Val, Halina, Mateus Costa, Marta, Agna, Lucas, Iara e Paulo. Aos amigos que continuaram na mesma jornada comigo na Engenharia Mecânica e vêm compartilhando comigo momentos incríveis dentro e fora da universidade durante todos esses anos, Glaucia, Davidson, Gabriela, Aysla e Walderlanne.

Ao Prof. Glauber Cruz pela orientação, presteza e atenção durante todo esse período de monografia e pesquisas. A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica.

Aos meus colegas de trabalho que tiveram profundo peso na minha formação durante os dois anos de estágio que realizei no Time de Bombas: Lais, Adriano, Jucilene, Magno, Ivan, Emilly, Antonio, Gois, Milson, Diego, Walter, Manoel, Rubens, Jean, Jorge, Mauro, Marcio e Gillianny.

Enfim, obrigado a todos aqueles que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

“A vida acontece onde você está,  
quer você queira ou não.”

Iroh, o Dragão do Oest

## RESUMO

Os sistemas industriais atuais devem preferencialmente garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, a fim de atingir os parâmetros. Nas indústrias de processo é constante a necessidade do estudo da confiabilidade dos ativos para garantir a disponibilidade destes e reduzir riscos ao negócio. Quanto a equipamentos críticos, o desempenho de todo o processo estará associado à performance, portanto, se exige uma alta confiabilidade. Este trabalho visa realizar um estudo teórico e aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) em um conjunto de bombas centrífugas em uma refinaria produtora de alumina, ajudando o time de Engenharia e clientes a melhorar as condições de operação, qualidade e performance de ativos importantes para o processo de produção da alumina. Com o estudo do histórico de manutenção nesses ativos, além do levantamento de consumo de peças de desgaste como rotor, voluta e revestimentos de sucção e descarga, do levantamento das melhorias realizadas pela engenharia e das investigações de falhas ocorridas e suas ações, pode-se construir um FMECA (Análise do Modo, Efeito e Criticidade de Falhas) mais realista ao sistema estudado. Das ações definidas na FMECA, foi possível realizar uma comparação com os planos de manutenção dos ativos, deixando como sugestão as atividades de prevenção não contempladas. A revisão bibliográfica abordou o conceito da MCC a partir dos principais autores brasileiros e internacionais sobre o tema e de pesquisas na área de Confiabilidade e Manutenção, sintetizando os conceitos de cada obra e autor. Quanto à implantação da MCC, a partir da revisão bibliográfica foi possível a identificação das etapas que garantirão os objetivos propostos pela Metodologia MCC, podendo ser consultada em futuras aplicações. Por fim, é também deixado como sugestão o uso dos indicadores aqui definidos para monitoramento dos planos de manutenção e das ações da engenharia quanto a melhorias e aumento de confiabilidade.

**Palavras-chaves:** Manutenção Centrada em Confiabilidade; Gestão da Manutenção; Bombas de polpa;

## ABSTRACT

Current industrial systems should preferably guarantee the availability and reliability of equipment to achieve the parameters. In process industries, there is a constant need to study the reliability of assets to ensure their availability and reduce business risks. As for critical equipment, the performance of the entire process will be associated with performance, therefore, high reliability is required. This work aims to carry out a theoretical study and application of Reliability Centered Maintenance (RCM) in a set of centrifugal pumps in an alumina producing refinery, helping the Engineering team and customers to improve the operating conditions, quality, and performance of important assets. By studying the assets' maintenance history, in addition to surveying the consumption of wear parts such as the rotor, volute and suction and discharge linings, surveying the improvements carried out by engineering and investigating faults that occurred and their actions, it is possible to build a more realistic FMECA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis) for the studied system. Of the actions defined in the FMECA, it was possible to make a comparison with the asset maintenance plans, leaving prevention activities not contemplated as a suggestion. The bibliographic review addressed the concept of MCC from the main Brazilian and international authors on the subject and research in Reliability and Maintenance, synthesizing the concepts of each work and author. As for the implementation of the MCC, from the bibliographic review it was possible to identify the steps that will guarantee the objectives proposed by the MCC Methodology, which can be consulted in future applications. Finally, it is also left as a suggestion the use of the indicators defined here for monitoring maintenance plans and engineering actions regarding improvements and increased reliability.

**Keywords:** Reliability Centered Maintenance; Maintenance management; Slurry pump

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução Gradativa das Quatro Gerações de Manutenção.....	20
Figura 2 – Diagrama detalhado de Implantação da metodologia MCC e os resultados a serem encontrados.....	24
Figura 3 – Principais operações no processo Bayer de refino de bauxita para produção de alumina. ....	31
Figura 4 – Vista explodida apresentando os principais componentes de uma bomba fabricada de metal duro sem revestimento. ....	33
Figura 5 – Esquema simplificado da configuração das bombas em estudo em bancadas. ....	35
Figura 6 – Imagens ilustrativas do modelo das bombas Warman (Weir). ...	35
Figura 7 – Imagem explodida da linha de bombas Warman AHP. ....	36
Figura 8 – Gráfico para uma seleção rápida de bombas modelo Warman AHP.....	37
Figura 9 – Fatores que afetam a vida útil de uma bomba centrífuga. ....	38
Figura 10 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	40
Figura 11 – Estrutura do FMEA para bombas centrífugas de polpa. ....	43
Figura 12 – Quantitativo por ano de intervenções mecânicas nos ativos em estudo no intervalo de análise. ....	44
Figura 13 – Histórico quantitativo da natureza das manutenções realizadas nos ativos.....	46
Figura 14 – Residual Life médio e dos últimos três anos do conjunto de bombeamento das bombas: a) revestimento de sucção, b) revestimento traseiro, c) voluta e d) rotor.....	50
Figura 15 – Esquema simplificado do sistema com suas fronteiras e interfaces com outros sistemas abertos e fechados. ....	51
Figura 16 – FMECA referente ao componente parafuso da base.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - As sete questões básicas do MCC segundo Moubray (2000).....	22
Tabela 2 - Objetivos detalhados da metodologia do MCC.....	23
Tabela 3 - Comparações das características da metodologia MCC com a manutenção tradicional utilizada na indústria.....	23
Tabela 4 – Pontuação para os componentes do RPN.....	25
Tabela 5 – Tarefas de manutenção programadas segundo os critérios de programação.....	27
Tabela 6 – Tarefas de manutenção não programadas segundo motivo da execução.....	28
Tabela 7 – Tipos de atividades de manutenção programada e não programada e as principais definições.....	28
Tabela 8 - Variáveis e indicadores utilizados para tratamento dos dados levantados na pesquisa quanto ao histórico de manutenções.....	42
Tabela 9 – Pontuação quanto à aderência dos indicadores das variáveis dentro do histórico de atividades de manutenção.....	47
Tabela 10 – Intervalo de intervenções preventivas nas bombas do sistema avaliado antes e após o ano de 2019.....	48
Tabela 11 – Resumo de falhas, causas raízes e status das ações resultadas das investigações realizadas pela empresa quanto aos eventos.....	51
Tabela 12 – Critérios para aplicabilidade das tarefas para prevenir e corrigir as falhas.....	54
Tabela 13 – Critérios para efetividade de tarefas para prevenir e corrigir falhas.....	54
Tabela 14 – Lista de atividades de manutenção para prevenir e corrigir as falhas.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR 5462	Norma Brasileira Regulamentadora: Confiabilidade e Manutenibilidades
NBR 55000	Norma Brasileira Regulamentadora: Gestão de Ativos - Visão geral, princípios e terminologia
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada em Confiabilidade)
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise de Causa e Efeito de Falhas)
FMECA	<i>Failure Mode, Effect and Criticality Analysis</i> (Análise de Causa, Efeito e Criticidade de Falhas)
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficácia Geral do Equipamento)
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> (Tempo médio entre falhas)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo médio entre reparos)
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Manutenção Computadorizado)



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>17</b>
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC).....</b>	<b>21</b>
4.2.1 Objetivos do MCC .....	22
4.2.2 Implementação da MCC.....	23
4.2.3 Métodos FMEA e FMECA .....	25
<b>4.3 GESTÃO DA MANUTENÇÃO .....</b>	<b>26</b>
4.3.1 Planos de Manutenção.....	27
<b>4.4 PROCESSO BAYER E A ALUMINA.....</b>	<b>30</b>
<b>4.5 CARACTERIZAÇÃO DA BOMBAS DE POLPA OU PASTA (SLURRY PUMP).....</b>	<b>31</b>
4.5.1 Classificação geral e detalhes construtivos das bombas de pasta .....	32
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1 Descrição do sistema em estudo .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2 Período de análise e cenários estudados.....</b>	<b>37</b>
<b>5.3 Etapas de Desenvolvimento da pesquisa.....</b>	<b>39</b>
<b>5.4 Variáveis e Indicadores da pesquisa para o histórico de manutenção .....</b>	<b>40</b>
<b>5.5 Implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade .....</b>	<b>42</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>6.1 Análises do histórico de atividades de manutenção .....</b>	<b>44</b>
6.1.1 Análise de consumo de peças .....	49
<b>6.2 Análise de investigação de falhas .....</b>	<b>51</b>
<b>6.3 Levantamento dos modos de falhas para bombas centrífugas de polpa.....</b>	<b>52</b>
<b>6.4 FMECA.....</b>	<b>53</b>

6.4.1 Propostas de ações e acompanhamento .....	55
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo A - Pontuação quanto à aderência dos indicadores das variáveis dentro do histórico de atividades de manutenção. ....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo B – Análise de Modos de Falhas e Efeitos .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas industriais atuais devem preferencialmente garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, a fim de atingir os parâmetros definidos pela gestão da empresa (PIECHNICKI *et al.*, 2017). Em muitos ambientes de fabricação, como de processos, a condição de operação do equipamento ou processo tem um impacto significativo na quantidade e qualidade das unidades produzidas (KAZAZ e SLOAN, 2013). Nesse contexto, a função de manutenção visa aumentar a vida útil dos equipamentos, ou pelo menos o tempo médio entre falhas, considerando o custo deste reparo (PIECHNICKI *et al.*, 2017). Além disso, espera-se que a política de manutenção seja eficaz e reduza a frequência de interrupções de trabalho e os efeitos indesejados para o processo como um todo (PIECHNICKI *et al.*, 2017).

Segundo Antomarioni *et al.* (2019), definir a melhor política de manutenção representa uma questão crítica para todos os tipos de plantas de produção. A indústria de processo contínuo, por exemplo, uma refinaria, é particularmente afetada por este aspecto, pois, todas as atividades estão conectadas sequencialmente (ANTOMARIONI *et al.*, 2019). Segundo Zhao *et al.* (2020), as refinarias operam em condições complexas e adversas, pois, nesse processo de produção o equipamento, geralmente, opera com materiais altamente corrosivos, altas temperaturas, pressões e velocidades. Portanto, a estratégia de manutenção escolhida deve ter um equilíbrio entre custo e confiabilidade da planta industrial (ALTAF, 2014).

Nesse sentido, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é definida como uma metodologia sistemática para a otimização e desenvolvimento dos requisitos de manutenção de um recurso físico (GUPTA e MISHRA, 2018). Recentemente, por volta dos anos 2000, descobriu-se que esse tipo de manutenção é uma estratégia mais eficiente quando comparada às manutenções tradicionais – corretiva e preventiva (GUPTA e MISHRA, 2018). Este método tem sido aplicado com sucesso por mais de 30 anos em diversas indústrias, por exemplo, aeronáutica, forças militares, energia nuclear e empresas de petróleo e gás (ZAHEDI-HOSSEINI *et al.*, 2017).

Algumas pesquisas desenvolvidas por diversos autores trazem informações relevantes sobre a MCC. Por exemplo, Nourelfath *et al.* (2016) confirmaram que o método da MCC é imperativo para reduzir os custos de manutenção e melhorar a eficácia dos sistemas. Consilvio *et al.* (2015) afirmaram que a manutenção permite que a organização minimize a duração das paradas e crie um ambiente seguro, o que tem sido uma preocupação dos fabricantes. Uma aplicação do método da MCC é imperativa para que as organizações otimizem as atividades de manutenção e desenvolvam um método econômico para gerenciar os procedimentos (PETROVIC *et al.*, 2020). Wang e Chen (2020) concluíram que a MCC ajuda as empresas a aumentarem os lucros e melhorar o desempenho do sistema a custos mais baixos.

Baseado nas informações apresentadas anteriormente e sabendo-se que a confiabilidade dos ativos é um dos principais pilares de uma indústria de processos contínuos, este trabalho objetiva realizar um estudo de desenvolvimento e aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) em um conjunto de 6 (seis) bombas centrífuga de polpa em uma refinaria produtora de alumina. Para tal, será levantado o plano atual dos ativos, estudando a eficácia por meio do custo e consumo de alguns itens e, a partir da metodologia da MCC, são sugeridas oportunidades de melhorias baseado nos modos de falhas mais comuns ocorridos nesses ativos.

## 2 JUSTIFICATIVA

Nas indústrias de processo contínuo é constante a necessidade do estudo da confiabilidade dos ativos para garantir a disponibilidade e reduzir riscos ao negócio. Em se tratando de equipamentos críticos, o desempenho de todo o processo estará associado à performance destes, portanto, exige-se uma alta confiabilidade dos ativos.

Nas refinarias de produção de alumina, as bombas desempenham uma função importante no processo, sendo muitas destas classificadas como críticas e, por vezes, responsáveis pela perda de produção devido à falhas abruptas, mesmo na presença de *sparres* (equipamentos reserva). Por isso, a garantia de um bom funcionamento e de um estudo constante da eficiência das intervenções nos ativos se fazem necessárias.

Com esse objetivo, foi escolhida a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) como metodologia de análise para melhoria da confiabilidade de um conjunto de bombas centrífugas de polpa críticas dentro de uma refinaria, que possui um histórico de intervenções de Engenharia tanto na estratégia de manutenção quanto na confiabilidade de alguns itens.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo de desenvolvimento e aplicação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) em conjunto de 6 (seis) bombas centrífugas de polpa de uma refinaria produtora de alumina.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um estudo teórico das normas referentes ao MCC;
- Aplicar metodologia da MCC, definindo ferramentas adequadas para implementação dentro da realidade da refinaria de alumina;
- Realizar um levantamento completo do plano de manutenção atual de equipamentos e eficácia dos mesmos;
- Avaliar histórico de consumo de peças metálicas e o impacto da aplicação de estratégias de manutenções no tempo de vida dessas peças;
- Levantar oportunidades de melhoria no plano atual de manutenção das bombas de polpa por meio dos principais modos de falhas encontrados;
- Propor indicadores de confiabilidade para acompanhamento contínuo dos ativos;

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a NBR 55000 (2014), os fatores que auxiliam a determinação dos tipos de ativos necessários, bem como o gerenciamento dos mesmos, para que uma organização alcance os objetivos almejados, incluem:

- a finalidade da organização e a natureza;
- a operacionalidade;
- os limites financeiros e as exigências regulamentares;
- as expectativas da organização e das partes interessadas.

Esses fatores precisam ser considerados no estabelecimento, implementação, manutenção e melhoria contínua da gestão de ativos, uma vez que traduz os objetivos das organizações em planos, atividades relacionadas aos ativos e decisões, utilizando uma abordagem baseada em riscos (NBR 55000, 2014).

### 4.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

A NBR 5462 (1994) estabelece manutenção industrial como uma combinação de todas as ações administrativas e técnicas, incluindo as ações de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item ou ativo em um estado, no qual tenha capacidade de desempenhar uma função desta dentro dos padrões requeridos.

