

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Matheus Henrique Panini

**Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de
gestão da manutenção para a melhoria da
disponibilidade e confiabilidade de sistemas e
equipamentos mecânicos em uma indústria química de
clorato de sódio e dióxido de cloro**

Ilha Solteira, SP
2026

Matheus Henrique Panini

**Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de
gestão da manutenção para a melhoria da
disponibilidade e confiabilidade de sistemas e
equipamentos mecânicos em uma indústria química de
clorato de sódio e dióxido de cloro**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Es-
tadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus
Ilha Solteira, como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

Ilha Solteira, SP
2026

P192e

Panini, Matheus Henrique

Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de gestão da manutenção para a melhoria da disponibilidade e confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro / Matheus Henrique

Panini. -- Ilha Solteira, 2026

116 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira

Orientadora: Márcio Antonio Bazani

1. Gestão da manutenção. 2. Disponibilidade de ativos. 3. Confiabilidade. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de gestão da manutenção para a melhoria da disponibilidade e confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro

Aluno: Matheus Henrique Panini R.A:182053857

Orientador: Dr Márcio Antonio Bazani

Aprovado (x) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 8,0

Comissão Examinadora:

Prof.Dr Márcio Antonio Bazani

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO ANTONIO BAZANI**
Data: 18/06/2026 15:34:37-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ass: _____

Presidente (Orientador)

Doutorando(a): Edimar Aparecido dos Santos Duran

Ass: _____
Documento assinado digitalmente
 **EDIMAR APARECIDO DOS SANTOS DURAN**
Data: 18/06/2026 14:47:48-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Doutorando(a): Letícia Karolayne Moreira Firmo .

Ass: _____
Documento assinado digitalmente
 **LETICIA KAROLAYNE MOREIRA FIRMO**
Data: 18/06/2026 14:54:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Ass: _____
Assinado digitalmente via ZapSign por
matheus henrique panini
Data: 16/06/2026 21:39:17,130 (UTC-0300)

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 15 de Junho de 2026

Dedico este trabalho aos meus pais, meus avós e a todos que auxiliaram no meu desenvolvimento durante este período na universidade.

Agradecimentos

Agradeço profundamente:

Aos meus pais, pela dedicação constante, pelo apoio incondicional e pelo amor que sempre me fortaleceu. São minha maior referência e base para cada conquista alcançada.

Aos meus avós, pelo carinho, pelo acolhimento e por tornarem possível minha permanência próxima à universidade durante essa etapa tão importante.

Aos meus amigos, pela parceria, pelos momentos de descontração, pela união diante dos desafios e por tornarem a trajetória acadêmica mais leve e marcante.

À equipe Fênix Racing, pelas vivências práticas, pelos desafios de engenharia e pelos aprendizados que ultrapassam a sala de aula, contribuindo de forma essencial para minha formação pessoal e profissional.

Aos docentes da Faculdade de Engenharia da UNESP de Ilha Solteira, pelos ensinamentos, pela orientação e por despertarem o pensamento crítico e a busca constante pelo conhecimento.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela qualidade da formação, pela estrutura oferecida e pelas oportunidades que possibilitaram meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À Nouryon Pulp, pela janela de oportunidade e implementação do processo, pela estrutura oferecida e pelas oportunidades que possibilitaram meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

A conquista do título de Engenheiro Mecânico representa o resultado de um esforço conjunto. Minha gratidão a todos que fizeram parte dessa jornada.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

Resumo

A intensificação da concorrência no setor químico demanda altos padrões de disponibilidade e confiabilidade dos ativos industriais. Em processos vitais como a fabricação de clorato de sódio e dióxido de cloro existem riscos operacionais, ambientais e de segurança. Nesse cenário, a gestão plena e eficaz da manutenção, tanto corretiva quanto preventiva, constitui uma estratégia fundamental para a continuidade e melhoria das operações e para o aumento da disponibilidade dos ativos. Este estudo visa avaliar a importância do uso de instrumentos de gestão da manutenção para melhorar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos em uma indústria química que produz clorato de sódio e dióxido de cloro, sendo ambos componentes importantes na produção de diversos produtos, com destaque para a celulose produzida a partir de eucalipto. Por meio de um estudo de caso, são analisados recursos e indicadores de desempenho, Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), análise de falhas, manutenção preventiva e preditiva, bem como a utilização de Sistemas Informatizados de Gestão da Manutenção (SIGM). Espera-se que os resultados demonstrem diminuição das paradas não programadas, aprimoramento no gerenciamento dos planos de manutenção e elevação dos índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos críticos.

Palavras-chave: Gestão da manutenção; Disponibilidade de ativos; Confiabilidade.

Abstract

The intensification of competition in the chemical sector demands high standards of asset availability and reliability. In critical processes such as the production of sodium chlorate and chlorine dioxide, there are operational, environmental, and safety risks. In this context, comprehensive and effective maintenance management, covering both corrective and preventive maintenance, becomes a strategic foundation for ensuring operational continuity, continuous improvement, and increased asset availability. This study aims to evaluate the importance of using maintenance management tools to improve equipment availability and reliability in a chemical industry that produces sodium chlorate and chlorine dioxide, both of which are essential components in the production of various products, with particular emphasis on eucalyptus-based pulp. Accordingly, the study is based on a case analysis involving the management and application of performance indicators (KPIs), Maintenance Planning and Control (MPC), failure analysis, preventive and predictive maintenance, as well as the use of Computerized Maintenance Management Systems (CMMS). The expected results include a reduction in unplanned downtime, improved management of maintenance plans, and higher availability and reliability indices for critical assets.

Keywords: Maintenance management; Asset availability; Reliability.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Eficiência Global do Equipamento	24
Figura 2 – Interface inicial da plataforma SAP	39
Figura 3 – Cabeçalho parametrizado para coleta de dados	40
Figura 4 – Interface inicial da plataforma SAP	41
Figura 5 – Pilares da manutenção em 2024:	51
Figura 6 – Concentração de gastos com manutenção em 2024:	52
Figura 7 – Distribuição de gastos Chieller 1	55
Figura 8 – Melhorias propostas	63
Figura 9 – Pilares da manutenção em 2025:	68
Figura 10 – Gastos de manutenção em 2025	70
Figura 11 – Custos de manutenção em para o chiller 1 2025	72
Figura 12 – Curva de confiabilidade $R(t)$	78
Figura 13 – Curva de confiabilidade $R(t)$	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 1		43
Tabela 2 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 2		44
Tabela 3 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 2		45

Lista de abreviaturas e siglas

5S	Programa dos Cinco Sentidos
CMMS	Computerized Maintenance Management System
EAM	Enterprise Asset Management
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Key Performance Indicator
KPIs	Key Performance Indicators
LCC	Life Cycle Cost
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NaClO ₃	Clorato de Sódio
ClO ₂	Dióxido de Cloro
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
R(t)	Função Confiabilidade
RCA	Root Cause Analysis
RCM	Reliability Centered Maintenance
TPM	Total Productive Maintenance