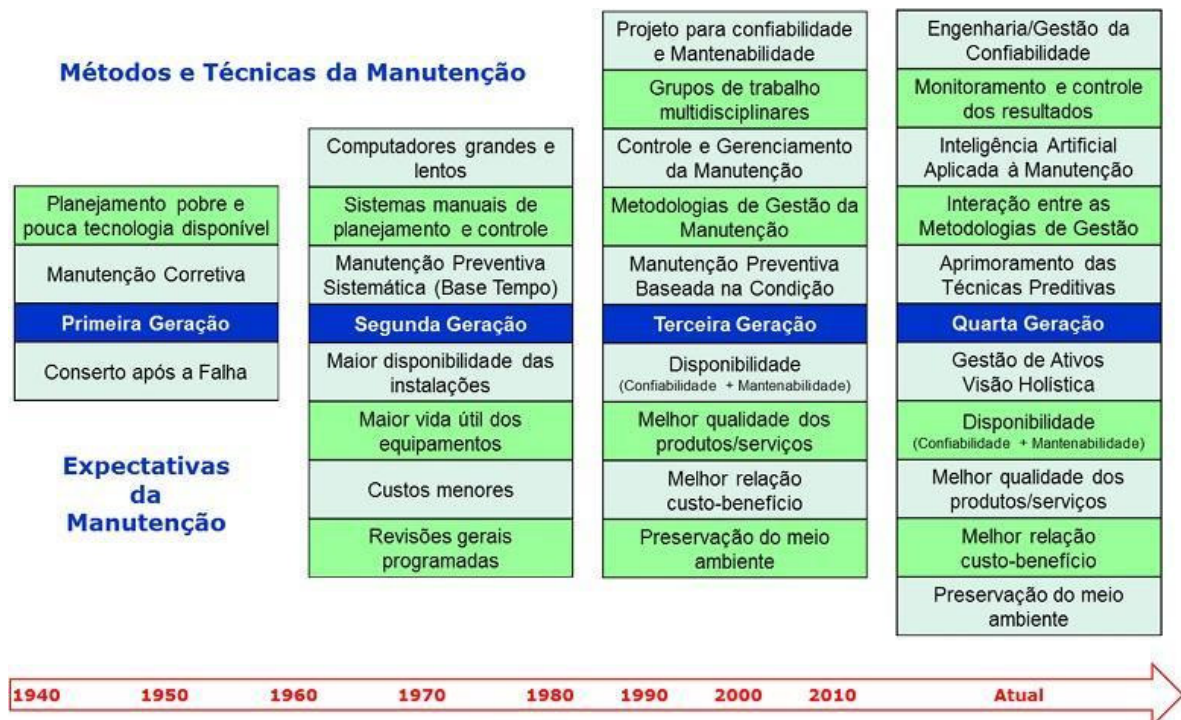
Segundo Oliveira (2017), em um primeiro momento da indústria, o desenvolvimento do produto e a produção foram as prioridades dominantes, tendo a operação e manutenção de equipamentos um lugar secundário nas prioridades e estratégias das empresas. Algum tempo depois, tanto a operação como a manutenção passaram a ocupar um papel de destaque. Atualmente, a manutenção tem uma função estratégica dentro das organizações, pois esta é responsável por garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações, conferindo confiabilidade e segurança a custos adequados.

Siqueira (2005) e Kardec e Lafraia (2002) apontaram uma evolução

gradativa das metodologias de manutenção, onde foi possível verificar as diferentes gerações. Em meados de 1950 (1ª geração) realizava-se somente após a falha. Nos anos 60 (2ª geração), julgou-se que a combinação de preventiva e corretiva traria menores custos. Com a evolução da tecnologia e do programa espacial, passou-se ao uso das técnicas preditivas (3ª geração), sendo que a complexidade dos equipamentos e sistemas industriais dificultou a implementação de tais metodologias/técnicas. Desta forma, surge uma nova filosofia de manutenção, baseada na Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) ou em inglês *Reability Centered Maintenance* (RCM), a qual é utilizada para aumentar os níveis de segurança e disponibilidade operacional das máquinas sem que haja um descuido das questões ambientais (4ª geração).

Pinto (2012) resumiu as quatro gerações de manutenção mencionadas anteriormente por meio da Figura 1, a qual foi adaptada do estudo realizado por Kardec e Nascif (2009), unindo as expectativas e ferramentas utilizadas em cada momento.

Figura 1 - **Evolução Gradativa das Quatro Gerações de Manutenção.**



Fonte: Adaptada de Pinto (2012).



## 4.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) foi inicialmente desenvolvida pelo segmento da aviação para aprimorar a segurança e confiabilidade dos aviões (NASA, 2008). A norma SAE JA1011/2009, que define os critérios de avaliação para processos de Manutenção Centrados na Confiabilidade (MCC), foi primeiramente documentado no relatório *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) escrito por F. S. Nowlan e H. F. Heap e publicado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América do Norte em 1978.

Segundo a NASA (2008), a MCC integra a Manutenção Preventiva (PM), Teste e Inspeção Preditiva (PT&I), Manutenção Corretiva e Manutenção Proativa para aumentar a probabilidade de que uma máquina ou componente funcione da maneira necessária ao longo do ciclo de vida do projeto deste, com uma quantidade mínima de manutenção e tempo de inatividade. Essas principais estratégias de manutenção, ao invés de serem aplicadas de forma independente, são integradas de maneira ideal para aproveitar os respectivos pontos fortes e maximizar a confiabilidade das instalações e equipamentos, minimizando os custos do ciclo de vida.

Ainda segundo a Nasa (2008), o objetivo desta abordagem foi reduzir ao mínimo o Custo do Ciclo de Vida de uma instalação, enquanto, continua a permitir que a instalação funcione conforme pretendido com a confiabilidade e disponibilidade necessárias.

Kardec e Nascif (2009) complementaram essa informação, afirmando que a MCC é uma metodologia usada para definir os parâmetros de manutenção de qualquer item físico no contexto operacional deste, pois, é um procedimento que estuda um equipamento ou sistema em detalhes, analisando como este pode falhar e definindo uma melhor forma de fazer manutenção de modo a prevenir a falha ou minimizar as perdas decorrentes das mesmas.

Segundo o MoD (Ministério da Defesa do Reino Unido 2016) e o CNGSEUA (Centro Naval de Guerra de Superfície dos Estados Unidos da América, 2011), a MCC utiliza técnicas como a Análise do Efeito do Modo de Falha (FMEA), o Efeito do Modo de Falha e Análise Crítica (FMECA) e a Análise da Árvore de Falhas (FTA)

para identificar as possíveis causas de cada falha, bem como algumas técnicas estatísticas para estimar um tempo médio entre falha (MTBF), tempo médio de reparo (MTTR). Ebrahimi (2010) declarou que o FMEA é a essência da MCC, pois fornece um procedimento para identificar e reconhecer funções, modos de falha, causas de falha, e efeitos e consequências de uma falha na operabilidade de um determinado equipamento, sistema ou processo.

#### 4.2.1 Objetivos do MCC

Moubray (2000) definiu que o processo da MCC implica em sete perguntas básicas sobre cada um dos itens em análise, como pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1 - As sete questões básicas do MCC segundo Moubray (2000).**

1. Quais são as funções padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?
2. De que forma ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre a falha?
5. De que forma cada falha importa?
6. O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa apropriada?

Fonte: Adaptado de Moubray (2000).

Siqueira (2005) propôs uma questão adicional com o objetivo de otimizar o cálculo de frequência das atividades de manutenção:

1. Qual a frequência ideal para as tarefas?

Essas questões são respondidas por meio do trabalho em uma sequência estruturada de etapas, onde cada etapa apresenta ferramentas de modelagem e análise de sistemas que documentam os critérios e dados utilizados na resolução de cada questão (MOUBRAY, 2000). Segundo Siqueira (2005), que retirou da norma IEC 60300-3-11 e do relatório ATA MSG-3, a MCC apresenta os objetivos que são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - **Objetivos detalhados da metodologia do MCC.**

Descrições
Preservar as funções dos equipamentos com a segurança requerida
Restaurar a confiabilidade e segurança projetada, após a deterioração
Otimizar a disponibilidade
Minimizar o Custo do Ciclo de Vida (LCC – <i>Life Cycle Cost</i> )
Atuar conforme os modos de falha
Realizar apenas as atividades que precisam ser feitas
Agir em função dos efeitos e conseqüências de falha
Documentar as razões para escolha das atividades

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

A Tabela 3 exibe comparações das características principais entre MCC e a manutenção tradicional.

Tabela 3 - **Comparações das características da metodologia MCC com a manutenção tradicional utilizada na indústria.**

Características	Manutenção Tradicional	MCC ou RCM
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Consequência das falhas
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por função

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

#### 4.2.2 Implementação da MCC

A metodologia MCC ou RCM, segundo Siqueira (2005) adotou uma sequência estruturada, com posta de sete etapas, a saber:

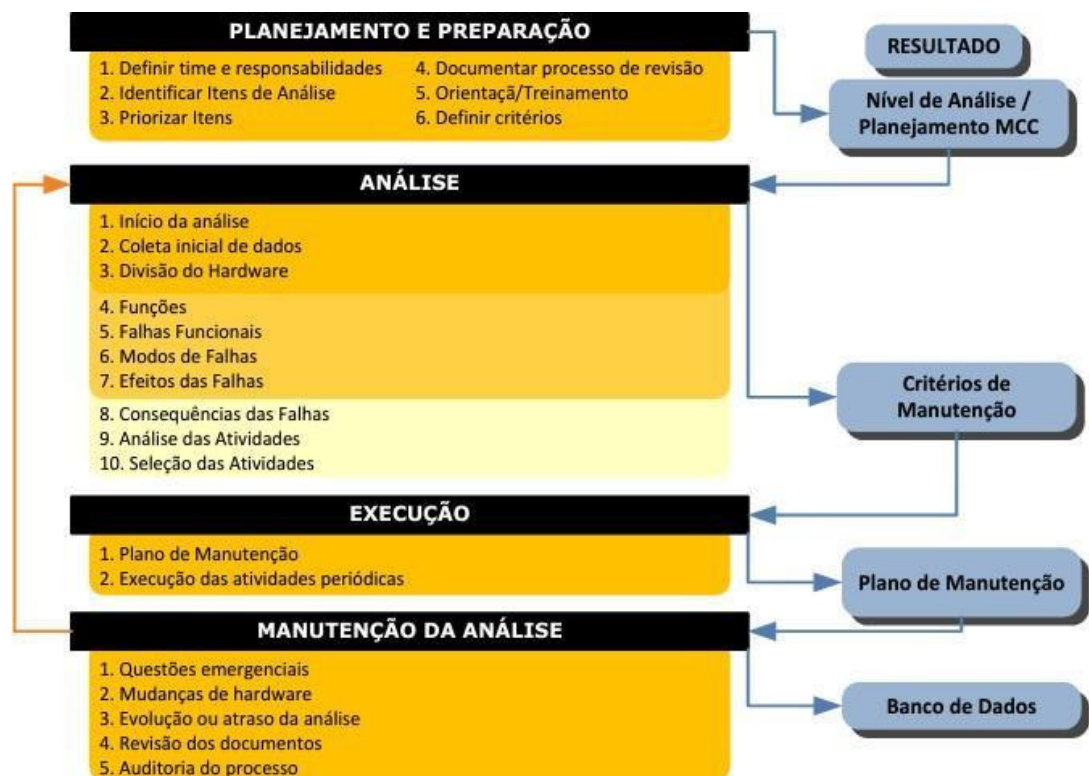
- **Seleção do Sistema e Coleta de Informações:** identifica e documenta o sistema ou processo que será submetido à análise;
- **Análise de Modos de Falha e Efeitos:** identifica e documenta todas as funções e os modos de falha, bem como os efeitos adversos produzidos por estas, utilizando a metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*);
- **Seleção de Funções Significativas:** utiliza um processo estruturado para

analisar cada função identificada na etapa anterior, e determina se uma falha tem efeito significativo;

- **Seleção de Atividades Aplicáveis:** determina-se as tarefas de manutenção que são tecnicamente aplicáveis para prevenir ou corrigir cada modo de falha;
- **Avaliação da Efetividade das Atividades:** constitui-se em um processo estruturado para determinar se uma tarefa de manutenção é efetiva para reduzir, a um nível aceitável, as conseqüências previstas para uma falha;
- **Seleção das atividades Aplicáveis e Efetivas:** utiliza-se de um processo estruturado para determinar a melhor tarefa;
- **Definição da Periodicidade das Atividades:** estabelece os métodos e critérios para definição da periodicidade de execução das atividades selecionadas.

A Figura 2 ilustra os processos de análise e possíveis relacionamentos que podem estar presentes em cada etapa da implantação.

Figura 2 – Diagrama detalhado de Implantação da metodologia MCC e os resultados a serem encontrados.



Fonte: Adaptado de Leverette (2006).

#### 4.2.3 Métodos FMEA e FMECA

FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha), é uma ferramenta de estratégia de gestão que tem como objetivo evitar erros, ou problemas no processo industrial (XAVIER, 2015). É também uma técnica estruturada e sistematizada para análise de falhas. Considera-se como o primeiro passo de um estudo de confiabilidade, onde ocorre a revisão de componentes, montagens, sistemas e subsistemas para identificar as falhas, modos de falha, as causas e efeitos destes (TELES, 2018). Fogliatto (2011), também definiu FMEA como uma técnica de confiabilidade que tem como objetivos: (i) reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo, (ii) identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas, e (iii) documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

Segundo Carpinetti (2019) após a análise de falhas é possível quantificar o risco da falha no sistema, RPN, através do produto dos indicadores de severidade (severidade da falha em afetar o cliente), ocorrência (ocorrência de falha) e detecção (chance de detectar a ocorrência da falha antes que ela gere um efeito indesejável para o cliente), como é mostrado na equação 1,

$$RPN = Severidade \times Ocorrência \times Detecção \quad (1)$$

O RPN é medido a partir de uma escala de 0 a 1000, sendo a pontuação para cada produto (severidade, ocorrência e detecção) atribuída de acordo com a experiência dos membros da equipe responsável pela construção do FMEA. Carpinetti (2019) define o peso desses indicadores de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Pontuação para os componentes do RPN

Componente do RPN	Classificação	Peso
Severidade	Perigoso sem aviso prévio	10
	Perigoso com aviso prévio	9
	Muito alto	8
	Alto	7
	Moderado	6
	Baixo	5
	Muito Baixo	4
	Menor	3
	Muito Menor	2

	Nenhum	1
Ocorrência	Muito alta	10, 9
	Alta	8, 7
	Moderada	6, 5, 4
	Baixa	3, 2
	Remota	1
Detecção	Muito grande	1, 2
	Grande	3, 4
	Moderada	5, 6
	Pequena	7, 8
	Muito Pequena	9, 10

Fonte: Adaptado de Carpinetti (2019).

O FMEA utilizando o indicador RPN é definido como FMECA (Análise do Modo, Efeito e Criticidade de Falhas), tendo este então uma abordagem qualitativa e quantitativa dos modos de falhas (PIECHNICKI *et al*, 2017).

#### 4.3 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

De acordo com a norma europeia EN 13306:2017 (2017), o gerenciamento de manutenção é um conjunto de atividades que determinam os objetivos, estratégias e subsequente implementação dos mesmos por meios como planejamento, controle e a melhoria das atividades de manutenção e economia. De acordo com Oliveira (2017), as empresas adotam distintas estratégias de manutenção devido à combinação das decisões tomadas no âmbito das diversas atividades envolvidas na gestão da manutenção, uma vez que vários aspectos operacionais e requisitos de negócios tendem a influenciar essas decisões.

Atualmente, a gestão da manutenção visa diminuir tanto o tempo de parada não programada quanto o tempo de parada programada, que reduzem o tempo disponível, em combinação com a otimização da segurança, riscos ambientais e custos (POÓR *et al.*, 2019).

Para alcançar o que é designado pela *World Class Maintenance* - Manutenção de Classe Mundial, é necessário uma melhoria dos processos de manutenção adotados, o que é obtido por meio do uso de técnicas e ferramentas de apoio à gestão da manutenção, por exemplo, TPM, RCM, FMEA, Confiabilidade, Indicadores de Desempenho (OEE, MTBF, MTTR) e *software* (CMMS) (OLIVEIRA, 2017).

#### 4.3.1 Planos de Manutenção

Segundo Lafraia (2001), um plano de manutenção é um conjunto de tarefas destinadas a manter ou recolocar um equipamento em um estado que possa executar a(s) função(ões) requerida(s). As tarefas objetivam detectar, prevenir e corrigir os modos de falha, em uma frequência de execução definida. Podem também especificar mudanças nos itens ou procedimentos. O plano de manutenção deve ser estabelecido em função dos efeitos das falhas e composto por tarefas que sejam aplicáveis e economicamente eficientes (LAFRAIA, 2001).

Segundo Siqueira (2005), para os propósitos de aplicação da MCC, as tarefas de manutenção podem ser classificadas de acordo com a forma de programação e o objetivo. As tarefas programadas podem ser divididas, segundo um critério de programação, como pode ser observado por meio da Tabela 5.

**Tabela 5 – Tarefas de manutenção programadas segundo os critérios de programação.**

<b>Critérios de Programação</b>	<b>Definições</b>
Direcionadas por tempo	Tarefas que são executadas em ciclos ou datas limites de operação.
Direcionadas por condição	Tarefas executadas de acordo com condições pré-definidas.
Direcionadas por falhas	Tarefas que objetivam descobrir a ocorrência de modos de falha ocultos.
Orientadas para operação	Tarefas que visam suprir os materiais consumíveis e pre-servar o ambiente da instalação.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

Quanto às tarefas não programadas, estas são divididas, seguindo o motivo da execução, conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 – Tarefas de manutenção não programadas segundo motivo da execução.**

<b>Motivos de Execução</b>	<b>Definição</b>
Correção de defeitos	Visam corrigir o defeito antes da evolução para uma falha.
Correção de falhas	Visam restaurar, substituir ou reparar a capacidade funcional do item.
Reprojeto	Visam a melhoria da capacidade do(s) item(ns).

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

Quanto ao objetivo, as tarefas de manutenção podem ser classificadas de acordo, com a Tabela 7.

**Tabela 7 – Tipos de atividades de manutenção programada e não programada e as principais definições.**

<b>Tipos de Atividades</b>	<b>Definições</b>
Substituição Preventiva (SP)	Reposição programada de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina em determinada idade limite, para prevenir a falha funcional deste. Atividade direcionada por tempo.
Restauração Preventiva (RP)	Correção programada do desgaste ou desvio de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina em determinada idade limite, para prevenir a falha funcional. Atividade direcionada por tempo.
Inspeção Preditiva (IP)	Verificação programada de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina por sentido humano e instrumental do estado de evolução de uma falha potencial com o objetivo de detectar e corrigir antes da evolução para uma falha funcional. Atividade direcionada por condição.
Inspeção Funcional (IF)	Verificação programada do estado funcional de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina, visando descobrir uma



	falha funcional que já tenha ocorrido. Envolve testar a funcionalidade do componente. Atividade direcionada por falhas.
Serviço Operacional (SO)	Ressuprimento de materiais consumíveis usados na operação normal do equipamento e outras atividades repetitivas como limpeza e outras associadas a conservação. Atividade direcionada para operação.
Manutenção Corretiva (MC)	Restauração não programada de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina, visando corrigir os defeitos ou falhas potenciais detectadas. Atividade direcionada por condição.
Reparo Funcional (RF)	Recuperação não programada da capacidade funcional de um componente ou peça de um determinado equipamento ou máquina, visando reparar falhas funcionais já ocorridas. Atividade direcionada por falha.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

O procedimento de tomada de decisão no MCC baseia-se na Análise de Falhas e Efeitos (FMEA) e aperfeiçoa o sistema de gestão da manutenção, definindo as etapas a serem executadas na manutenção de equipamentos e determinando o intervalo de etapas de trabalho e peças de reposição a serem utilizadas (YAVUZ *et al.*, 2019; NASA, 2008). Além disso, a MCC permite definir a criticidade do equipamento no processo, podendo priorizar os riscos à segurança, ao meio ambiente e ao setor econômico (ZAREI e GHAEDIKAJUEI, 2017; YAVUZ *et al.*, 2019).

No contexto das plantas de produção, Antomarioni *et al.* (2019) afirmaram que definir a melhor política de manutenção representa uma questão crítica. Isso se deve, segundo Zhao *et al.* (2019), às condições muito complexas e adversas em que elas operam, pois, o equipamento, geralmente, trabalha com materiais altamente corrosivos, em altas temperaturas, pressões e velocidades. Portanto, a estratégia de manutenção escolhida deve ter um equilíbrio entre custo e

confiabilidade da planta (ALTAF, 2014).

Nas refinarias de alumina, por exemplo, a qualidade e o custo de produção do produto final determinam o sucesso destas (SHAHEEN *et al.*, 2020). Segundo Uddin *et al.* (2018), as refinarias de alumina são instalações de processos intensivos em ativos e energia que transformam minérios de bauxita em alumina, utilizando como processo mais comum de produção, o Processo Bayer, o qual ser apresentado em detalhes a seguir:

#### 4.4 PROCESSO BAYER E A ALUMINA

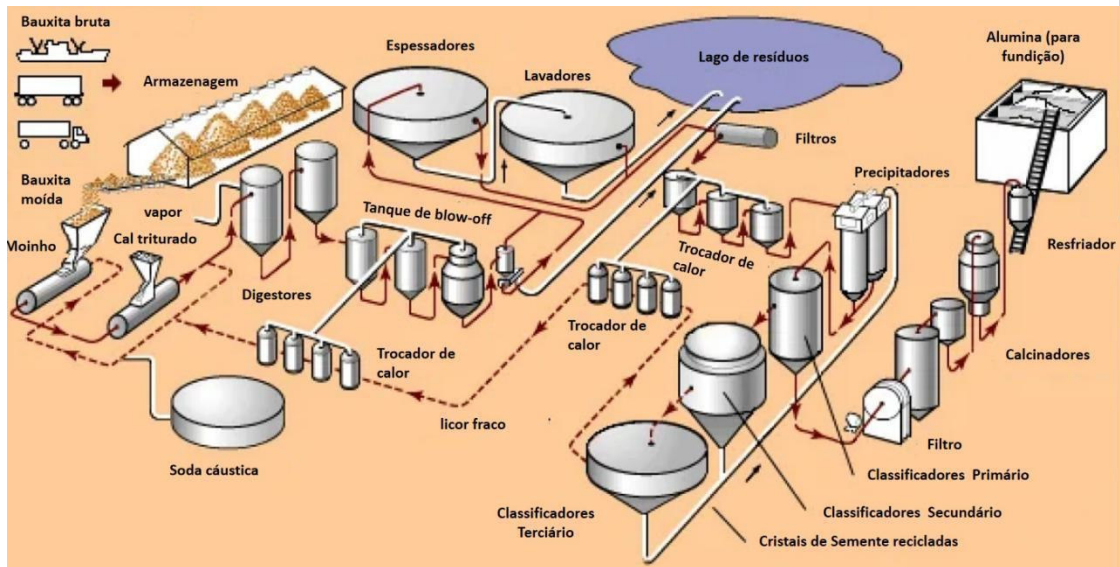
A alumina é produzida a partir do minério de bauxita por meio do processo conhecido como Bayer, o qual foi inventado por Karl Bayer em 1887 (Rai *et al.*, 2017). Todo o processo de produção de alumina pode ser resumido pela reação química 2 de equilíbrio (SHAHEEN *et al.*, 2020),



A reação direta representa uma dissolução da alumina e a reação inversa representa a precipitação semeada e a regeneração do NaOH (SHAHEEN *et al.*, 2020).

A extração é realizada por meio da digestão da bauxita utilizando hidróxido de sódio (NaOH) em temperatura elevada (106–240 °C) e sob pressão (1–6 bar) (Rai *et al.*, 2017). É interessante destacar que o referido processo de extração, em resumo é a separação da alumina de componentes indesejados, por exemplo, óxidos de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), titânio (Ti), silício (Si), cálcio (Ca), vanádio (V), manganês (Mn), entre outros, provenientes da bauxita (Rai *et al.*, 2017). A Figura 3 representa um diagrama esquemático do processo Bayer para produção de alumina.

Figura 3 – Principais operações no processo Bayer de refino de bauxita para produção de alumina.



Fonte: Adaptado da Enciclopedia Britannica (2022).

Segundo BAGSHAW (2017), após a separação das impurezas, o aluminato é bombeado para tanques de mistura. Após a mistura, as partículas de hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) seguem para a precipitação. A última etapa do processo Bayer ocorre no calcinador, onde o hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) passa por um leito rotativo a temperaturas de até  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  para quebra das ligações com moléculas de água, resultando no óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (BAGSHAW, 2017).

O transporte de sólidos por meio de uma tubulação na forma de lama, tem sido amplamente utilizado como um método eficaz e econômico de transporte de misturas sólido-líquido (TARODIYA E GHANDI, 2017). A bomba que é usada para transportar pastas corrosivas/abrasivas em alta concentração ou não de sedimentação é chamada de **bomba de lama** (do inglês *slurry pump*) (PATEL *et al.*, 2020).

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DA BOMBAS DE POLPA OU PASTA (*SLURRY PUMP*)

Segundo Macyntire (1997), o bombeamento de líquidos em operações nas indústrias químicas constitui um dos maiores desafios aos fabricantes de bombas, dadas as características e propriedades dos líquidos empregados e as condições severas a que as bombas são submetidas. Segundo o mesmo autor, as bombas

centrífugas são largamente empregadas, devido à sua adaptabilidade a praticamente qualquer serviço.

As bombas centrífugas de polpa são turbomáquinas projetadas especificamente para trabalhar com misturas sólido-líquidas, sendo capazes de lidar com o fluxo de altas concentrações de partículas sólidas, que aceleram muito o desgaste das peças (PATEL *et al.*, 2020). O desempenho e as características de desgaste dessas bombas dependem das propriedades dos sólidos e da suspensão encontrada (TARODIYA e GHANDI, 2017).

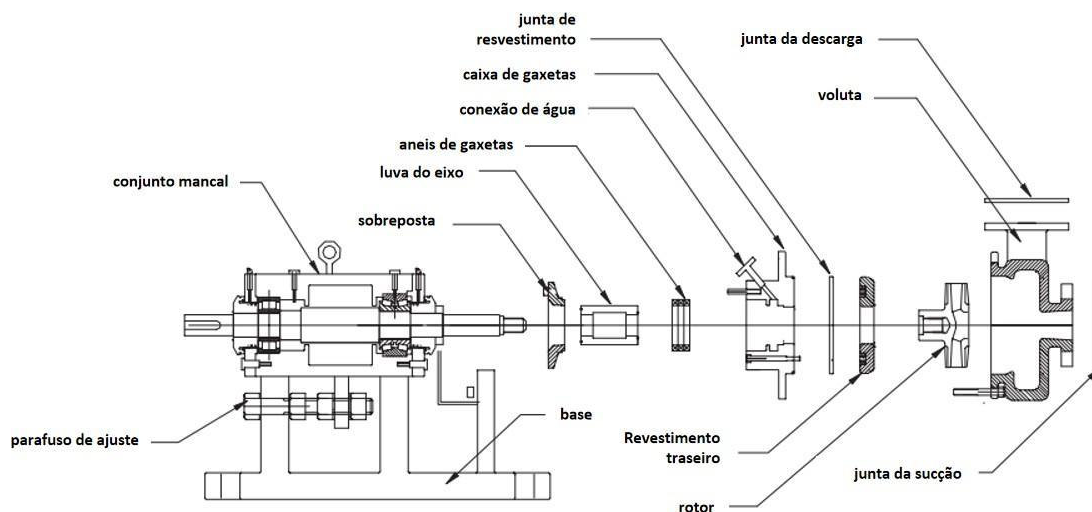
A polpa ou pasta, segundo a Weir (2014), é formada de alguma matéria sólida (minerais, metais pesados, etc) com algum transportador líquido (água, soda cáustica, etc), o que gera uma mistura com inúmeras partículas sólidas, de pequenas ou grandes formatos.

#### 4.5.1 Classificação geral e detalhes construtivos das bombas de pasta

Segundo Abulnaga (2021), uma bomba centrífuga é essencialmente uma máquina rotativa com um impulsor para converter a potência do eixo em pressão do fluido. A energia dinâmica é então convertida em pressão ou *head* em um difusor ou voluta especial.

O projeto de uma bomba convencional, geralmente, é modificado para desenvolver uma bomba de polpa centrífuga (Figura 4). Tais modificações incluem o alargamento da passagem de fluxo para acomodar partículas maiores, uso de um rotor robusto com menor número de palhetas, arranjos especiais de elementos de vedação e material resistente ao desgaste adequado para garantir uma maior vida útil (ABULNAGA, 2021).

Figura 4 – Vista explodida apresentando os principais componentes de uma bomba fabricada de metal duro sem revestimento.



Fonte: Adaptado de Mazdak International Inc. *apud* ABULNAGA (2021).

Apesar de uma ampla utilização e demanda desse tipo de bomba, o desempenho é deteriorado após certos períodos de operação (POKHAREL *et al.*, 2020). Por exemplo, cavitação, corrosão, erosão, falha de fratura são os principais problemas encontrados em bombas de polímero (POKHAREL *et al.*, 2020).

A erosão da lama e cavitação são as duas causas mais comuns que contribuem para o desgaste das peças, uma vez que as partículas sólidas arrastadas no fluxo de líquido impactam com o impulsor da bomba ou a carcaça da voluta em altas velocidades (NOON *et al.*, 2021). O efeito da cavitação pode surgir devido às flutuações de pressão nas bombas, resultando na formação de bolhas de vapor nas zonas de baixa pressão, que eclodem ao atingir as zonas de alta pressão (NOON *et al.*, 2021). Tanto a erosão da pasta quanto a cavitação causam danos às superfícies metálicas, que afetam a forma das pás do impulsor e da carcaça da voluta (NOON *et al.*, 2021).

Para mitigar os principais efeitos da erosão e cavitação da lama, conforme supramencionado, é fundamental entender, prever e minimizar esses fenômenos que podem influenciar diretamente nas estratégias de manutenção, gestão dos ativos e custo de operação (NOON *et al.*, 2021).

## 5 METODOLOGIA

Neste trabalho, após realizar o levantamento teórico referente à metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), buscou-se os planos de manutenção e gerenciamento de manutenção das bombas de polpa responsáveis por alimentar os digestores no processo. Outras informações como o histórico de atividades e consumo de peças desses ativos e algumas investigações de falhas que envolveram perdas de produção ou retrabalhos da manutenção também foram levantadas.

A escolha desses ativos como foco do objetivo desse estudo está na criticidade desses equipamentos no sistema de produção da empresa.