Sumário

1	Objetivo	1
1.1	Objetivo Geral	1
1.2	Objetivos Específicos	1
2	Introdução	2
2.1	História e evolução da engenharia de manutenção e confiabilidade	4
2.2	Evolução da manutenção:	5
2.3	Tipos de manutenção:	8
2.3.1	Manutenção corretiva:	8
2.3.2	Corretiva não planejada:	8
2.3.3	Corretiva planejada:	8
2.3.4	Manutenção Preventiva:	9
2.3.5	Manutenção Preditiva:	9
2.4	Engenharia de manutenção:	10
2.5	Gestão de manutenção ligada a confiabilidade e PCM:	10
2.5.1	PCM (Planejamento e Controle da Manutenção)	11
2.5.2	Uso de dados e indicadores para potencializar a manutenção centrada em PCM:	12
2.5.3	Gestão Manual x Informatizada:	13
2.5.4	Gestão manual (Vantagens x Desvantagens):	15
2.6	Manutenção centrada em confiabilidade (MCC):	15
2.7	Indicadores de desempenho da manutenção:	17
2.7.1	<i>MTBF (Mean Time Between Failures)</i>	18
2.7.2	<i>MTTR (Mean Time To Repair)</i>	19
2.7.3	Confiabilidade operacional:	21
2.7.4	EGE (Eficiência Global do Equipamento):	22
2.8	A indústria química:	26
2.8.1	Produção do clorato de sódio ($NaClO_3$)	27
2.8.2	Produção do dióxido de cloro (ClO_2)	29
2.8.3	Equipamentos de controle térmico	31
2.9	Principais ativos mecânicos e operacionais da planta química	32
2.9.1	Equipamentos rotativos	33
2.9.2	Equipamentos estáticos	34
3	Metodologia	37

3.1	Levantamento dos dados	37
3.2	Extração dos dados brutos	39
3.3	Lapidação dos dados	42
3.4	Aplicação das ferramentas de gestão da manutenção e escolha do	
	ativo a ser analisado:	46
3.5	Definição e acompanhamento dos indicadores:	48
3.6	Proposição de melhorias:	49
4	Análise de Resultados e Discussões	51
4.1	Campanha de manutenção em 2024:	51
4.1.1	JUPIA:	55
4.1.2	Y-5651 CHILLER 1 2024:	55
4.2	Escolha do ativo a ser analisado:	56
4.3	Custo englobado 2024 para o Chiller:	57
4.3.1	Estudando a respeito da campanha da máquina no ano de 2024:	58
4.3.2	Tempo mério entre falhas do chiller para campanha de 2024	59
4.3.3	Tempo médio entre falhas do chiller para campanha de 2024	60
4.4	Resumo dos resultados de 2024 para o ativo	61
4.5	Pontos de melhoria para implementar na campanha de 2025:	62
4.6	Análise da viabilidade e aplicação das melhorias cabíveis	64
4.7	Campanha de manutenção em 2025:	66
4.7.1	Custo englobado 2025:	69
4.7.2	Y-5651 CHILLER 1 2025:	72
4.7.3	Estudando a respeito da campanha da máquina no ano de 2025:	73
4.7.4	Tempo médio entre falhas do chiller para campanha de 2025	74
4.7.5	Tempo médio entre falhas do Chiller para campanha de 2025	75
4.8	Resumo dos resultados de 2025 para o ativo	75
4.9	Curva de Confiabilidade:	76
4.9.1	Cenário 1: 5 falhas	77
4.9.2	Cenário 2: 6 falhas	78
4.9.3	Comparativo de Confiabilidade ao Final do Período	80
4.10	OEE do equipamento	82
4.11	Curva da banheira	84
4.12	Discução dos resultados	85
4.12.1	Custos 2024 x 2025	86
4.12.2	Tempo médio entre falhas do Chiller estudado 2024 X 2025:	87
4.12.3	Tempo médio de reparo do Chiller estudado 2024 X 2025:	87
4.12.4	Confiabilidade operacional:	88

4.12.5	Pontos de melhorias para futuros estudos:	91
4.12.6	Continuidade do estudo:	93
5	Conclusão	95
ANEXOS		99
ANEXO A – Ata de defesa		99

1 Objetivo

1.1 Objetivo Geral

Analisar a relevância do uso de ferramentas de gestão da manutenção, com ênfase no Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), para a elevação dos índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos industriais em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro, por meio da realização de um estudo de caso.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os indicadores de manutenção (*MTBF*, *MTTR* e Disponibilidade).
- Analisar a influência do PCM no desempenho dos ativos.
- Identificar falhas, gargalos e oportunidades de melhoria.
- Propor ações para otimização da gestão da manutenção.
- Avaliar os ganhos operacionais e produtivos decorrentes das melhorias implementadas.

2 Introdução

A manutenção industrial e a engenharia de confiabilidade constituem pilares estratégicos para a sustentabilidade operacional, econômica e de segurança dos sistemas produtivos modernos. Em ambientes industriais de alta complexidade, como os processos químicos contínuos, a indisponibilidade de ativos não representa apenas perda de produção, mas também elevação de riscos operacionais, impactos ambientais e aumento expressivo de custos indiretos. Nesse contexto, a manutenção deixa de ser vista como atividade meramente corretiva e passa a assumir caráter sistêmico, integrado ao planejamento da produção, à gestão de ativos e à engenharia de processos.

A manutenção pode ser compreendida como o conjunto de ações técnicas, administrativas e gerenciais destinadas a preservar ou restaurar a condição funcional de um equipamento, sistema ou instalação, de modo que este desempenhe sua função requerida com segurança, confiabilidade e desempenho adequado. Sua evolução histórica reflete a transformação da indústria: inicialmente centrada na manutenção corretiva, caracterizada pela intervenção após a falha, evoluiu para abordagens preventivas baseadas em tempo ou uso, e posteriormente para estratégias preditivas e baseadas em condição, sustentadas por monitoramento, análise de dados e diagnóstico de falhas. Atualmente, conceitos como Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), Manutenção Produtiva Total (TPM) e Gestão de Ativos conforme a ISO 55000 consolidam uma visão integrada entre confiabilidade, risco, custo do ciclo de vida e desempenho organizacional.

A confiabilidade, por sua vez, é definida como a probabilidade de um item desempenhar sua função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo determinado. Trata-se de uma grandeza probabilística, fortemente associada à variabilidade dos mecanismos de falha e ao comportamento estatístico dos equipamentos ao longo do tempo. Sua análise envolve modelos matemáticos e estatísticos, como distribuições de falhas (exponencial, Weibull, lognormal), curvas de taxa de falha (curva da “banheira”) e técnicas de análise de sobrevivência. Em termos práticos, a confiabilidade está diretamente ligada ao indicador *MTBF* (*Mean Time Between Failures*), que expressa o tempo médio de operação entre falhas sucessivas, servindo como métrica fundamental para avaliar a robustez de sistemas e componentes.

A manutenibilidade complementa esse conceito, representando a capacidade de um item ser mantido ou restaurado a um estado operacional dentro de um tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições específicas. Seu principal indicador é o *MTTR* (*Mean Time To Repair*), que reflete a eficiência das intervenções

de manutenção, a disponibilidade de recursos, a padronização de procedimentos e a qualificação das equipes. A interação entre confiabilidade e manutenibilidade resulta na disponibilidade operacional, definida como a probabilidade de um sistema estar apto a operar quando requisitado. Assim, a disponibilidade é função direta da redução da frequência de falhas (aumento do *MTBF*) e da diminuição do tempo de reparo (redução do *MTTR*), configurando um dos principais objetivos da gestão da manutenção.

No âmbito organizacional, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) exerce papel central na transformação de dados operacionais em decisões estratégicas. O PCM estrutura o fluxo de informações, organiza ordens de serviço, define planos preventivos, prioriza intervenções, gerencia recursos e acompanha indicadores de desempenho. A utilização de sistemas informatizados de gestão da manutenção (*CMMS Computerized Maintenance Management System*) permite rastreabilidade de falhas, histórico de intervenções e análise de tendências, viabilizando a transição de uma manutenção reativa para uma manutenção baseada em confiabilidade. Ferramentas como análise de criticidade, *FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)*, análise de causa raiz e monitoramento de condição por vibração, termografia e análise de óleo ampliam a capacidade preditiva e reduzem a incerteza associada às decisões de intervenção.

Sob a ótica econômica, a manutenção deve ser analisada como investimento e não apenas como custo. A busca pelo ponto ótimo entre manutenção excessiva e manutenção insuficiente envolve o conceito de custo do ciclo de vida (*LCC – Life Cycle Cost*), no qual se consideram custos de aquisição, operação, manutenção, falhas e descarte. Estratégias baseadas em confiabilidade visam minimizar o custo total, reduzindo paradas não programadas, perdas de qualidade, retrabalhos e riscos de acidentes. Além disso, a confiabilidade elevada contribui para a estabilidade dos processos, melhoria da eficiência energética e maior previsibilidade da produção.

Em indústrias químicas e de processos contínuos, a relação entre manutenção e confiabilidade é ainda mais crítica devido à presença de equipamentos rotativos, sistemas de bombeamento, trocadores de calor, reatores e tubulações sujeitos a corrosão, fadiga, desgaste e degradação térmica. A falha de um único componente pode desencadear efeitos em cadeia, comprometendo a integridade de todo o sistema. Assim, a gestão da manutenção precisa incorporar análise de riscos, segurança de processos e integridade de ativos, integrando-se às práticas de engenharia de confiabilidade e segurança operacional.

Dessa forma, a manutenção e a confiabilidade não devem ser tratadas como áreas

isoladas, mas como componentes interdependentes de uma estratégia de excelência operacional. A aplicação de métodos analíticos, indicadores de desempenho, planejamento estruturado e cultura organizacional voltada à melhoria contínua possibilita elevar a disponibilidade dos ativos, reduzir custos e aumentar a competitividade industrial. Em síntese, a engenharia de manutenção orientada pela confiabilidade representa um dos principais vetores para a eficiência, a segurança e a sustentabilidade dos sistemas produtivos contemporâneos.

2.1 História e evolução da engenharia de manutenção e confiabilidade

Durante a Segunda Guerra Mundial, a confiabilidade dos equipamentos militares tornou-se questão estratégica. Sistemas aeronáuticos, navais e de comunicação passaram a exigir desempenho contínuo e seguro em condições extremas. Nesse contexto, surgiram as bases da engenharia de confiabilidade, com o uso de métodos estatísticos para prever falhas e modelar o comportamento de componentes (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A partir das décadas de 1950 e 1960, com o crescimento da indústria aeroespacial, nuclear e petroquímica, tornou-se evidente que nem todas as falhas estavam associadas ao envelhecimento dos componentes. Estudos demonstraram que muitas falhas ocorriam de forma aleatória, o que levou ao desenvolvimento da famosa curva da banheira, representando três fases distintas: mortalidade infantil, vida útil com taxa de falha aproximadamente constante e desgaste acelerado. Essa descoberta mostrou que intervenções baseadas apenas em tempo não eram suficientes, impulsionando abordagens mais analíticas.

Na década de 1970, a indústria da aviação civil desenvolveu o conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade *RCM Reliability Centered Maintenance*, que marcou um divisor de águas na gestão da manutenção (MOUBRAY, 1997). O *RCM* propôs que a manutenção deveria ser definida com base nas funções do sistema, modos de falha, consequências e criticidade, e não apenas no tempo de operação. Essa abordagem introduziu formalmente ferramentas como *FMEA*, análise de criticidade e lógica de decisão para definição de tarefas de manutenção.

Nos anos 1980 e 1990, com a automação industrial e a crescente informatização, a manutenção passou a incorporar sistemas de informação, surgindo os *CMMS (Computerized Maintenance Management Systems)*. Paralelamente, consolidou-se a Manutenção Preditiva, baseada no monitoramento de condição, como análise de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo. A confiabilidade passou a ser tratada de forma integrada

ao ciclo de vida do ativo, considerando projeto, operação e manutenção.

No mesmo período, difundiu-se o conceito de *Total Productive Maintenance (TPM)*, originado no Japão, que ampliou a responsabilidade pela confiabilidade para os operadores e enfatizou a eliminação de perdas, a manutenção autônoma e a melhoria contínua. Essa abordagem trouxe uma dimensão cultural à manutenção, integrando pessoas, processos e tecnologia.

No século XXI, a evolução tecnológica introduziu a Indústria 4.0, caracterizada por sensores inteligentes, big data e inteligência artificial. A manutenção evolui para modelos preditivos e prescritivos, nos quais algoritmos analisam grandes volumes de dados operacionais para prever falhas antes de sua ocorrência e recomendar ações ideais. A confiabilidade passa a ser tratada dentro da Gestão de Ativos, alinhada a normas como a ISO 55000, que integra risco, desempenho e custo ao longo do ciclo de vida.

Assim, a evolução da engenharia de manutenção e confiabilidade reflete a transição de uma postura reativa para uma abordagem estratégica, baseada em dados, risco e desempenho (KARDEC; NASCIF, 2019). O foco deixa de ser apenas reparar falhas e passa a ser garantir a função dos ativos com segurança, previsibilidade e otimização econômica, posicionando a manutenção como elemento essencial para a excelência operacional e a competitividade industrial.

2.2 Evolução da manutenção:

Desde os tempos mais remotos, mesmo de maneira empírica e não sistematizada, o ser humano já realizava práticas que hoje podem ser compreendidas como manutenção. A conservação de utensílios, armas, ferramentas agrícolas e abrigos demonstrava a necessidade de preservar recursos e garantir sua funcionalidade ao longo do tempo. Essas ações, embora intuitivas, evidenciam que o conceito de manter algo em condições adequadas de uso antecede em muito a formalização da engenharia de manutenção.

Com a Revolução Industrial e o avanço tecnológico, a manutenção deixou de ser apenas corretiva e passou a assumir um papel estratégico nas organizações (KARDEC; NASCIF, 2019).. A crescente complexidade dos sistemas produtivos exigiu métodos mais estruturados, levando ao surgimento de abordagens preventivas, preditivas e, mais recentemente, da manutenção centrada na confiabilidade (*RCM*) e da gestão de ativos. Nesse contexto, a manutenção deixou de atuar somente após a ocorrência de falhas e passou a integrar o planejamento industrial.

Atualmente, a manutenção participa desde as fases iniciais de concepção e projeto de equipamentos e instalações, contribuindo para decisões relacionadas à confiabilidade, manutenibilidade, segurança operacional e custos do ciclo de vida. Essa integração permite reduzir paradas não programadas, aumentar a disponibilidade dos ativos e prolongar sua vida útil. Além disso, a aplicação de ferramentas de engenharia de manutenção impacta diretamente na eficiência dos processos produtivos, na qualidade dos produtos e serviços e na competitividade das empresas.