### 5.1 Descrição do sistema em estudo

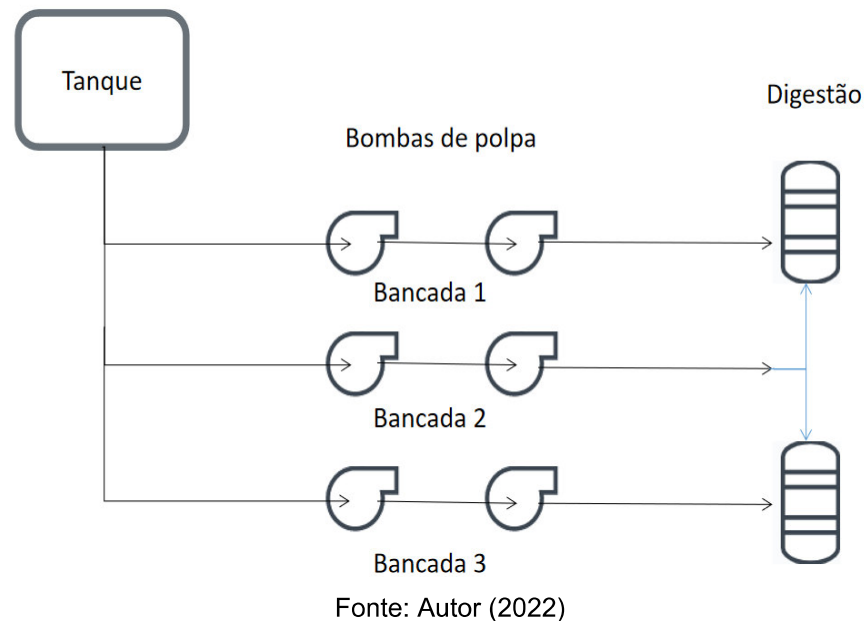
Dentro do processo Bayer explicado na seção 4.5, o sistema em estudo encontra-se na unidade que recebe o fluxo de polpa de bauxita vinda dos moinhos e tem como função promover o início da remoção de sílica no processo por meio da reação de dessilicação realizada por decantação em tanques antes e durante o processo de digestão (HUDSON, 2005). A reação química (3) exemplifica a reação da caulinita (óxidos de silício) com a solução do processo:



Além disso, a unidade é responsável por estocar, aquecer e fornecer pasta de bauxita para a área da digestão, servindo como tanques pulmões com duração máxima de 24 (vinte e quatro) horas de material para o processo.

Para alimentar a digestão, que possui atualmente 2 (duas) unidades, são utilizadas 6 (seis) bombas centrífugas horizontais de polpa distribuídas em 3 (três) bancadas, tendo 2 (duas) bombas associadas em série em cada bancada devido à necessidade de *head*. As unidades da digestão são alimentadas cada uma por uma bancada, sendo a terceira bancada reservada para ambas as unidades. A Figura 5 apresenta um esquema simplificado do sistema em estudo.

Figura 5 – Esquema simplificado da configuração das bombas em estudo em bancadas.



O sistema de três bancadas apresentado na Figura 5.1.1 delimitará a análise de estudo desta pesquisa, uma vez que, estando esse sistema em falha ou parcialmente funcional, a produção é diretamente afetada e então, reduzida (ou perdida no fator tempo). Por esta razão, as bombas que compõem as 3 (três) bancadas de alimentação da digestão são consideradas equipamentos críticos, requerendo uma alta taxa de disponibilidade e confiabilidade.

Quanto as características dos 6 (seis) ativos dessas bancadas, as bombas são de modelo 10/8ST-AHP da *Warman*, marca da empresa *Weir*, de origem alemã. A Figura 6 exemplifica as bombas *Warman*.

Figura 6 – Imagens ilustrativas do modelo das bombas *Warman (Weir)*.

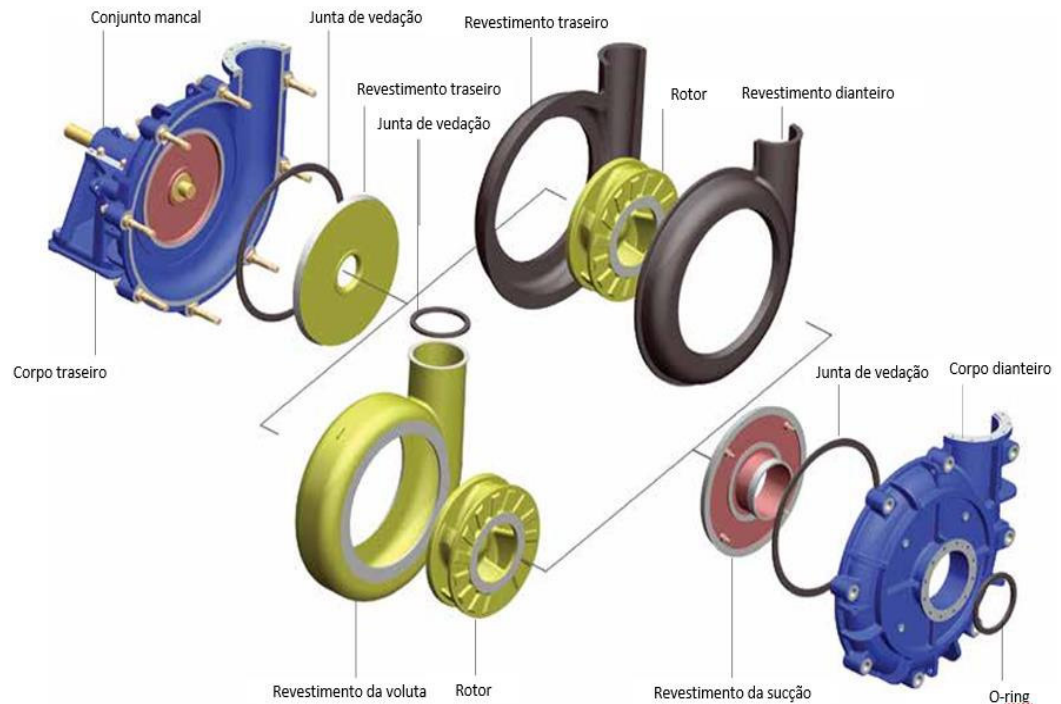


Fonte: Adaptado de O Sucateiro (2022).



Essas bombas têm como característica principal estar em balanço, com uma sucção localizada no centro e descarga na lateral (Weir, 2014). Esse tipo de bomba também apresenta uma carcaça externa e dupla, voluta, revestimentos para desgaste e a vedação por gaxetas ou selo mecânico (Weir, 2014). A Figura 7 ilustra um esquema explodido de peças da linha *Warman AHP*.

Figura 7 – Imagem explodida da linha de bombas *Warman AHP*.



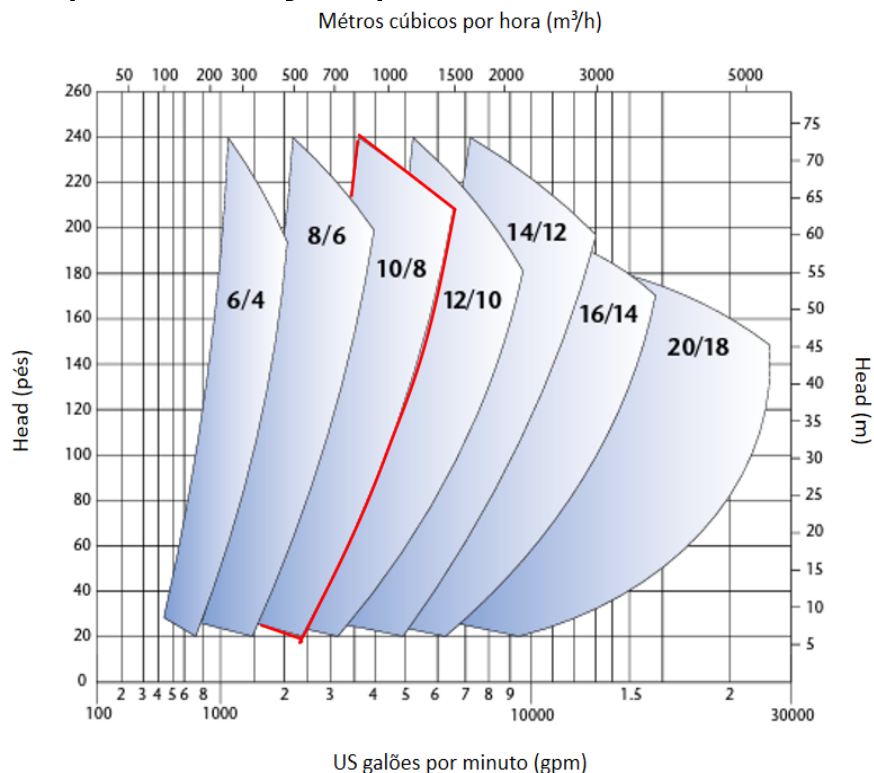
Fonte: Adaptado de *Weir Slurry Group Inc* (2014).

Da Figura 7, percebe-se dois tipos de revestimento de voluta possíveis: inteira ou partida. O revestimento da voluta partida é fabricada com um polímero (borracha), o que no caso das bombas de polpa em estudo, cujo fluido de trabalho têm características corrosivas e abrasivas, quando empregadas à alta temperatura, impossibilita o uso destas, sendo então, utilizado a voluta inteiro que é fabricado em metal duro (Weir, 2014).

A Figura 8 apresenta o gráfico de seleção rápida de bombas disponibilizado pela empresa *Weir* em seu site, onde enfatiza-se a configuração 10/8 das bombas em estudo.



Figura 8 – Gráfico para uma seleção rápida de bombas modelo Warman AHP.



Fonte: Adaptado de *Weir Slurry Group Inc* (2014).

O intervalo de vazão volumétrica do modelo 10/8 vai de 350 m<sup>3</sup>/h a 1500 m<sup>3</sup>/h com um *head*, podendo variar de 7 m a 73 m, possuindo um dos maiores intervalos dentre os modelos fornecidos pela empresa supramencionada.

Dadas as características de trabalho dessas bombas nas 3 (três) bancadas, tem-se a existência de um fluido a alta pressão, devido à associação das bombas em série, junto a uma alta velocidade de rotação. Todos os fatores expostos corroboram ao rápido desgaste das peças, o que será visto mais a frente, o que por sua vez gera um número de intervenções da manutenção maior nesses ativos e constantes estudos para melhoria da vida útil das peças, bem como, a redução de custo das aquisições destas

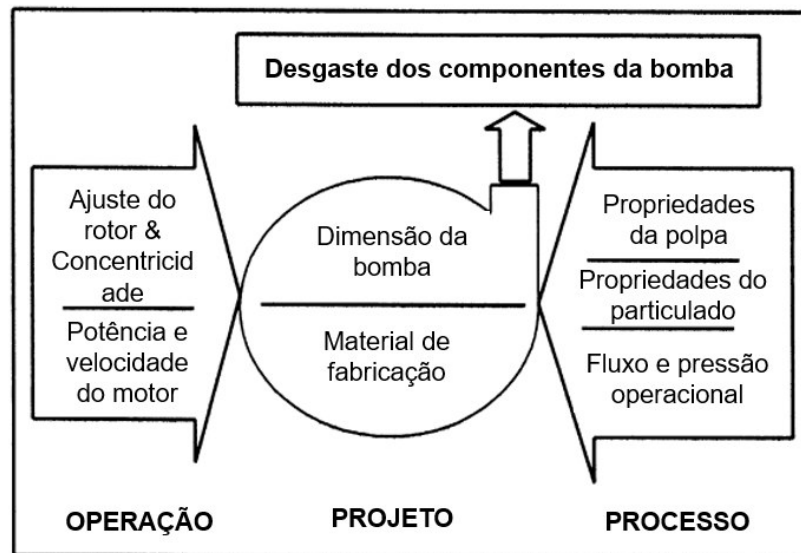
## 5.2 Período de análise e cenários estudados

O período de estudo escolhido foi entre os anos de 2016 a 2022. Durante este intervalo, tem-se 3 (três) cenários diferentes nos quais é observado o aumento consecutivo do fluxo (vazão volumétrica) requerido por essas bancadas, aqui definidos como baixo, médio e alto, nos anos 2016 e 2017, 2017 e 2018, 2019 a

2022, respectivamente, além dos cenários antes e depois da introdução de uma bomba reserva em 2017.

O aumento do fluxo bombeado exige mais do equipamento, o que reduz a vida útil do mesmo e conseqüentemente, aumenta a necessidade de intervenções da manutenção. Trabalhos como os de Walker (1999) e Walker (2000), já identificaram esses fatores e serviram de base para trabalhos mais recentes, por exemplo, PENG et al. (2020) e PENG et al. (2021), que analisaram o comportamento de desgastes mediante alteração da vazão volumétrica e possíveis soluções para aumento da vida útil do equipamento. A Figura 9 resume os principais fatores que influenciam no desgaste dos componentes das bombas.

Figura 9 – Fatores que afetam a vida útil de uma bomba centrífuga.



Fonte: Adaptado de Walker (1999).

Entretanto, a introdução de uma bomba reserva ou *cold spare* para a troca completa e rápida, pode ser uma estratégia de redução desse tempo de intervenções, fazendo não haja grande aumento do tempo de indisponibilidade do ativo, mesmo exigindo mais deste. Além disso, há um aumento na qualidade do serviço ao retirar o equipamento da área operacional e o alocar em um ambiente com menores riscos a segurança e ambientais, pois a pressão no colaborador em finalizar a atividade, os perigos e as chances de erros durante a execução se tornam menores, já que a atividade de manutenção no equipamento é desatrelada ao sistema de produção.

Quanto à abordagem da pesquisa, as ferramentas e metodologias aplicadas

são de caráter qualitativo e quantitativo, sendo neste último utilizado alguns parâmetros indiretos, a fim de preservar os dados coletados da empresa, objetivando compreender e interpretar as falhas comuns e os planos de manutenções abordados, além de planos com um potencial para melhorar a vida útil dos ativos.

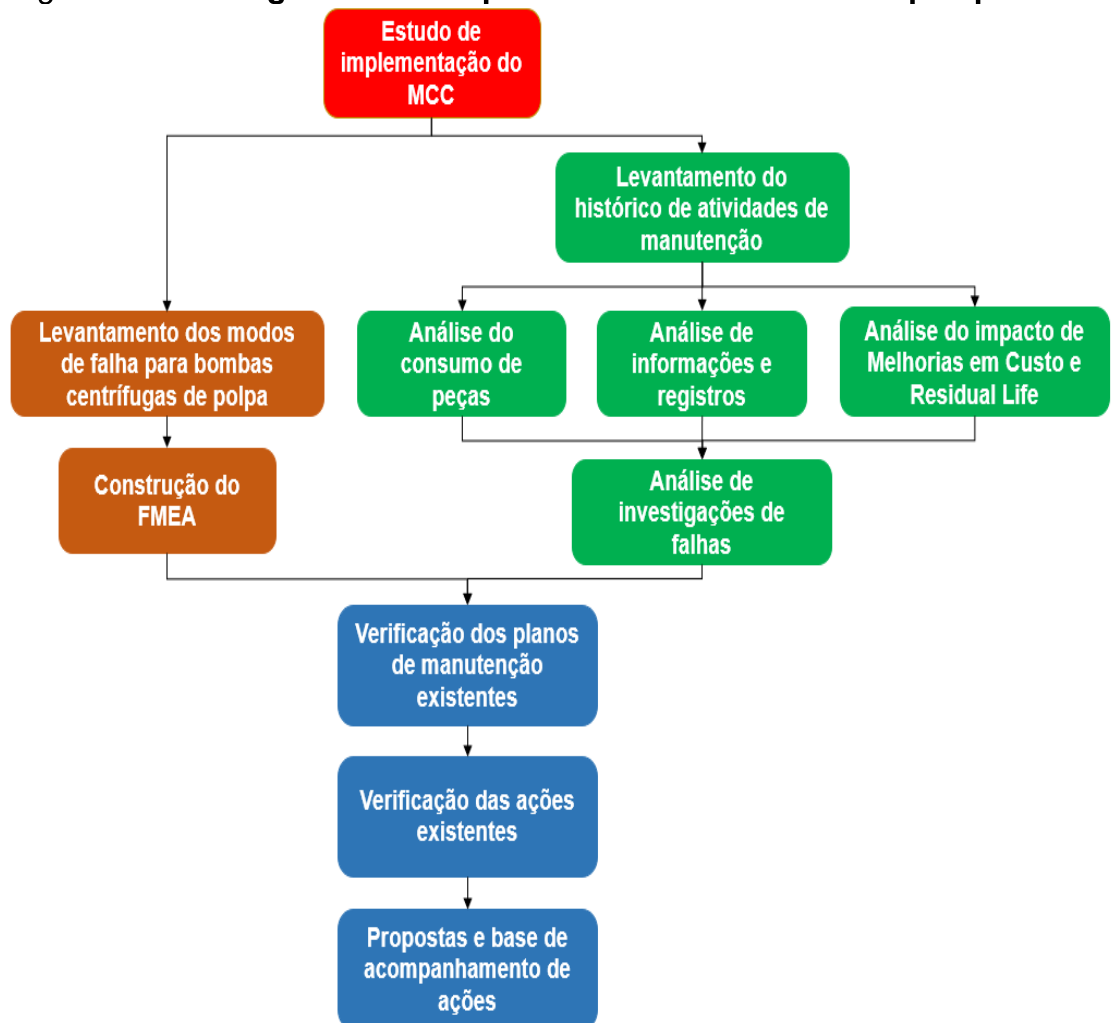
### 5.3 Etapas de Desenvolvimento da pesquisa

A partir do estudo de implementação do MCC, dois levantamentos foram realizados simultaneamente: os modos de falhas para bombas centrífugas de polpa e o histórico de atividades de manutenção nos ativos em estudo.