Dessa forma, a manutenção evoluiu de uma prática reativa e intuitiva para uma função estratégica, essencial para a sustentabilidade técnica, econômica e operacional dos sistemas industriais modernos.

A manutenção de primeira geração foi o estágio inicial da manutenção industrial, predominante até a Segunda Guerra Mundial, caracterizada pela atuação corretiva e reativa, realizada apenas após a ocorrência de falhas. Nesse período, não havia planejamento, controle ou registros históricos das intervenções, pois os processos produtivos eram menos complexos e as exigências de produtividade e confiabilidade ainda eram reduzidas. Como consequência, eram comuns paradas inesperadas, altos custos com reparos emergenciais e maiores riscos operacionais. Apesar das limitações, esse modelo teve importância histórica ao evidenciar a necessidade de estratégias mais estruturadas, impulsionando o desenvolvimento da manutenção preventiva e da engenharia de manutenção moderna. Segundo Alan Kardec e Julio Nascif, a manutenção nesse período era essencialmente corretiva e pouco integrada à gestão industrial.

A manutenção de segunda geração surgiu entre as décadas de 1950 e 1970, impulsionada pelo aumento da automação industrial e pela necessidade de maior produtividade, segurança e confiabilidade. Diferentemente da primeira geração, que apenas reagia às falhas, essa fase passou a buscar a antecipação e compreensão das causas das falhas por meio de análises técnicas e históricas. A manutenção preventiva tornou-se mais criteriosa, deixando de ser baseada apenas em tempo de uso e passando a considerar as reais condições operacionais dos equipamentos.

Nesse período, ganharam destaque práticas como inspeções sistemáticas, monitoramento periódico e análise estatística de falhas, além da introdução de conceitos de confiabilidade, como MTBF, taxa de falha e curva da banheira. Também houve maior integração entre manutenção, operação e engenharia, com criação de registros históricos, padronização de procedimentos e planejamento das intervenções. Assim, a manutenção passou a ser vista como função estratégica para garantir disponibilidade, segurança e qualidade

dos processos industriais, servindo como base para o desenvolvimento da manutenção preditiva e da Manutenção Centrada na Confiabilidade.

A manutenção de terceira geração surgiu nas últimas décadas do século XX, em um contexto de alta automação industrial e maior exigência por produtividade, segurança e competitividade. Nessa fase, a manutenção passou a ser tratada como função estratégica, diretamente ligada aos resultados da empresa. O foco deixou de ser apenas evitar falhas e passou a incluir a análise de suas causas, impactos e riscos para o sistema produtivo.

Ganharam destaque conceitos de confiabilidade, análise de risco e gestão do ciclo de vida dos ativos, além de metodologias como a Manutenção Centrada na Confiabilidade, FMEA e análise de causa raiz. A tecnologia também assumiu papel central, com o uso de sensores, monitoramento em tempo real e softwares de gestão da manutenção para apoiar decisões baseadas em dados.

Além disso, a manutenção passou a atuar de forma integrada com engenharia, operação e planejamento, contribuindo para aumento da disponibilidade, redução de falhas críticas e melhoria da segurança e da qualidade dos processos. Dessa forma, a terceira geração consolidou a engenharia de manutenção como uma área estratégica e essencial para a confiabilidade e competitividade das indústrias modernas.

A manutenção de quarta geração está relacionada à Indústria 4.0 e à digitalização dos processos industriais, caracterizando-se pelo uso intensivo de tecnologias como sensores inteligentes, big data, inteligência artificial e aprendizado de máquina. Nessa fase, os equipamentos passam a gerar dados continuamente, permitindo prever falhas com maior precisão e recomendar automaticamente as melhores ações de manutenção, evoluindo da manutenção preditiva para a manutenção prescritiva.

Outro destaque é o uso de gêmeos digitais, que possibilitam simular condições operacionais e testar intervenções antes de aplicá-las fisicamente. A manutenção torna-se ainda mais integrada à operação, engenharia e gestão estratégica, considerando não apenas confiabilidade e disponibilidade, mas também sustentabilidade, eficiência energética e impacto ambiental.

Assim, a quarta geração transforma a manutenção em um sistema inteligente, conectado e orientado por dados, capaz de antecipar problemas e otimizar recursos (ISO 55000, 2014).

2.3 Tipos de manutenção:

2.3.1 Manutenção corretiva:

A manutenção corretiva é uma estratégia reativa realizada após a ocorrência de falhas, com o objetivo de restaurar as condições operacionais do equipamento (KARDEC; NASCIF, 2019). Ela pode ser classificada em corretiva não planejada, quando ocorre de forma emergencial após uma quebra inesperada, e corretiva planejada, quando a intervenção é programada após a identificação de degradações ou falhas iminentes.

Embora apresente desvantagens como aumento de custos, perdas de produção, riscos operacionais e impactos na confiabilidade, a manutenção corretiva continua sendo inevitável em sistemas industriais. Em alguns casos, sua aplicação é economicamente viável, especialmente em componentes de baixo custo e baixo impacto operacional. Atualmente, esse tipo de manutenção é utilizado de forma controlada e combinado com outras estratégias, compondo uma gestão mais orientada à confiabilidade e disponibilidade dos ativos.

2.3.2 Corretiva não planejada:

A manutenção corretiva não planejada ocorre quando um equipamento falha de forma inesperada, exigindo intervenção imediata para restabelecer a operação. Por ser uma ação emergencial, não há planejamento prévio de recursos, peças ou mão de obra, fazendo com que a equipe atue sob pressão e aumentando riscos de erros, retrabalhos e acidentes.

Esse tipo de manutenção é considerado um dos mais custosos, pois além do reparo, provoca perdas de produção, atrasos, danos secundários e redução da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos. Sua alta ocorrência geralmente indica deficiências em estratégias preventivas e preditivas, tornando sua redução um dos principais objetivos da engenharia de manutenção moderna. Apesar disso, falhas imprevistas nunca podem ser totalmente eliminadas, sendo necessário estruturar processos para responder a essas ocorrências de forma rápida e segura.

2.3.3 Corretiva planejada:

A manutenção corretiva planejada é uma intervenção realizada após a identificação de uma falha ou degradação, mas de forma programada e controlada, sem necessidade de parada imediata do equipamento. Nesse modelo, a manutenção é organizada previa-

mente, com definição de janela de parada, preparação de peças, ferramentas e mão de obra, reduzindo improvisações e riscos operacionais.

Esse tipo de manutenção geralmente resulta de inspeções e monitoramentos que detectam problemas antes de uma falha crítica, permitindo evitar quebras inesperadas e minimizar impactos na produção. Em comparação à corretiva não planejada, apresenta menores custos, melhor controle operacional e maior segurança. Apesar disso, ainda atua sobre falhas já existentes, sendo utilizada de forma complementar às estratégias preventivas e preditivas dentro da gestão moderna de manutenção.

2.3.4 Manutenção Preventiva:

A manutenção preventiva é uma estratégia baseada em intervenções programadas para reduzir a probabilidade de falhas e manter os equipamentos em condições adequadas de operação (LEVITT, 2003). Diferentemente da manutenção corretiva, atua de forma antecipada, realizando inspeções, lubrificações, ajustes e substituições periódicas com base em tempo de uso, histórico de falhas e recomendações técnicas.

Esse modelo proporciona maior organização da produção, melhor controle de custos, aumento da confiabilidade e prolongamento da vida útil dos equipamentos, além de contribuir para segurança e qualidade operacional. Entretanto, quando aplicada sem critérios técnicos adequados, pode gerar trocas desnecessárias e aumento de custos, já que nem todas as falhas estão relacionadas ao tempo de operação.

Na indústria moderna, a manutenção preventiva é considerada um dos principais pilares da gestão da manutenção (KARDEC; NASCIF, 2019), sendo utilizada de forma integrada às estratégias preditivas e corretivas planejadas para garantir maior estabilidade e desempenho dos sistemas produtivos.

2.3.5 Manutenção Preditiva:

A manutenção preditiva é uma estratégia baseada no monitoramento da condição real dos equipamentos, buscando identificar sinais de degradação e prever falhas antes que ocorram (MOBLEY, 2002). Diferentemente da manutenção preventiva, que segue intervalos fixos, a preditiva realiza intervenções apenas quando os dados indicam necessidade, utilizando técnicas como análise de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo lubrificante.

Essa abordagem permite detectar problemas como desgaste, desalinhamentos e fa-

lhas elétricas, aumentando a confiabilidade e reduzindo paradas desnecessárias e falhas catastróficas. Além disso, otimiza o uso de recursos, melhora a disponibilidade dos ativos e contribui para maior segurança operacional.

Apesar das vantagens, a manutenção preditiva exige investimentos em instrumentos, softwares e capacitação técnica para interpretação correta dos dados. Na engenharia de manutenção moderna, representa uma evolução da gestão baseada em condição e serve de base para sistemas mais avançados de monitoramento inteligente de ativos (MOBLEY, 2002).

2.4 Engenharia de manutenção:

A Engenharia de Manutenção é a área responsável por planejar, gerenciar e otimizar ações que garantam o funcionamento confiável, seguro e econômico de equipamentos e sistemas industriais ao longo de seu ciclo de vida (KELLY; HARRIS, 2011). Mais do que realizar reparos, ela atua de forma técnica e estratégica na análise de falhas, definição de políticas de manutenção e melhoria do desempenho dos ativos.

A área utiliza indicadores de confiabilidade, análises de falhas, monitoramento de condição e planejamento da manutenção para aumentar disponibilidade, reduzir custos e melhorar a segurança operacional. Além disso, participa desde o projeto dos equipamentos, buscando facilitar futuras intervenções e reduzir impactos ao longo da vida útil dos ativos.

Do ponto de vista organizacional, a engenharia transforma a manutenção em um setor estratégico, contribuindo diretamente para produtividade, qualidade, segurança, sustentabilidade e competitividade industrial. Assim, integra engenharia, operação e gestão para assegurar a continuidade e eficiência dos sistemas produtivos modernos (KARDEC; NASCIF, 2019).

2.5 Gestão de manutenção ligada a confiabilidade e PCM:

A Gestão Estratégica da Manutenção representa a evolução da manutenção de uma atividade essencialmente operacional para uma função diretamente associada à competitividade organizacional (ISO 55000, 2014). Nessa abordagem, as decisões de manutenção passam a estar alinhadas aos objetivos corporativos, contribuindo para a produtividade, segurança, qualidade, sustentabilidade e rentabilidade da empresa. Diferentemente da manutenção tradicional, focada na correção de falhas após sua ocorrência, a

gestão estratégica considera todo o ciclo de vida dos ativos, priorizando desempenho, risco e geração de valor.

Seu princípio fundamental é que os ativos existem para cumprir uma função dentro do processo produtivo. Dessa forma, a manutenção não se limita a verificar se o equipamento está operando, mas busca avaliar se ele atende aos requisitos de desempenho esperados, se os riscos associados às falhas são aceitáveis e se os custos de manutenção são compatíveis com os impactos potenciais da indisponibilidade do ativo. Essa visão aproxima a manutenção dos conceitos de confiabilidade e gestão de ativos.

2.5.1 PCM (Planejamento e Controle da Manutenção)

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) é o principal mecanismo responsável por transformar os objetivos estratégicos da manutenção em ações operacionais. Sua função consiste em planejar, programar, acompanhar e controlar as atividades de manutenção, garantindo a utilização eficiente dos recursos disponíveis e a execução das intervenções de forma organizada.

Além da programação de serviços, o PCM gerencia informações relacionadas aos ativos, incluindo históricos de falhas, tempos de parada, custos de manutenção e indicadores de desempenho. Essas informações fornecem suporte à tomada de decisão, permitindo identificar oportunidades de melhoria, definir prioridades e orientar investimentos em manutenção.

Entre suas principais atribuições destacam-se a gestão de ordens de serviço, programação de paradas, controle de *backlog*, alocação de recursos e monitoramento de indicadores como *MTBF*, *MTTR* e disponibilidade. Dessa forma, o PCM contribui para reduzir intervenções emergenciais, melhorar a previsibilidade operacional e aumentar a eficiência dos processos produtivos.

Com o avanço dos sistemas informatizados de gestão da manutenção (*CMMS-EAM*), o PCM passou a desempenhar também um papel importante na consolidação e análise de dados dos ativos. Isso possibilita uma gestão mais estruturada da manutenção, baseada em informações confiáveis e alinhada aos princípios da engenharia de confiabilidade.

Por essa razão, o PCM é considerado um dos pilares da gestão estratégica da manutenção, atuando como elo entre os objetivos corporativos e a execução das atividades de manutenção no ambiente industrial.

2.5.2 Uso de dados e indicadores para potencializar a manutenção centrada em PCM:

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) é o principal mecanismo responsável por transformar os objetivos estratégicos da manutenção em ações operacionais (VIANA, 2002). Logo o PCM deixa de exercer apenas funções administrativas e passa a atuar como elemento fundamental para transformar dados de manutenção em decisões operacionais e estratégicas capazes de impactar diretamente a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos.

A utilização estruturada de indicadores permite ao PCM atuar de maneira mais preditiva e menos reativa, possibilitando maior controle sobre falhas, intervenções e utilização de recursos. Informações como histórico de paradas, frequência de falhas, tempos médios de reparo e backlog de manutenção fornecem subsídios para o planejamento das atividades, definição de prioridades e programação das intervenções. Dessa forma, o PCM passa a operar com base em evidências técnicas, reduzindo improvisações e aumentando a previsibilidade das ações de manutenção.

Além disso, indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidade física e percentual de manutenção planejada possuem forte conexão com as atividades executadas pelo PCM. O acompanhamento desses parâmetros permite identificar gargalos operacionais, falhas recorrentes e ineficiências relacionadas ao planejamento e à execução das intervenções. Um aumento no MTTR, por exemplo, pode indicar deficiência na gestão de recursos, indisponibilidade de peças sobressalentes ou falhas no planejamento das ordens de serviço, evidenciando a necessidade de melhorias no processo de manutenção.