Para cada uma dessas abordagens foram definidos parâmetros no intuito de melhor entender a realidade do sistema e normalizar os resultados. Esses parâmetros são melhor explicados na seção 5.4. Com as análises e o FMEA construídos, as próximas etapas foram as de verificação dos planos de manutenção e ações criadas seja por investigações de perdas de produção, estudos anteriores ou decisões da gestão.

Por fim, propostas e ferramentas de acompanhamento foram sugeridas para implementação nos planos de manutenção já existentes. O fluxograma apresentado na Figura 10 resume o esquema das etapas aqui descritas.

Figura 10 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

#### 5.4 Variáveis e Indicadores da pesquisa para o histórico de manutenção

Para avaliar o histórico de intervenções da manutenção nos ativos e a eficiência desta, foram criados alguns indicadores dentro de duas variáveis principais: os planos de manutenção e a Engenharia de Manutenção.

Nos planos de manutenção, o objetivo dos indicadores é entender o grau de organização das informações, que podem servir de banco de dados para estudos futuros da própria empresa, bem como, verificar a eficiência dos planos em vigor nesses ativos.

Tendo a empresa uma plataforma de registro de trabalho, um indicador consequente é o **cadastro dos equipamentos**. Os equipamentos possuem TAG e

são registrados com todas as informações técnicas necessárias, para que as atividades e solicitações de peças e equipamentos sejam feitas de forma correta e dentro da plataforma? Há classificação de criticidade?

Um segundo indicador são as **ordens de trabalho**, o qual consegue responder as seguintes perguntas: As atividades são registradas? Qual a qualidade de informação nas ordens?

Os **padrões de manutenção**, segundo Xenos (2004), é um meio para melhorar tanto a execução quanto o gerenciamento das atividades de manutenção. Desta forma, torna-se necessária a existência de procedimentos, preparação técnica e registro dessas informações de fácil acesso e tratamento para que se possa ser considerado uma manutenção eficaz.

No âmbito da manutenção preventiva cíclica, os critérios de decisão do intervalo entre os ciclos depende muito das características de trabalho dos ativos. Assim como realizado no estudo de Souza (2008), para verificar a eficiência da manutenção preventiva na gestão dos ativos foi utilizado um indicador denominado de **retrabalho**.

O critério de retrabalho foi determinado de uma forma que fosse possível medir até que ponto a periodicidade e o escopo da manutenção garantem que o ativo não necessite de intervenções não programadas entre os ciclos de manutenções preventivas (SOUZA, 2008).

Para a Engenharia de Manutenção, dois indicadores foram criados com intuito de estudar as melhorias e impactos ao longo do período estudado. O primeiro indicador foi a Redução de Custos, o qual analisa a introdução de novos fornecedores de peças, upgrades de peças, impacto da introdução de planos de manutenção e testes de melhoria no sistema estudado. O segundo foi o aumento de vida residual (*Residual Life*) das peças e por consequência do ativo, que está vinculado ao primeiro indicador.

A Tabela 8, mostra o resumo das variáveis e os indicadores selecionados para auxiliar o desenvolvimento dessa parte do estudo.

**Tabela 8 - Variáveis e indicadores utilizados para tratamento dos dados levantados na pesquisa quanto ao histórico de manutenções.**

Variáveis	Indicadores
Planos de Manutenção	Cadastro dos equipamentos
	Ordens de serviço
	Padrões de Manutenção
	Retrabalhos
Engenharia de Manutenção	Redução de Custos
	Aumento do <i>Residual Life</i>

Fonte: Autor (2022)

Para normalizar dos indicadores, uma escala de 0 (zero) a 10 (dez) foi adotado para o nível de atendimento aos parâmetros já levantados, com 8 (oito) sendo um valor considerado ideal.

Os dados utilizados como base para essas análises partiram do sistema utilizado pela empresa para registro de atividades de manutenção e operação, o que engloba também o histórico de peças e o respectivo custo de aquisição, além de fornecedores e informações deixadas pelos colaboradores que realizaram as atividades.

### 5.5 Implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade

Dentro da metodologia da MCC, a principal ferramenta utilizada foi o FMEA, construído a partir das bases de dados teóricas, do fornecedor do equipamento e histórico de modos de falhas estudados e investigados pela própria empresa.

Com o FMEA construído, algumas ações de controle e/ou mitigação de modos de falhas já haviam sido traçadas pela empresa. Assim, para estes casos a abordagem foi constatar se as principais ações foram realizadas, mantidas e necessariamente eficientes. Para aqueles modos de falhas, cujas falhas ocasionaram investigações adicionais devido às perdas de produção, a abordagem foi levantar o plano de ação para as causas raízes das falhas e verificar a realização

e manutenibilidade dessas referidas ações. Para os demais casos, sugestões de ações de mitigação ou redução de falhas foram realizadas.

O indicador de risco RPN foi empregado para auxiliar na priorização da análise e no impacto que essas ações ou ausência ou negligência destas, podem causar na disponibilidade do sistema. A Figura 11 apresenta o formato do FMEA que é apresentado neste trabalho.

**Figura 11 – Estrutura do FMEA para bombas centrífugas de polpa.**

Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência

Fonte: Autor (2022).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como definido na seção 3, o objetivo desse trabalho foi realizar um estudo de desenvolvimento e implementação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) em um conjunto de equipamentos críticos (6 bombas centrífugas de polpa) de uma refinaria produtora de alumina instalada na capital maranhense.

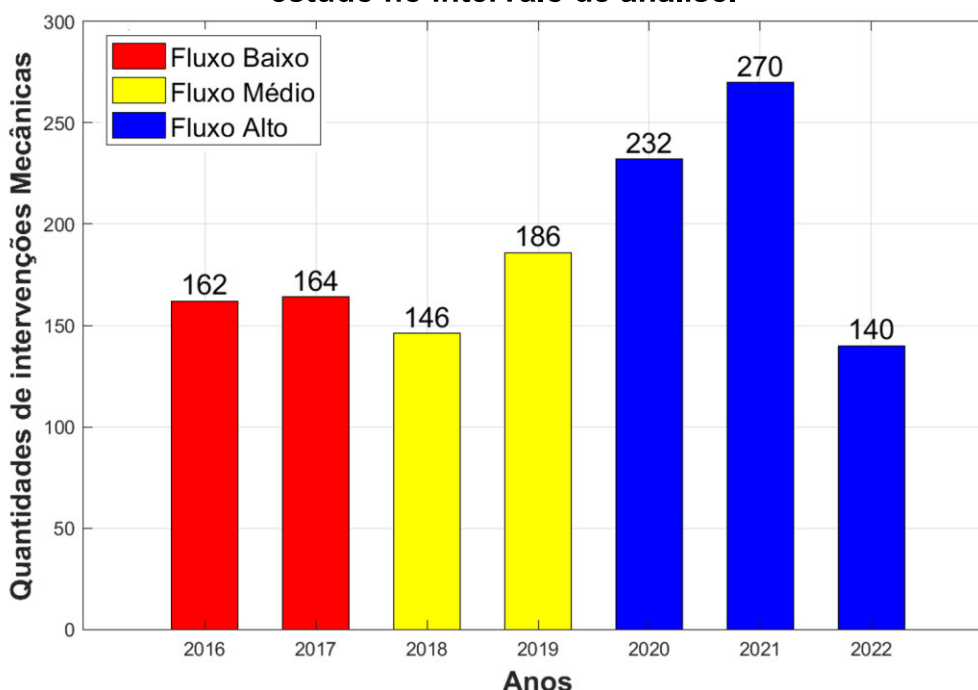
Em um primeiro momento, foi realizado o levantamento do histórico de manutenções nas bombas para as análises do consumo de peças, das informações e registros de ordens de serviço, dos impactos de melhorias em custo e *residual life* das peças no intervalo dos anos de 2016 a 2022.

Na seção 6.1 são apresentados os resultados encontrados quanto ao histórico de intervenções mecânicas e análises.

### 6.1 Análises do histórico de atividades de manutenção

A Figura 12 apresenta uma evolução quantitativa das intervenções mecânicas nos ativos em estudo, destacando os 3 (três) cenários classificados de acordo com o aumento consecutivo do fluxo ou vazão volumétrica, datados até agosto de 2022.

Figura 12 – **Quantitativo por ano de intervenções mecânicas nos ativos em estudo no intervalo de análise.**



Fonte: Autor (2022).



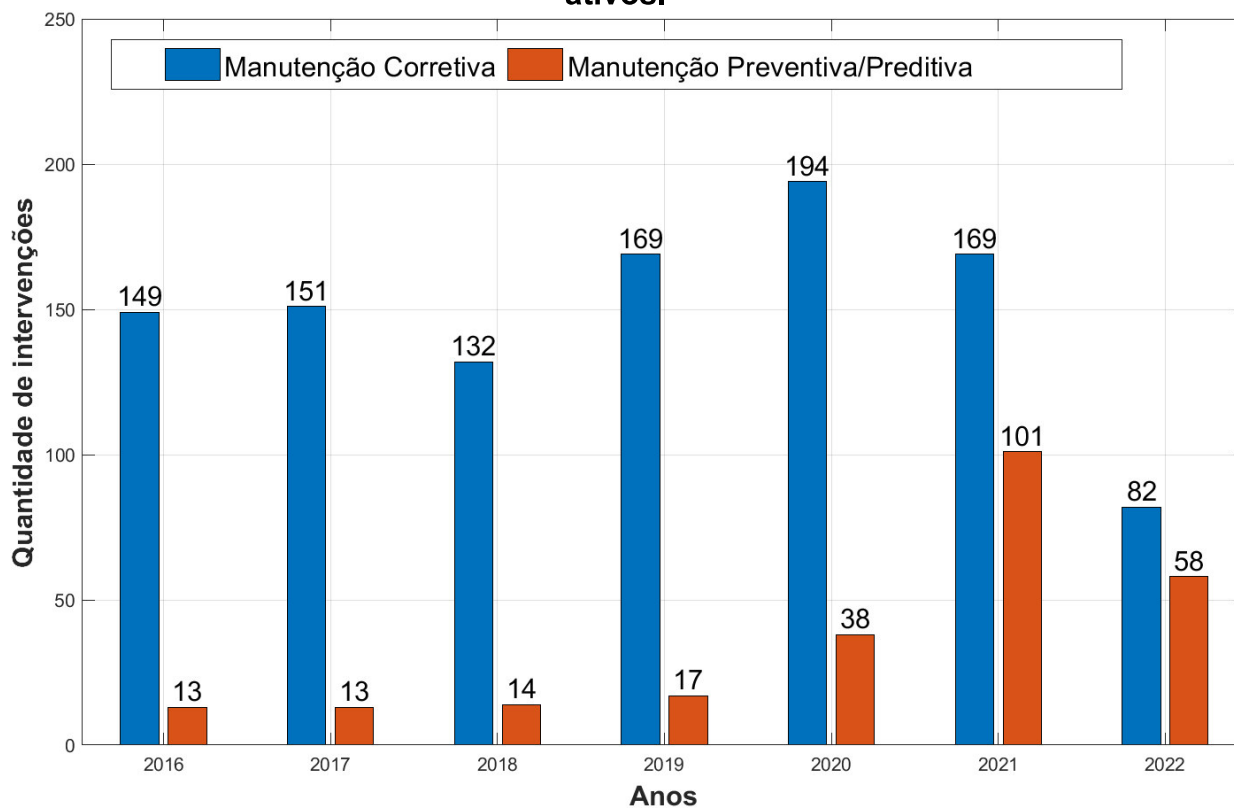
Percebeu-se, com excessão dos anos 2018 e 2022, um crescimento constante das intervenções mecânicas chegando a 66,6% entre 2016 e 2021, ao passo do aumento da vazão volumétrica e consequente aumento da exigência dos ativos e dos desgastes nas peças internas, como rotor, voluta, revestimento de sucção e de descarga. Trabalhos tais como os publicados por Peng *et al.* (2021), Tarodiya (2017), Veselin (2010) e Batalovic (2010) estudaram os efeitos referentes a esses desgastes, a relação do comportamento dos desgastes com as condições de trabalho das bombas de polpa e modelos preditivos para o tempo de serviço de peças críticas como o rotor.

Em Peng *et al.* (2021), os autores compararam, empiricamente e através de modelagem, o aumento do fluxo de bombeamento com os pontos de maior desgastes nas palhetas de um rotor padrão das bombas de polpa, bem como, o comportamento da velocidade das partículas ao longo destas e o desgaste produzido pelas mesmas, conforme a concentração de material particulado foi aumentada de 0% a 50%. Os autores constataram que o aumento da vazão volumétrica e consequente rotação da bomba, houve um deslocamento da concentração de volume de sólidos para as extremidades das palhetas do rotor. Com o aumento da concentração da quantidade de partículas houve uma redução do *head* e da eficiência da bomba.

Ambas as situações foram encontradas no sistema estudado. A primeira, com o aumento do fluxo já supracitados e a segunda, é influenciada pela qualidade da polpa, que dentre outros fatores depende, principalmente do tempo da bauxita nos moinhos, bem como, a eficiência dos mesmos (SHAHEEN *et al.*, 2020). Tais fatores influenciam diretamente nas necessidades de intervenção nas bombas para troca de peças e melhoria da performance das mesmas.

Quanto a causa ou tipos de manutenção realizados nos ativos, a Figura 13 apresenta a segmentação que a própria empresa realiza à saber: manutenção corretiva e manutenção preventiva/preditiva.

Figura 13 – Histórico quantitativo da natureza das manutenções realizadas nos ativos.



Fonte: Autor (2022).

Da Figura 13, observou-se um aumento das intervenções preventivas e preditivas nos ativos, principalmente, nos anos 2020 a 2022. Esses resultados mostraram que ações de detecção, prevenção e mitigação na falha de componentes estão sendo mais utilizadas. Jacanovic *et al.* (2022) enfatizaram que essas ações prolongam a vida útil dos componentes por meio do controle de degradação a um nível aceitável, mantendo os ativos em boas condições e aumentando a confiabilidade do sistema.

Além disso, Jocabovic *et al.* (2022), também comentaram sobre a manutenção preditiva ou manutenção baseada em condição, na qual utiliza-se de sensores como de temperatura e vibração para coletar informações e sinalizar aos mantenedores a realizarem determinadas ações no momento em que for necessário.

Das variáveis e indicadores definidos anteriormente, os resultados da

análise do histórico de atividades de manutenção nas bombas seguem resumidas na Tabela 9. A justificativa das pontuações estabelecidas é apresentada no Anexo A.