Nesse cenário, o *backlog* de manutenção também assume papel estratégico dentro do PCM, funcionando como importante indicador da capacidade operacional da equipe frente à demanda de serviços existente. A análise contínua do backlog permite identificar desequilíbrios entre volume de intervenções e disponibilidade de recursos, auxiliando na priorização das atividades e na tomada de decisões relacionadas à alocação de mão de obra, materiais e janelas operacionais.

Outro aspecto diretamente relacionado ao PCM é a análise de criticidade dos equipamentos. A partir da associação entre indicadores de falha, impacto produtivo e riscos operacionais, torna-se possível direcionar esforços de planejamento e programação para os ativos mais relevantes ao processo produtivo. Essa priorização favorece uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis e fortalece o alinhamento entre manutenção e estratégia organizacional, especialmente em ambientes industriais de elevada dependência

operacional.

O controle sistemático das intervenções realizado pelo PCM também contribui para melhoria contínua dos indicadores de desempenho. O registro histórico das ordens de serviço, tempos de execução, falhas recorrentes e consumo de materiais possibilita análises comparativas ao longo do tempo, permitindo identificar tendências de degradação, validar ações corretivas e promover ajustes nas estratégias de manutenção. Dessa forma, o PCM atua como elemento central na consolidação de uma cultura orientada por confiabilidade, padronização e tomada de decisão baseada em dados.

Além disso, a eficiência do PCM impacta diretamente a disponibilidade operacional dos ativos. Intervenções adequadamente planejadas e programadas reduzem o tempo de parada dos equipamentos, minimizam perdas produtivas e favorecem maior estabilidade operacional. Da mesma forma, a correta gestão de recursos e a preparação prévia das atividades contribuem para redução do MTTR, permitindo que os equipamentos retornem mais rapidamente à operação após ocorrência de falhas.

Assim, observa-se que o PCM não atua de forma isolada dentro da gestão da manutenção, mas sim como estrutura responsável por transformar dados operacionais em ações organizadas, controladas e alinhadas aos objetivos estratégicos da empresa. Sua integração com os indicadores de desempenho permite não apenas melhorar os resultados operacionais da manutenção, mas também sustentar decisões relacionadas à confiabilidade, disponibilidade, produtividade e competitividade industrial.

2.5.3 Gestão Manual x Informatizada:

A comparação entre gestão manual e gestão informatizada da manutenção evidencia a própria evolução do PCM e da forma como as indústrias lidam com seus ativos. A gestão manual foi, por muito tempo, a base do controle da manutenção. Nela, as informações eram registradas em fichas, planilhas físicas, quadros, pastas e relatórios preenchidos à mão. Ordens de serviço eram abertas em papel, os históricos de falhas dependiam de anotações individuais e o acompanhamento de prazos, peças e equipes estava fortemente ligado à experiência dos profissionais envolvidos. Esse modelo funcionava em ambientes menos complexos, com menor número de equipamentos e menor exigência por rastreabilidade, mas apresentava forte dependência do fator humano, grande risco de perda de informação e dificuldade de análise histórica consistente.

No modelo manual, entre suas principais atribuições destacam-se o monitoramento

de indicadores como MTBF, MTTR e disponibilidade, amplamente utilizados para avaliar o desempenho dos ativos industriais (LAFRAIA, 2001). O planejamento tendia a ser mais reativo e menos preciso. A ausência de bases de dados estruturadas dificultava o cálculo confiável de indicadores como MTBF, MTTR e disponibilidade. Muitas decisões eram tomadas com base na percepção da equipe e na memória dos técnicos, o que, embora valioso do ponto de vista prático, limitava a visão sistêmica da gestão. Além disso, a integração com setores como almoxarifado, compras e produção era mais lenta, gerando atrasos na obtenção de sobressalentes, conflitos de programação e maior probabilidade de manutenções emergenciais.

Com a informatização, surge um novo patamar de gestão. Sistemas computacionais de gestão da manutenção permitem registrar, armazenar e organizar grande volume de dados sobre equipamentos, falhas, intervenções, custos e tempos de parada. As ordens de serviço passam a ser geradas, programadas e encerradas digitalmente, criando rastreabilidade completa do ciclo de manutenção. O histórico dos ativos se torna acessível de forma rápida, possibilitando análises de tendência, identificação de falhas recorrentes e revisão técnica dos planos de manutenção.

A principal diferença estratégica está na capacidade de transformar dados em informação gerencial. Em um sistema informatizado, os indicadores são calculados automaticamente e podem ser acompanhados em tempo real, permitindo ao PCM atuar de forma preventiva e baseada em desempenho. A priorização de serviços por criticidade, o controle de backlog, a gestão de estoques de peças e a programação de equipes tornam-se mais precisos, reduzindo desperdícios e aumentando a disponibilidade dos ativos. A integração com outros sistemas corporativos, como produção e suprimentos, também melhora o fluxo de informação e o alinhamento entre áreas.

Isso não significa que o fator humano perde importância. Pelo contrário, a informatização potencializa o conhecimento técnico, pois libera a equipe de controles manuais repetitivos e permite foco em análises, melhoria contínua e engenharia de confiabilidade. O desafio passa a ser a qualidade dos dados inseridos e a disciplina no uso do sistema, pois informações incorretas comprometem toda a cadeia de decisão.

Assim, a gestão manual representa um estágio mais simples, dependente da experiência individual e com limitações de controle e análise, enquanto a gestão informatizada posiciona o PCM em um nível estratégico, orientado por dados, com maior integração, rastreabilidade e capacidade de suporte às decisões que impactam diretamente a confiabilidade, os custos e a competitividade industrial.

2.5.4 Gestão manual (Vantagens x Desvantagens):

A gestão manual da manutenção apresenta como principal vantagem o baixo custo inicial, uma vez que não exige investimentos em softwares, licenças ou infraestrutura tecnológica. Além disso, oferece maior flexibilidade para a tomada de decisões baseadas na experiência da equipe e não depende de sistemas computacionais ou conhecimentos avançados em tecnologia da informação. Entretanto, esse modelo possui limitações significativas, como a elevada dependência da memória e do conhecimento dos profissionais, o que pode gerar problemas em situações de substituição de pessoal. Também há maior probabilidade de perda, extravio ou preenchimento incorreto de informações, além da dificuldade na geração de indicadores confiáveis devido à falta de estruturação dos dados. Consequentemente, a rastreabilidade do histórico dos equipamentos torna-se limitada e o planejamento das atividades de manutenção tende a ser menos preciso, favorecendo intervenções emergenciais e conflitos com a programação da produção.

Por sua vez, a gestão informatizada da manutenção possibilita o armazenamento organizado e seguro de grandes volumes de informações relacionadas aos ativos, facilitando a geração de indicadores de desempenho, como *MTBF*, *MTTR*, disponibilidade e custos de manutenção. Esse modelo também proporciona maior precisão no planejamento e na programação das ordens de serviço, além de garantir a rastreabilidade completa das intervenções realizadas em cada equipamento. Entre seus benefícios destacam-se ainda o melhor controle de estoques e sobressalentes, a gestão mais eficiente dos recursos de mão de obra, a integração com outros setores da empresa e o suporte à tomada de decisões estratégicas fundamentadas em dados reais de desempenho. Contudo, a implementação desse sistema requer investimentos iniciais mais elevados em tecnologia, treinamento e infraestrutura. Além disso, existe dependência do correto funcionamento dos sistemas e da qualidade das informações registradas, uma vez que dados incorretos podem comprometer as análises realizadas. Outro desafio comum é a resistência de profissionais que não estão habituados à utilização de ferramentas digitais.

2.6 Manutenção centrada em confiabilidade (MCC):

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), conhecida internacionalmente como *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, consiste em uma metodologia estruturada de engenharia de manutenção voltada à definição das estratégias mais adequadas para garantir que os ativos industriais desempenhem suas funções de maneira confiável, segura e economicamente viável ao longo de seu ciclo de vida. Diferentemente das abordagens

tradicionais baseadas exclusivamente em tempo de operação ou substituições periódicas, a MCC busca compreender o comportamento funcional dos equipamentos, seus modos de falha, suas consequências operacionais e os riscos associados à perda de desempenho.

O conceito de MCC surgiu inicialmente na indústria aeronáutica durante as décadas de 1960 e 1970, quando estudos demonstraram que muitas falhas não estavam necessariamente associadas ao envelhecimento dos componentes. A partir dessas observações, percebeu-se que intervenções preventivas executadas sem critérios técnicos adequados poderiam aumentar custos e até introduzir novas falhas ao sistema. Assim, a MCC passou a propor que as decisões de manutenção fossem fundamentadas na criticidade funcional dos ativos e nas consequências reais das falhas para o processo produtivo.

A metodologia da MCC parte do princípio de que a função do equipamento deve ser preservada, e não apenas o componente físico em si. Dessa forma, a análise inicia-se pela identificação das funções principais do ativo e dos padrões de desempenho esperados. Em seguida, são estudados os modos de falha que podem comprometer essas funções, suas causas prováveis e os efeitos gerados sobre segurança, meio ambiente, produção, qualidade e custos operacionais.

Nesse contexto, ferramentas como *FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)*, análise de criticidade e análise de causa raiz tornam-se fundamentais para apoiar a tomada de decisão. Essas metodologias permitem identificar quais falhas apresentam maior impacto operacional e quais estratégias de manutenção são mais adequadas para cada situação, seja manutenção preventiva, preditiva, corretiva planejada ou até mesmo a decisão de operar até a falha quando economicamente justificável.

Um dos principais objetivos da MCC é direcionar os recursos de manutenção para os ativos mais críticos do sistema produtivo. Em ambientes industriais complexos, nem todos os equipamentos possuem a mesma importância operacional. Assim, a MCC auxilia na priorização das intervenções, permitindo que esforços técnicos, materiais e financeiros sejam concentrados nos equipamentos cuja indisponibilidade gera maiores impactos para a operação.

A aplicação da MCC também contribui diretamente para a melhoria dos indicadores de desempenho da manutenção. Ao reduzir a frequência de falhas inesperadas, aumenta-se o *MTBF*, elevando a confiabilidade operacional dos ativos. Paralelamente, o planejamento estruturado das intervenções reduz tempos improdutivos e melhora o *MTTR*, favorecendo

a disponibilidade operacional do sistema produtivo.

Outro aspecto relevante da MCC está relacionado à gestão de riscos. Em indústrias de processo contínuo, como plantas químicas, petroquímicas e de papel e celulose, a falha de determinados equipamentos pode comprometer não apenas a produção, mas também a segurança operacional, a integridade ambiental e a estabilidade do processo. Dessa forma, a manutenção centrada na confiabilidade permite alinhar as estratégias de manutenção aos níveis de risco aceitáveis pela organização, contribuindo para operações mais seguras e previsíveis.

Com o avanço da digitalização industrial e da coleta de dados operacionais, a MCC passou a ser amplamente integrada aos sistemas informatizados de gestão da manutenção (CMMS), permitindo análises mais precisas sobre comportamento de falhas, tendências operacionais e desempenho dos ativos ao longo do tempo. Essa integração fortalece a tomada de decisão baseada em dados e amplia a capacidade preditiva da engenharia de manutenção.

2.7 Indicadores de desempenho da manutenção:

Os indicadores de manutenção são ferramentas fundamentais para transformar dados operacionais em informações estratégicas, permitindo que a gestão dos ativos industriais seja realizada de forma estruturada e orientada por desempenho. A utilização dessas métricas possibilita avaliar o comportamento dos equipamentos, acompanhar resultados ao longo do tempo e apoiar ações voltadas à confiabilidade, disponibilidade, segurança e controle de custos.

Dentro desse contexto, os indicadores possuem papel importante na avaliação de campanhas de manutenção, uma vez que permitem mensurar os efeitos das intervenções realizadas nos equipamentos. Métricas como *MTBF*, *MTTF* e taxa de falhas (λ) possibilitam verificar se as ações implementadas contribuíram para aumentar a confiabilidade operacional e reduzir a recorrência de falhas. Da mesma forma, o *MTTR* auxilia na análise da eficiência das atividades executadas durante as campanhas, evidenciando ganhos relacionados ao planejamento, organização e disponibilidade de recursos para manutenção.

Além disso, os indicadores permitem realizar comparações anuais de desempenho, tornando possível identificar tendências de melhoria ou degradação dos ativos industriais. A comparação histórica de parâmetros como disponibilidade, quantidade de falhas,

custos de manutenção e cumprimento de planos preventivos fornece uma visão ampla da evolução da gestão da manutenção, permitindo avaliar os impactos das estratégias adotadas ao longo dos anos.

Outro aspecto relevante é a contribuição desses indicadores para a tomada de decisão. A análise quantitativa dos dados permite priorizar intervenções, definir políticas de manutenção, direcionar investimentos e identificar equipamentos críticos dentro do processo produtivo. Indicadores gerenciais, como *backlog* de serviços, percentual de manutenção planejada e índices de cumprimento das atividades preventivas, auxiliam diretamente no controle e na definição de ações estratégicas voltadas à otimização dos recursos disponíveis.

2.7.1 *MTBF (Mean Time Between Failures)*

O (*MTBF*), ou Tempo Médio Entre Falhas, é um dos principais indicadores utilizados na engenharia de confiabilidade para avaliar o desempenho operacional de equipamentos reparáveis. Esse indicador representa o tempo médio de funcionamento entre uma falha e outra, permitindo mensurar a estabilidade operacional dos ativos e a efetividade das estratégias de manutenção aplicadas.

Dentro da gestão da manutenção, o *MTBF* possui grande importância na avaliação de campanhas de manutenção, pois possibilita verificar se as intervenções realizadas contribuíram para aumentar o tempo de operação dos equipamentos sem ocorrência de falhas. O acompanhamento desse indicador antes e após ações corretivas, preventivas ou preditivas permite analisar a eficiência das melhorias implementadas e identificar ganhos de confiabilidade obtidos ao longo do processo.

Além disso, o *MTBF* é amplamente utilizado em comparações anuais de desempenho, permitindo observar a evolução da confiabilidade dos equipamentos ao longo do tempo. O aumento progressivo do indicador pode demonstrar amadurecimento das estratégias de manutenção, maior controle operacional e redução da recorrência de falhas, enquanto reduções no *MTBF* podem indicar degradação dos ativos, necessidade de revisão dos planos de manutenção ou mudanças nas condições operacionais.