**Tabela 9 – Pontuação quanto à aderência dos indicadores das variáveis dentro do histórico de atividades de manutenção.**

Variáveis		Indicadores	Pontuação	Ideal
Plano de manutenção	I1	Cadastro dos equipamentos	6	8
	I2	Ordens de serviço	5	8
	I3	Padrões de Manutenção	8	8
	I4	Retrabalhos	7	8
Engenharia de Manutenção	I5	Redução de Custos	8	8
	I6	Aumento do <i>Residual Life</i>	8	8

Fonte: Autor (2022)

Para a variável de Plano de manutenção, os indicadores apontaram oportunidades de melhorias, principalmente em registro de informação e padronização. Dada a plataforma, a utilização completa das ferramentas disponibilizadas e em potencial pode ser uma ação que melhore o banco de dados da manutenção e operação. Retrabalhos também foram observados, seja por eventos pontuais como variações de operação do sistema ou falhas em componentes auxiliares, ou por necessidade de intervenções antecipadas nos ativos seja para acompanhamento do desgaste das peças ou por necessidade de troca de componentes.

Quanta a variável de Engenharia de Manutenção, as alterações no intervalo das manutenções, a utilização de bomba reserva para trocas rápidas, otimização das vedações com redução de consumo de água de selagem, testes e substituições de fornecedores de peças para redução de custo sem prejudicar o *residual life* são exemplos de ações observadas no histórico que fortalecem os respectivos indicadores.

A redução das intervenções mecânicas periódicas foi uma ação observada a partir de 2019 como verificado na Tabela 10, segundo a divisão de bombas ímpares (Bombas 1, 3 e 5) e pares (Bombas 2, 4 e 6). Essa divisão está associada com o posicionamento na configuração das bombas em série, sendo as ímpares as primeiras bombas e as pares as segundas na sequência. As bombas pares

naturalmente trabalharão com uma maior pressão e conseqüente, maior desgaste nos respectivos componentes, o que as tornam ativos de controle para as intervenções que ocorrem no sistema delimitado por este estudo.

**Tabela 10 – Intervalo de intervenções preventivas nas bombas do sistema avaliado antes e após o ano de 2019.**

<b>Bombas</b>	<b>Intervalo de preventivas anterior (dias)</b>	<b>Intervalo de preventivas atual (dias)</b>
Ímpares (1, 3 e 5)	336	180
Pares (2, 4 e 6)	336	120

Fonte: Autor (2022).

Calvacante *et al.* (2021), Chen *et al.* (2020) e Zhou *et al.* (2021) avaliaram as atividades programadas de manutenção e impacto destas na manutenção propriamente dita, operação e logística. Chen *et al.* (2020) e Zhou *et al.* (2021) utilizaram de uma abordagem computacional por modelos matemáticos para qualificar os efeitos de paradas únicas (anuais) ou periódicas vinculadas a manutenções preventivas completas (MPC) ou incompletas (MPI). Segundo esses autores, a MPI retorna uma confiabilidade do ativo até um certo nível; enquanto, a MPC retorna uma confiabilidade até o limite máximo. Os modelos mostraram que planos com diferentes tipos de manutenção preventivas superaram aquelas com apenas um tipo, em termos de redução de atrasos. Sendo realizada mais manutenções preventivas incompletas conforme há um aumento da confiabilidade do ativo e da qualidade da intervenção. Conseqüentemente, a disponibilidade do equipamento aumenta uma vez que o tempo de inatividade esperado diminui com o limite de confiabilidade mais alto Chen *et al.* (2020).

Os resultados encontrados por Chen *et al.* (2020) e Zhou *et al.* (2021) forneceram, ao nível de gerência, *insights* sobre diferentes tipos de Manutenções Preventivas e os benefícios que estes trazem, além de ser útil para os tomadores de decisão determinarem estratégias apropriadas de programação e manutenção em diferentes cenários. Essas mesmas conclusões podem ser extendidas para o cenário deste estudo, tendo a empresa uma equipe especializada em manutenção de bombas e Engenharia dedicada a esses ativos.

Calvacante *et al.* (2021) abordaram o estudo da política de planejamento de inspeção vinculada à manutenção preventiva e corretiva e o impacto desta na confiabilidade e disponibilidade do ativo, bem como, no custo operacional e de recursos. Os autores evidenciaram que a política mais eficiente está vinculada à realidade em que a atenção imediata às falhas (manutenção corretiva) e mesmo às ações definidas para evitar falhas (manutenção preventiva/preditiva) são condicionadas pelas necessidades da operação e/ou logística. Atentam, ainda à necessidade de estudo prévio quanto à quantidade ideal de inspeções e de fatores como o nível de expertise da equipe de manutenção e disponibilidade de recursos. Esta política também é observada a partir do histórico de atividades neste estudo, tendo atividades vinculadas à inspeções e melhorias de performance do equipamento.

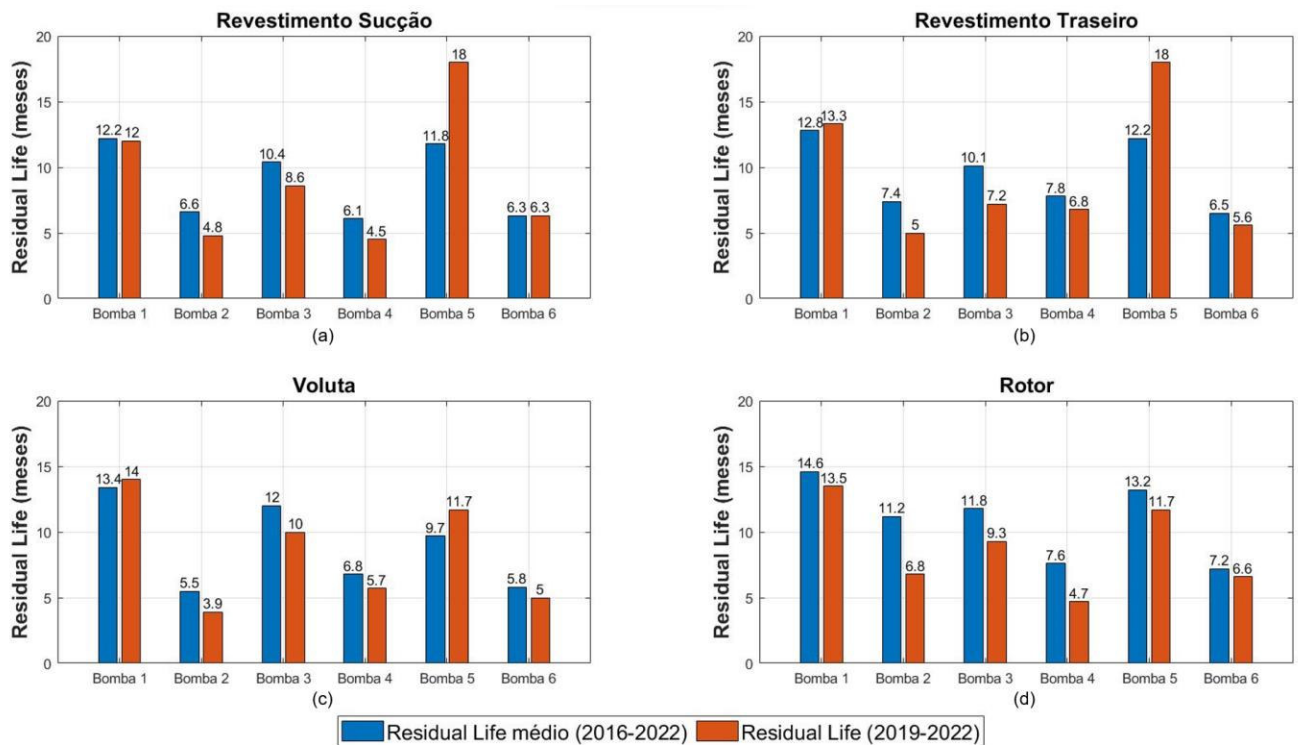
Portanto, a análise do consumo de peças apresentado na seção seguinte complementarará o entendimento dos impactos das mudanças da Engenharia e atuações da manutenção dentro do sistema de armazenamento de bauxita.

#### 6.1.1 Análise de consumo de peças

Na análise de consumo de peças foi estudado o *Residual Life* do conjunto de bombeamento das bombas: revestimento de sucção, revestimento traseiro, voluta e rotor. A escolha desses quatro componentes se dá pela criticidade e alto consumo dentro do sistema.

Na Figura 14, pode-se verificar o *Residual Life* dos quatro componentes por Bomba, sendo analisado o *Residual Life médio* referente a todo o intervalo de análise e o *Residual Life* dos últimos três anos. Este último destacado por ser o cenário mais atual e que sofre as principais alterações de planos de manutenção.

Figura 14 – Residual Life médio e dos últimos três anos do conjunto de bombeamento das bombas: a) revestimento de sucção, b) revestimento traseiro, c) voluta e d) rotor.



Fonte: Autores (2022).

Da Figura 14 observa-se um maior tempo de vida dos componentes das bombas ímpares, uma vez que estas sofreram menos desgaste no sistema, ao passo que o tempo de vida dos componentes das bombas pares apresentaram valores em média 50% inferiores, ou seja, as peças nas bombas pares possuem metade da vida útil das mesmas peças nas bombas ímpares. Dentre as peças analisadas, na Figura 14, as que apresentaram um menor tempo de vida útil foram a voluta e rotor, com 3,9 meses e 4,7 meses, respectivamente. Estes componentes sempre sofrem os maiores desgastes e são objetos diretos de diversas pesquisas, por exemplo, Walker (2000), Veselin (2010), Tarodiya (2017) e Peng *et al.* (2021).

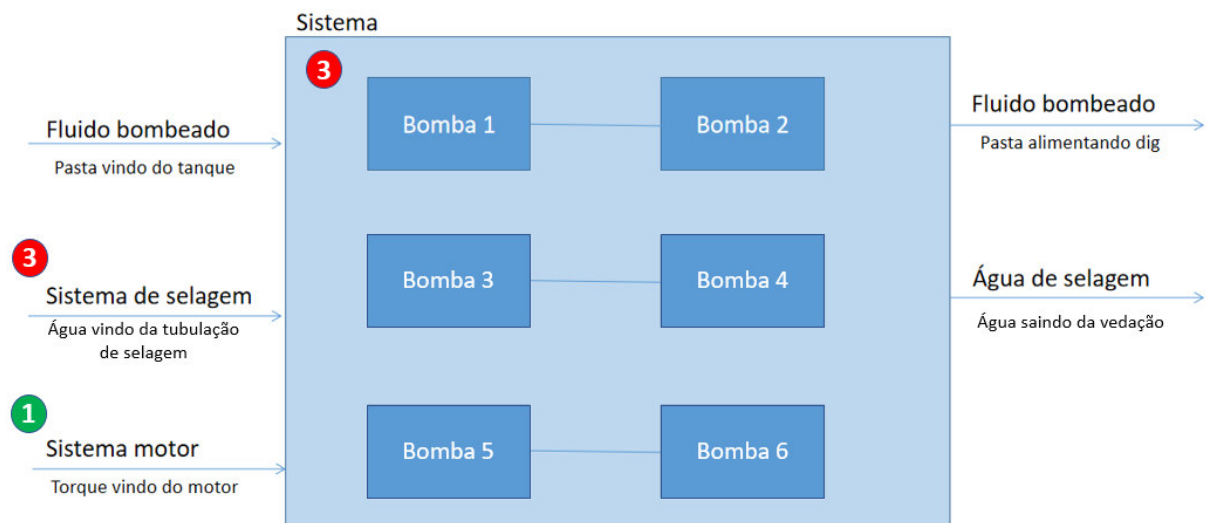
Quanto à comparação do *residual life* atual com o histórico médio, percebeu-se que de maneira geral houve uma pequena diminuição, podendo ser atrelada ao maior número de intervenções mecânicas anuais e também ao aumento de fluxo (PENG *et al.*, 2021). Um fator determinante que direciona a uma melhoria no gerenciamento desses ativos e que foi verificado na Figura 13, foi o aumento das atividades preventivas ao longo dos últimos três anos (2020-2022). Esse fato pode garantir um aumento da confiabilidade dos ativos e uma redução de perdas de

produção por eventos de quebras ou falhas inesperadas (ZHOU *et al.*, 2021).

## 6.2 Análise de investigação de falhas

Do histórico coletado, as investigações registradas referentes à grandes perdas de produção são destacadas na Figura 15 ao lado dos sistemas onde a causa raiz se encontrava.

Figura 15 – **Esquema simplificado do sistema com suas fronteiras e interfaces com outros sistemas abertos e fechados.**



Fonte: Autor (2022).

Nos últimos anos, as causas de falhas foram mais frequentes nas bombas propriamente ditas, em específico nos mancais a partir do travamento deste por superaquecimento, o qual foi apontado nas investigações feitas pela empresa como uma causa da contaminação pelo material bombeado ou excesso de vibração; e no sistema de selagem, seja por obstrução do sistema, perda de pressão ou contaminação das gaxetas. Outros eventos, como queima de motor e desgaste excessivo de válvulas de retenção devido a sua vida útil também foram causas evidentes para indisponibilidade ou quebra de peças nas bombas do sistema. A Tabela 11 apresenta um resumo das investigações levantadas.

Tabela 11 – **Resumo de falhas, causas raízes e status das ações resultadas das investigações realizadas pela empresa quanto aos eventos.**

Nº	Falha	Causa da Falha	Ações concluídas (%)
1	Travamento do mancal	Contaminação do mancal	100%
2	Vazamento de gaxeta	Queda de pressão de selagem	100%
3	Vazamento de gaxeta	Deslocamento do anel restritor	100%
4	Quebra no anel de alívio	Válvula de retenção danificada	100%
5	Travamento do mancal	Deficiência de lubrificação	95%
6	Queima do motor	Contaminação de material	90%
7	Vazamento de gaxeta	Obstrução do canal de selagem	100%

Fonte: Autor (2022)

As ações em sua maioria foram realizadas, estando algumas em desenvolvimento atualmente.

### 6.3 Levantamento dos modos de falhas para bombas centrífugas de polpa

Com o sistema, limites de controle, dados e históricos já bem definidos anteriormente, esta fase é basicamente a construção do FMECA. Segundo Piechnicki *et al.* (2017), o conhecimento tácito de especialistas em manutenção é usado na lista de funções do sistema, falhas funcionais, modos de falha e análises de causas e efeitos. Neste ponto, o histórico de falhas, os FMEA's já desenvolvidos, as informações fornecidas pelo fabricante foram as principais bases utilizadas para construção dessa lista de funções e peças críticas, que servirão futuramente para a construção dos modos de falhas.

Quantitativamente, Yavuz *et al.* (2019) relataram que o conhecimento explícito, como taxas de falha, é usado nessa parte da análise, utilizando o RPN. Para apoiar os processos de mineração de dados e decisões, sistemas de identificação (ID) de eventos e ações devem ser estabelecidos para cada modo de falha, a fim de melhorar os planos de manutenção (PIECHNICKI *et al.*, 2017).



## 6.4 FMECA

No FMECA desenvolvido tem-se o sistema, o subsistema e o foco nos componentes críticos que são aqueles que geram em suas falhas: chance de perda de produção, risco à segurança e ao meio ambiente; não possuem backup; influenciam na qualidade do produto dentro da ótica da experiência com o equipamento nas condições de trabalho do sistema em estudo na empresa. A visualização completa do FMECA pode ser realizada no Anexo B.

Para exemplificar essa etapa do processo de manutenção, tem-se agora na Figura 16 a representação do componente generalizado parafuso da base e as causas para o modo de falha do mesmo.

**Figura 16 – FMECA referente ao componente parafuso da base.**

Universidade Federal do Maranhão – UFMA			Curso de Engenharia Mecânica					Revisão 01		
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
Rotor	Fornecimento insuficiente de energia cinética	Queda do rendimento e da potência da máquina	Desgaste por cavitação	Barulho semelhante a de cascalhos vindos do equipamento. Componentes com aspecto esponjoso.	8	8	2	128	Trabalhar sempre com o NPSH disponível acima do requerido.	Sempre
			Corrosão-erosão	Ranuras e ondulações na superfície da peça, com contornos característicos de um escoamento	8	8	3	192	Escorvar corretamente a linha de sucção antes da partida da bomba. Trabalhar a velocidades de rotação moderadas.	Sempre
		Baixo rendimento da bomba	Desgaste por recirculação	Vibração. Bomba operando a baixa vazão	8	8	3	192	Realizar o ajuste de rotor para evitar excesso de recirculação na bomba	Mensal
		Bomba não recalca	Obstrução do rotor	Inspeção visual do rotor	7	8	1	56	Utilização de peneiras ou <u>Scale Muncher</u>	Sempre

Fonte: Autor (2022).

Nas últimas colunas são apresentadas as ações de prevenção e a frequência de execução. Segundo Siqueira (2005), a seleção das tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas, se utilizam de um processo para determinar uma melhor maneira de efetuá-las e prevenir ou corrigir as falhas. Para a seleção das tarefas aplicáveis, não é só avaliada a viabilidade técnica, mas também a praticidade das atividades propostas. Os critérios para a aplicabilidade dessas tarefas são apresentados na Tabela 12:

Tabela 12 – **Critérios para aplicabilidade das tarefas para prevenir e corrigir as falhas.**

4.5.1.1	Prevenir os modos de falha;
4.5.1.2	Reduzir a taxa de deterioração
4.5.1.3	Detectar a evolução da falha;
4.5.1.4	Descobrir falhas ocultas;
4.5.1.5	Suprir a necessidade e consumíveis do processo;
4.5.1.6	Reparar o item após a falha.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

Ainda segundo Siqueira (2005), as ações ou tarefas efetivas terão critérios para efetividade, que são relacionadas na Tabela 13,

Tabela 13 – **Critérios para efetividade de tarefas para prevenir e corrigir falhas.**

1. Ser aplicável tecnicamente;
2. Ser viável com os recursos disponíveis;
3. Produzir os resultados esperados;
4. Ser executável a um intervalo razoável.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005).

Assim, esses critérios levam a uma lista de atividades de manutenção, as quais são apresentadas no Tabela 14 e que devem ser selecionadas (SIQUEIRA, 2005):

Tabela 14 – **Lista de atividades de manutenção para prevenir e corrigir as falhas.**

<b>1. Serviço operacional:</b> atividade simples e repetitiva feita pelo operador;
<b>2. Inspeção preditiva:</b> atividade programada para detecção de falhas potenciais;
<b>3. Restauração preventiva:</b> reverter danos decorrentes do tempo preventivamente (manutenção por especialista);
<b>4. Substituição preventiva:</b> tarefa programada de descarte e substituição do item/componente;
<b>5. Inspeção funcional:</b> análise dimensional ou funcional de itens/componentes para continuar a ter as funções destes dentro do especificados;
<b>6. Manutenção combinada:</b> tarefa aplicada quando nenhuma ação de manutenção anterior é mais viável, isoladamente, identificar e/ou corrigir

a falha;
<b>7. Mudança de projeto:</b> introdução de novas modificações ou adaptações que não estavam previstas no projeto inicial;
<b>8. Reparo funcional:</b> Operar ativo até a falha e então substituí-lo.

Fonte: Adaptado de Rigoni (2009).

Atualmente, algumas ações como inspeções, manutenções preventivas e atividades operacionais já são realizadas pela empresa. Um outro fator importante que aumenta a confiabilidade do sistema é a redundância existente no mesmo (SIQUEIRA, 2005). Esta redundância é representada pela bancada que possui a flexibilidade de alimentar ambas as digestões, servindo assim de reserva para as outras duas bancadas.

A análise completa resultou na identificação de 16 (dezesesseis) modos de falhas, sendo geradas 53 (cinquenta e três) atividades de prevenção. Em seguida, comparou-se com a lista de planos de manutenção ativos na empresa, totalizando 18 (dezoito) planos. Algumas inspeções e manutenções preventivas englobaram mais de uma ação sugerida no FMECA. Para aquelas ações não satisfeitas, ficaram como sugestões para implementações futuras.

Das análises já realizadas nas seções anteriores quanto ao histórico de atividades, pode-se observar a eficácia desses planos de manutenção ativos, principalmente nos últimos três anos, cujo cenário é o mais crítico dentro do intervalo analisado. As ações apresentadas no FMECA vêm com o objetivo de aprimorar essas ações já tomadas.

#### 6.4.1 Propostas de ações e acompanhamento

A partir do FMECA, pode-se comparar as ações sugeridas com as características dos planos existentes para esses ativos. A primeira diferença percebida foi que os planos existentes estão focados no estado do equipamento, com o objetivo de mantê-lo em funcionamento. Pela MCC, segundo Siqueira (2005) o foco da manutenção deve ser a preservação da(s) função(ões) com o objetivo de preservá-la(s). Outra diferença é a falta de uma análise estatística para o reconhecimento dos mecanismos de falhas, bem como, a definição da periodicidade das tarefas, sendo definido a partir do histórico de outros equipamentos.

Porfim, por meio da MCC, verificou-se a importância de atividades não periódicas preventivas, com o objetivo de eliminar modos de falhas, além da facilidade de adaptação de planos existentes.

Para o acompanhamento das ações geradas, principalmente, de investigações, um *dashboard* foi criado, bem como um fluxo automático de lembrete via e-mail para sinalizar os prazos de conclusão. Desse modo, o setor de Engenharia consegue facilmente administrar as ações criadas e executá-las.

## 7 CONCLUSÃO

Esse estudo aplicou uma metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) para bombas de polpa dentro de um sistema crítico no armazenamento e distribuição de bauxita em uma refinaria produtora de alumina, situada na capital maranhense. Além disso, foi realizado uma análise completa do histórico de atividades de manutenção desses ativos e estudado o impacto de ações da gestão de manutenção na confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade desses equipamentos.

A revisão bibliográfica abordou o conceito da MCC a partir dos principais autores brasileiros e internacionais sobre o tema e de pesquisas na área de Confiabilidade e Manutenção, sintetizando os conceitos de cada obra e autor. Quanto à implantação da MCC, a revisão bibliográfica identificou as etapas essenciais que garantirão os objetivos propostos pela Metodologia MCC, podendo ser consultada em futuras aplicações da metodologia.

A dificuldade enfrentada por este estudo, foi a falta de informação nos registros de manutenção da empresa supramencionada, bem como, um padrão bem definido desses registros, dificultando o entendimento do histórico das manutenções e afetando as análises realizadas com esses dados, sendo ainda muito dependente da memória de colaboradores mais antigos na empresa, para confirmar e complementar as informações disponibilizadas.

A aplicação da Metodologia MCC e o estudo do histórico de manutenção e consumo de peças com foco no *Residual Life* de bombas centrífugas de polpa trouxe conhecimento e desenvolvimento técnico voltado à área de engenharia e gestão de manutenção de ativos, através de uma atuação efetiva dos seus conceitos dentro de uma situação real encontrada em uma refinaria. Dessa forma, foi possível chegar ao final desse trabalho com uma documentação completa e implementável de melhorias para planos de manutenção e seu acompanhamento e evolução.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É deixado como sugestão para trabalhos futuros a:

- 1) Aplicação dos indicadores aqui definidos para monitoramento dos planos de manutenção e das ações da Engenharia quanto a melhorias e aumento de confiabilidade;
- 2) Implementação dos resultados encontrados como novas ações para os planos de manutenção;
- 3) Realizar a coleta de dados para ver o impacto que o foco voltado à preservação da função ao invés do estado do equipamento pode ter nesse sistema.
- 4) Verificar impacto nas curvas de operação das bombas (vazão volumétrica, tempo de funcionamento, rotação e consumo de energia);

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- ABULNAGA, B. P.E. Slurry Systems Handbook, Second Edition (McGraw Hill: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2021).  
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260452792>
- ANTOMARIONI, S., BEVILACQUA, M., POTENA, D. and DIAMANTINI, C. Defining a data-driven maintenance policy: an application to an oil refinery plant, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 36 No. 1, pp. 77-97. 2019. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2018-0012>
- ALTAF, T. M. Study Reliability Centered Maintenance of Rotating Equipment Through Predictive Maintenance. International Journal of Industrial Engineering Research and Development (IJIERD) Volume 5 Issue 1. ISSN : 0976-6987. Pakistan. 2014.
- BAGSHAW, T. Bauxite to Alumina: The Bayer process. Perth, Austrália: [s.n.], 2017.
- BATALOVIC, V., Erosive wear model of slurry pump impeller, J. Tribol. 132. 2010, <https://doi.org/10.1115/1.4001167>
- CAVALCANTE, C. A. V., LOPES, R. S., SCARF, P. A. Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule. Reliability Engineering & System Safety, 208, 107402. 2021. doi:10.1016/j.ress.2020.107402.1016/j.ress.2020.107402
- CARPINETTI, L. C. R. Gestão da qualidade: conceitos e técnicas. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- CHEN, L., WANG, J., YANG, W. A single machine scheduling problem with machine availability constraints and preventive maintenance, International Journal of Production Research. 2020. DOI: 10.1080/00207543.2020.1737336
- EN 13306:2017. Maintenance - Maintenance Terminology. European Standard. 2017.
- Encyclopædia Britannica (EB). Aluminum processing: Bayer process - Principal operations in the Bayer process of refining bauxite to alumina. Acesso em: <https://www.britannica.com/technology/Bayer-process>
- Ebrahimi A. Effect analysis of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS ) parameters in design and operation of dynamic positioning (DP) systems in floating offshore structures. MSc Thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH); 2010.
- FOGLIATTO, F. S. Confiabilidade e manutenção industrial. [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011. CDD: 620.00452. CDU: 62-7.
- GUPTA, G.; MISHRA, R. Identification of Critical Components Using ANP for Implementation of Reliability Centered Maintenance. Procedia CIRP 2018, 69, 905–909. 2018.
- HUDSON, L. K. et al, Aluminum Oxide. Aluminum Company of America, Alcoa Center, Pensilvânia, EUA, 2005.
- JOCANOVIC, M. ANDRIC, S. LAZAREVIC, M. LUKIE, D. Example of Good Maintenance Practice for Maintaining the Health of a Hydraulic System. Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering. Springer. cap. 36 , p. 379-387. 2022

KAZAZ, B.; SLOAN, T.W. The impact of process deterioration on production and maintenance policies. *European Journal of Operational Research*. 227, 88–100. 2013

KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção: Função estratégica*. : Qualitymark Editora, 2009.

KARDEC, Alan; LAFRAIA, João R. *Gestão Estratégica e Confiabilidade*. Rio de Janeiro: Abraman, 2002

LAFRAIA, João R. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2001.

LEVERETTE, J. C. An Introduction to the US Naval Air System Command RCM Process and Integrated Reliability Centered Maintenance Software. In: *RCM 2006 - The Reliability Centred Maintenance Managers' Forum*. 2006. Anais...: p. 22-29.

MACINTYRE, A. J. *Bombas e Instalações de Bombeamento*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

Ministry of Defence (MoD). UK. *Reliability and maintainability assurance guide Part 3: R & M case*. 2016. p. 38. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/10146255/def-stan-00-42-part-3>.

MOUBRAY, J. (2000). *Manutenção Centrada em Confiabilidade*. 2ª Edição, Aladon Ltda.

NASA. *Nasa Reliability-Centered Maintenance Guide*. National Aeronautics and Space Administration. USA, 2008.

Naval Surface Warfare Center (NSWC). *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment*. West Bethesda, Maryland, USA: Logistic Technology Support Group; 2011. Disponível em: [http://everyspec.com/USN/NSWC/NSWC-11\\_RELIABILITY\\_HDBK\\_MAY2011\\_55322/](http://everyspec.com/USN/NSWC/NSWC-11_RELIABILITY_HDBK_MAY2011_55322/).

NOON, A.A.; JABBAR, A.U.; KOTEN, H.; KIM, M.-H.; AHMED, H.W.; MUEED, U.; SHOUKAT, A.A.; Anwar, B. Strive to Reduce Slurry Erosion and Cavitation in Pumps through Flow Modifications, Design Optimization and Some Other Techniques: Long Term Impact on Process Industry. *Materials*. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14030521>.

Norma Brasileira ISO 55000:2014. *Gestão de ativos: Visão geral, princípios e terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 23p. 2014

OLIVEIRA, M. A. *Sistema de gestão da manutenção baseada no grau de maturidade da organização no âmbito da manutenção*. Tese de doutorado de Engenharia Industrial de Processos. Universidade do Minho: Escola de Engenharia. Braga. Portugal. 2017.

O Sucateiro. *Bombas Centrífuga de Polpa - WEIR*. 2022. Disponível em: <https://osucateiro.com/produto/bombas-centrifuga-de-polpa-weir>.

PATEL, M., KUMAR, A., PARDHI, B., PAL, M. Abrasive, Erosive and Corrosive Wear in Slurry Pumps – A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. e-ISSN: 2395-0056. 2020.

PETROVIC, D.; TANASIJEVIĆ, M.L.; STOJADINOVIĆ, S.; IVAZ, J.; STOJKOVIĆ, P. Fuzzy Model for Risk Assessment of Machinery Failures. *Symmetry* 2020, 12, 525.

Peng, G., Chen, Q., Bai, L., Hu, Z., Zhou, L., & Huang, X. Wear mechanism investigation in a centrifugal slurry pump impeller by numerical simulation and experiments. *Engineering Failure Analysis*, 128, 105637. 2021



doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105637

Peng, G., Fan, F., Zhou, L., Huang, X., & Ma, J. Optimal Hydraulic Design to Minimize Erosive Wear in a Centrifugal Slurry Pump Impeller. *Engineering Failure Analysis*, 105105. 2020. doi:10.1016/j.engfailanal.2020.105105

PINTO, F. R. P. APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA MITIGAÇÃO DE FALHAS CRÔNICAS EM UM SISTEMA DE GARRAS PNEUMÁTICAS DE UMA LINHA DE ESTAMPARIA AUTOMOTIVA. 2012. Tese (Monografia de especialização em Engenharia de Confiabilidade à Manutenção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2012.

PIECHNICKI, F.; LOURES, E.; SANTOS, E. A Conceptual Framework of Knowledge Conciliation to Decision Making Support in RCM Deployment. *Procedia Manuf.* 2017, 11, 1135–1144. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.235>

Pokharel N, Ghimire A, Thapa B S; Thapa B. Opportunity for research and manufacturing of pump in Nepal. *J. Phys. Conf. Ser.* 1608. 2020.

POOR, P. Ženíšek, D., BASL, J. Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Pilsen, Czech Republic.* 2019.

RIGONI, Emerson. Metodologia da implantação da Manutenção Centrada na Confiabilidade: uma abordagem fundamentada em Sistema Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy. Florianópolis, 2009. 342p.

RAI, S., WASEWAR, K. L., AGNIHOTRI, A. Treatment of alumina refinery waste (red mud) through neutralization techniques: A review. *Waste Management & Research.* 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X1769>

SHAHEEN, A.; IBRAHIM, A.; OTAIBI, A.; SWASH, P. The Role of the Alumina Refinery Laboratory: Monitoring, Optimisation and Control of the Bayer Process. 38th International ICSOBA Conference. Trauvax. Virtual Conference. 2020.

SAE, SAE JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Process, vol. 4970. United States of America, 2009.

SAE, SAE JA1012 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Process, vol. 4970. United States of America, 2013.

SOUZA, R. D. ANÁLISE DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO FOCANDO A MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE: ESTUDO DE CASO MRS LOGÍSTICA. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora - MG. 54p. 2008.

SIQUEIRA, I. P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de implementação.* Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 1ª edição, 408p. 2005.

Tarodiya, R., e Gandhi, B. K. (2017). Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps - A review. *Powder Technology*, 305, 27–38. doi:10.1016/j.powtec.2016.09.048

TELES, J. Tipos de manutenção de acordo com a NBR 5462. Brasília: ENGETELES Site, 2018. Disponível em < <https://engeteles.com.br/tipos-de-manutencao/> > Acesso em 17/05/2022.

Uddin SZ, Murr LE, Terrazas CA, Morton P, Roberson DA, Wicker RB (2018) Processing and characterization of crack-free aluminum 6061 using high-temperature heating in laser powder

bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 22: 405–415

VESELIN, B. Erosion wear model of slurry pump impeller, *J. Tribol.* 132 (4) (2010) 1–5.

WANG, Y.; LIU, Y.; CHEN, J.; Li, X. Reliability and condition-based maintenance modeling for systems operating under performance-based contracting. *Comput. Ind. Eng.* 2020, 142, 106344.

Walker, C. I., & Bodkin, G. C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps. *Wear*, 242(1-2), 140–146. 2000. doi:10.1016/s0043-1648(00)00413-0

Walker, C. I. Slurry pump wear life uncertainty analysis. *Proc. Of Hydrotransport 14 BHR Fluid Eng.*, Maastricht, Holland, 1999.

Weir Slurry Group Inc. Horizontal Slurry Pumps. Weir Minerals. 2014.

XAVIER, F. J. C. Manutenção como atividade de gestão e estratégia: um estudo na empresa alfa do polo industrial de Manaus. Dissertação (Mestrado) – UFP, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2015. CDD 23. ed. 621.7.

XENOS, Harilaus G. Gerenciando a Manutenção Produtiva, EGD Editora 2004

YAVUZ, O.; DOGAN, E.; CARUS, E.; GORGULU, A. Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship (WOCTINE). 2019

Zhao, B.; Chen, H.; Gao, D.; Xu, L. Risk assessment of refinery unit maintenance based on fuzzy second generation curvelet neural network. *Alex. Eng. J.*,59, 1823–1831. 2020

ZAREI, S.; GHAEDI-KAJUEI, P. Evaluation of Various Maintenance Strategies for Reliability Assessment of Thermal Power Plants. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Vol. 7, No. 3. 2017. DOI: 10.11591/ijeecs.v7.i3.pp617-624

ZHOU, H. TSAI, Y. C., HUANG, S., CHEN, Y. CHOU, F. D. Single-Machine Scheduling with Fixed Periodic Preventive Maintenance to Minimise the Total Weighted Completion Times. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* Volume 2021, Article ID 8891322, 15 pages <https://doi.org/10.1155/2021/8891322>

**Anexo A - Pontuação quanto à aderência dos indicadores das variáveis dentro do histórico de atividades de manutenção.**

<b>Variáveis</b>		<b>Indicadores</b>	<b>Pontuação</b>	<b>Justificativa</b>
Plano de manutenção	I1	Cadastro dos equipamentos	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alguns ativos com modelo da bomba desatualizado;</li> <li>• Descrição do ativo não padronizado;</li> <li>• Ausência de detalhes técnicos na descrição do ativo;</li> </ul>
	I2	Ordens de serviço	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de padronização na descrição das atividades;</li> <li>• Ordens duplicadas;</li> <li>• Ordens sem inclusão de materiais;</li> <li>• Ordens com descrição divergente da atividade;</li> <li>• Ausência de detalhamento da atividade na ordem;</li> </ul>
	I3	Padrões de Manutenção	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema possui para planos de manutenção construção automática de datas;</li> <li>• Necessidade de realização de atividades de acompanhamento dentro do intervalo entre PMs;</li> </ul>

				<ul style="list-style-type: none"> <li>Ferramentas do sistema ainda não completamente exploradas ou desenvolvidas;</li> </ul>
	I4	Retrabalhos	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atividades de manutenção realizadas entre PM programadas;</li> </ul>
Engenharia de Manutenção	I5	Redução de Custos	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realização de teste de novos fornecedores para componentes com valores de aquisição mais baixos;</li> <li>Aplicação de planos de manutenção com o intuito de redução de custos em manutenção;</li> </ul>
	I6	Aumento do <i>Residual Life</i>	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicação de planos de manutenção com o intuito de aumento do <i>Residual Life</i>;</li> <li>Melhoria de sistemas já existentes, como o de selagem, para melhor atender a necessidade dos ativos;</li> </ul>

## Anexo B – Análise de Modos de Falhas e Efeitos

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica								
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Revisão 01										
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
Rotor		Queda do rendimento e da potência da máquina	Desgaste por cavitação	Barulho semelhante a de cascalhos vindos do equipamento. Componentes com aspecto esponjoso.	8	8	2	128	Trabalhar sempre com o NPSH disponível acima do requerido.	Sempre
	Fornecimento insuficiente de energia cinética		Corrosão-erosão	Ranhas e ondulações na superfície da peça, com contornos característicos de um escoamento	8	8	3	192	Escorvar corretamente a linha de sucção antes da partida da bomba. Trabalhar a velocidades de rotação moderadas.	Sempre
		Baixo rendimento da bomba	Desgaste por recirculação	Vibração. Bomba operando a baixa vazão	8	8	3	192	Realizar o ajuste de rotor para evitar excesso de recirculação na bomba	Mensal
Peneira		Bomba não recalca	Obstrução do rotor	Inspeção visual do rotor	7	8	1	56	Utilização de peneiras ou Scale Muncher	Sempre
	Não filtrar corretamente o scale	Gerar cavitação na entrada da bomba	Obstrução da peneira	malha obstruída	8	6	2	96	Realizar limpeza	Operacional

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica								
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Revisão 01										
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Deteção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
		Obstruir rotor da bomba	Tamanho de malha superior a necessária	material obstruindo componentes da bomba	6	6	2	72	Realizar alteração de malha	Toda vez que houve mudança no tamanho do particulado do fluido
Eixo	Não transmitir rotação	Fluido não é recalçado	Fratura do eixo por fadiga	Bomba para de funcionar: inspeção visual	9	4	1	36	Não operar bomba sob condições de cavitação, recirculação ou outros meios de vibração. Em paradas de manutenção, observar sinais de corrosão.	Segundo PM e operacional
			Fratura em rasgo de chaveta						Inspeccionar componentes e evitar folgas na conexão com a chaveta ou limite de escoamento/esmagamento	Semestral
Tampa da caixa de mancal	Não veda a caixa de mancal	Vazamento de lubrificante e/ou contaminação pelo fluido de trabalho	Assentamento ineficaz da junta devido a irregularidades da superfície da tampa, presença de partículas estranhas ou montagem errada.	Vazamento do lubrificante pela caixa de mancal ou superaquecimento dos rolamentos devido a falta de lubrificante	8	6	1	48	Na montagem verificar estado da superfície de assentamento da junta, a qual deve estar regular e livre de impurezas	Por demanda

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica								
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
Labirinto do mancal	Não veda entrada do mancal	Contaminação dos rolamentos	Deficiência da peça	Superaquecimento dos rolamentos	8	6	1	48	Verificar melhor marca e modelo de labirinto para as características de trabalho dos mancais	Por demanda
			Montagem incorreta		8	6	1	48	Em manutenções do mancal, verificar estado da peça e a sua montagem correta. Realizar treinamento com pessoas envolvidas na manutenção e montagem do mancal	Por demanda

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica								
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S O D	RPN	Prevenção	Frequência		
Mancais de rolamento	Suporte inadequado ao eixo devido à redução da vida útil	Danos no eixo e em outros componentes da bomba. A bomba fica inoperável; não há recalque do fluido.	Fratura por fadiga do mancal devido à montagem incorreta	Bomba para de funcionar; inspeção visual.	8	8	1	64	Realizar montagem em ambiente controlado de impurezas evitando contaminação do lubrificante. Evitar impactos e forças excessivas nos rolamentos. Executar treinamento com equipe.	Por oportunidade
			Fratura por fadiga do mancal devido ao desalinhamento.		8	8	1	64	Aferir excentricidade entre os mancais, a perpendicularidade entre os mancais e o eixo e verificar se o eixo está empenado.	Por oportunidade
	Vibração excessiva		Desgaste do rolamento por deficiência de lubrificação	Vibração excessiva. Ruído característico. Alta temperatura no local dos rolamentos (podendo emitir fumaça)	8	8	1	64	Seguir as orientações de lubrificação e do tipo/marca segundo fabricante	Semanal
			Desgaste do rolamento por excesso de lubrificante		8	8	1	64		



Curso de Engenharia Mecânica										
Universidade Federal do Maranhão – UFMA					Revisão 01					
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
			Deformação dos rolamentos através do içamento da bomba pelo eixo.	Observação do manuseio inadequado da bomba: inspeção dos rolamentos	8	8	3	192	Treinamento das pessoas envolvidas no manuseio da bomba	Anual
Voluta	Ineficiência da transformação de energia	Redução na pressão entregue ao fluido com consequente queda do rendimento da bomba	Corrosão-erosão	Inspeção visual da voluta. A superfície adquire aparência rugosa, tendo sulcos nos pontos de maior pressão (próximo ao pescoço da voluta)	8	8	2	128	Realizar inspeções periódicas de acompanhamento e ajuste do rotor para redução de recirculações. Realizar reparo quando possível	Semestral
Carcaça	Ineficiência na vedação do corpo da bomba	Vazamento de material pela carcaça	Trinca	Inspeção visual. Inspeção por líquido penetrante	8	5	2	80	Realizar inspeção antes da montagem. Realizar reparo quando possível.	Por oportunidade
Parafusos da base	Os parafusos da base não transferem adequadamente a carga	Vibração excessiva	Corrosão-erosão	Inspeção visual	8	8	2	128	Realizar inspeção visual. Realizar reparo quando possível	Por oportunidade
			Folga dos parafusos da base	Vibração excessiva da bomba	10	6	2	120	Utilizar torquímetro ou outras ferramentas para controle do torque. Realizar inspeção da fixação dos parafusos	Por demanda

Curso de Engenharia Mecânica										
Universidade Federal do Maranhão – UFMA					Revisão 01					
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
			Falha por fadiga		10	6	2	120	Lubrificar e utilizar torquímetros. Ter cuidado na reutilização de parafusos	Por demanda
Porca do parafuso da base	Não promove fixação eficaz da bomba à base	Vibração excessiva	Desgaste da porca do parafuso	Vibração excessiva da bomba	10	6	2	120	Em paradas para manutenção, não permutar as porcas entre os parafusos prisioneiros, mas manter cada porca ao seu parafuso inicial. Caso contrário pode haver acentuação de desgaste. A utilização de arruelas de pressão pode dificultar o relaxamento das porcas. Observar as condições das porcas a cada parada de manutenção.	Por oportunidade
Linha de sucção e ou descarga	Parada do bombeamento	Perda do tanque com possível perda de produção	Obstrução das linhas de descarga ou sucção	Queda da performance da bomba. Cavitação	8	8	3	192	Lavagem cáustica das linhas de sucção e descarga	Semestral

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica						
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022						
Revisão 01								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Deteção	S O D	RPN	Prevenção	Frequência
							Preventiva válv. da sucção das bombas.	Anual
Válvulas descargas/sucção			Válvulas descargas/sucção travada fechada	Cavitação na bomba	9 3 1	27	Lubrific. válvulas da descargas das bombas.	Mensal
Correias			Quebra das correias	Inspeção visual	8 6 1	48	Inspeccionar abertura das válvulas	Operacional
							Verificar tensionamento das correias	Semestral
							Verificar desgaste e trincas	Semestral
Rolamentos bomba/motor			Quebra/travamento rolamentos da bomba/motor fim vida útil	Superaquecimento dos rolamentos	9 7 1	63	Lubrificar bomba\motor	Mensal

Curso de Engenharia Mecânica										
Universidade Federal do Maranhão – UFMA					Revisão 01					
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Deteção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
									Monitoramento preditivo: Vibração Ruído Visual	Mensal
									Preventiva bomba	Anual
Motor			Motor parado	Inspeção	10	4	1	40	Verificação da configuração do Relé E3Plus	Semanal
									Verificar isolamento do motor	Semanal
									Checar mancais	Semanal
Válvulas de retenção			Fluxo baixo de material	Rendimento da bomba	9	8	2	144	Checar válv. de controle de fluxo da linhas.	Semanal
									Verificar se há semi-obstrução das linhas. Efetuar lavagem cáustica.	Operacional
Variador de Frequência			Falha VF (Variador de Frequência)	Bomba não liga ou variador de frequência não consegue contrar rotação	10	6	1	60	Preventiva VF	Semestral
									Preditiva - termografia	Trimestral
Gaveta CCM			Falha Gaveta CCM	Inspeção	8	8	1	64	Preventiva gaveta CCM	Semestral

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica		Revisão 01				
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022						
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Deteção	S O D	RPN	Prevenção	Frequência
Sensor de temperatura da bomba (TSH)			TSH (Sensor Temp. carcaça da bomba) em falha	Inspeção	8 5 1	40	Calibração e Teste funcional do TSH	Anual
Correias	Baixo rendimento do bombeamento	Perda do tanque com possível perda de produção	Correias folgadas	Inspeção. Ruído. Redução da rotação da bomba	8 9 1	72	Verificar alinhamento das polias	Anual
							Tensionar ou trocar correias	Anual
Polias			Desgaste das polias	Inspeção	9 3 1	27	Inspeccionar polias	Anual
							Rotor desregulado (Rotor X Placa frontal)	Anual
Componentes de bombeamento			Desgaste interno	Inspeção	8 8 1	64	Preventiva bomba Warman.	Anual
							Monitoramento preventivo	Anual
Gaxeta	Vazamento excessivo pela gaxeta (p/ bombas 13, 14, 15, 16, 27 e 28)	Contaminação dos mancais / travamento da bomba	Falta de ajuste ou fim da vida útil da gaxeta	Inspeção	9 9 1	81	Inspeção e ajuste	Diário
							Inspeção	Diário
							Falta de água de selagem	Anual
							Eixo empenado	Mensal

Universidade Federal do Maranhão – UFMA		Curso de Engenharia Mecânica								
Elaborador por: Gabriel Silva		Data: 01/12/2022								
Componente/Função	Modo de Falha	Efeito de Falha	Causa de Falha	Detecção	S	O	D	RPN	Prevenção	Frequência
Anel Restritor	Não distribuir adequadamente o fluxo de água de selagem dentro da caixa de gaxetas	Desgaste prematuro das gaxetas e da luva do eixo	Obstrução dos orifícios do anel restritor	Vazamentos na caixa de gaxeta pode indicar falha no anel lanterna; inspeção visual.	7	7	1	49	Durante troca de gaxetas, substituir também o anel restritor caso esteja em más condições.	Por oportunidade
			Posicionamento incorreto do anel						Seguir instalação correta de gaxetas e anel	
Sobreposta	Relaxamento do aperto durante operação da bomba	Vazamento pela caixa de gaxetas e o sucessivo desgaste das gaxetas e da luva de eixo.	Relaxamento das porcas dos parafusos (da sobreposta) devido desgastes de pelo menos um desses dois componentes.	Vazamento de gaxeta	7	3	1	21	Realizar troca de peças. Utilizar contra-porcas	Por oportunidade
			Empenamento da sobreposta dificultando correto encaixa na entrada da caixa de gaxetas						Realizar troca de peça. Reparo quando possível	
Base da bomba	Não acomoda os componentes da bomba de maneira alinhada.	Tensões na carcaça e/ou desnivelamento da base	Distorções da base. Excesso de material encrustrado.	Inspeção visual	5	5	3	75	Identificar as distorções do pedestal e repará-lo. Realizar jateamento antes de acoplar bomba.	Por oportunidade