Outro aspecto relevante é sua aplicação na tomada de decisão. A análise do *MTBF* auxilia na identificação de equipamentos críticos, priorização de intervenções e definição de políticas de manutenção mais adequadas para cada ativo. Por estar diretamente relacionado à taxa de falhas (λ), o indicador também serve como suporte para estudos

de confiabilidade, planejamento de recursos e definição de ações voltadas à redução de paradas não programadas e perdas produtivas.

Por fim, o monitoramento contínuo do *MTBF* contribui para a promoção da melhoria contínua dentro das organizações industriais. A utilização sistemática desse indicador permite identificar tendências, avaliar resultados das ações implementadas e direcionar esforços para aumento da disponibilidade operacional e confiabilidade dos processos. Entretanto, a efetividade das análises depende diretamente da qualidade dos registros de manutenção e da padronização das informações coletadas ao longo da operação dos equipamentos.

Para fins de Cálculo, o *MTBF* é Calculado pela Equação 1

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{funcionamento}]}{N_{falhas}} \quad (1)$$

Para melhor entendimento ($T_{funcionamento}$) representa o tempo total de funcionamento do equipamento e (N_{falhas}) a quantidade de vezes que o equipamento falhou

2.7.2 *MTTR (Mean Time To Repair)*

O *MTBF*, ou Tempo Médio para Reparo, é um dos principais indicadores de manutenção utilizados na gestão da manutenção industrial. Esse indicador representa o tempo médio necessário para restaurar o funcionamento de um equipamento após a ocorrência de uma falha, contemplando etapas como diagnóstico, mobilização da equipe, disponibilidade de peças, procedimentos de segurança, execução do reparo, testes e retorno à operação.

No contexto da gestão da manutenção, o *MTBF* possui papel fundamental na avaliação de campanhas de manutenção, pois permite analisar a eficiência das intervenções realizadas nos equipamentos. A comparação do tempo médio de reparo antes e após ações de melhoria possibilita verificar se houve avanços relacionados ao planejamento, organização das atividades, disponibilidade de recursos e padronização dos procedimentos de manutenção.

Além disso, o indicador também é amplamente utilizado em comparações anuais de desempenho, permitindo acompanhar a evolução da eficiência operacional ao longo do tempo. Reduções progressivas no *MTBF* podem indicar amadurecimento da gestão da

manutenção, melhoria na capacitação técnica das equipes e maior controle dos processos. Em contrapartida, aumentos no indicador podem revelar dificuldades operacionais, falhas no planejamento ou necessidade de revisão das estratégias adotadas.

Outro aspecto relevante do *MTBF* está relacionado à tomada de decisão. A análise desse indicador auxilia na identificação de gargalos operacionais, definição de prioridades de melhoria e direcionamento de investimentos em treinamento, estoque de sobressalentes, ferramentas e modificações de engenharia. Valores elevados de *MTTR* podem evidenciar problemas como indisponibilidade de peças, dificuldades de acesso ao equipamento ou deficiência na execução dos reparos, fornecendo informações importantes para ações corretivas e estratégicas.

Por fim, o monitoramento contínuo do *MTBF* contribui diretamente para a promoção da melhoria contínua dentro das organizações industriais. A redução do tempo médio de reparo impacta positivamente a disponibilidade dos ativos, diminuindo paradas não programadas e perdas produtivas. Dessa forma, o acompanhamento sistemático desse indicador permite avaliar os resultados das ações implementadas e promover o aperfeiçoamento constante dos processos de manutenção. Entretanto, assim como outros indicadores, sua confiabilidade depende da qualidade dos registros e do controle adequado das informações de manutenção.

Para fins de Cálculo, o *MTBF* é Calculado pela Equação 2

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{reparo}]}{N_{falhas}} \quad (2)$$

Para melhor entendimento (T_{reparo}) representa o tempo total em que o ativo ficou em reparo e (N_{falhas}) a quantidade de vezes que o equipamento necessitou de reparos

A utilização integrada de indicadores como *MTBF*, *MTBF* e demais métricas de desempenho da manutenção está diretamente relacionada aos princípios da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) e do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). Essas abordagens utilizam dados operacionais e históricos de falhas como base para estruturar estratégias de manutenção mais eficientes, seguras e alinhadas aos objetivos produtivos da organização.

No contexto da MCC, indicadores de confiabilidade e manutenibilidade são fundamentais para identificar modos de falha, avaliar impactos operacionais e definir as políticas de

manutenção mais adequadas para cada ativo. O *MTBF*, por exemplo, permite analisar a frequência das falhas e o comportamento operacional dos equipamentos, enquanto o *MTTR* auxilia na avaliação da capacidade de recuperação dos ativos após intervenções corretivas. A interpretação conjunta desses indicadores possibilita compreender não apenas a ocorrência das falhas, mas também seus efeitos sobre a disponibilidade e continuidade operacional.

Já no âmbito do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), esses indicadores fornecem suporte para a programação das atividades, definição de prioridades e controle da eficiência das intervenções realizadas. O acompanhamento histórico dos dados permite avaliar campanhas de manutenção, realizar comparações anuais de desempenho e monitorar a evolução dos resultados obtidos a partir das estratégias implementadas. Dessa forma, o PCM passa a atuar de maneira mais estratégica, direcionando recursos, reduzindo desperdícios e aumentando a previsibilidade das operações de manutenção.

Além disso, a integração entre MCC e PCM fortalece o processo de tomada de decisão dentro da gestão da manutenção. A análise contínua dos indicadores permite identificar ativos críticos, antecipar falhas, otimizar estoques de sobressalentes e direcionar investimentos para ações com maior impacto operacional. Essa abordagem orientada por dados contribui para o aumento da confiabilidade, disponibilidade e eficiência dos sistemas produtivos.

Por fim, tanto a MCC quanto o PCM estão diretamente associados ao conceito de melhoria contínua, uma vez que utilizam os resultados dos indicadores para revisar estratégias, corrigir desvios e promover o aperfeiçoamento constante dos processos de manutenção. Assim, a aplicação estruturada dessas metodologias, aliada ao monitoramento sistemático dos indicadores, permite que a manutenção deixe de atuar de forma reativa e passe a exercer um papel estratégico dentro das organizações industriais.

2.7.3 Confiabilidade operacional:

A confiabilidade operacional é a probabilidade de um equipamento ou sistema desempenhar sua função corretamente, sob determinadas condições, durante um intervalo de tempo definido, sem apresentar falhas. Na engenharia de confiabilidade, esse conceito é quantificado por modelos matemáticos e estatísticos que analisam o comportamento das falhas ao longo do tempo.

A principal representação desse conceito é a função confiabilidade $R(t)$, que indica a

probabilidade de o equipamento continuar operando sem falhar até determinado tempo. Em muitos casos industriais, considera-se uma taxa de falhas constante, utilizando-se a distribuição exponencial, na qual a confiabilidade diminui com o tempo de operação. Nesse contexto, o *MTBF* está diretamente relacionado à taxa de falhas, permitindo estimar a probabilidade de funcionamento contínuo dos ativos.

Além da confiabilidade, também são analisados parâmetros como taxa de falhas, densidade de probabilidade de falha e curva da banheira, que ajudam a identificar fases de falhas prematuras, vida útil estável e desgaste do equipamento. A confiabilidade operacional também considera a manutenibilidade e a disponibilidade, integrando probabilidade de falha e tempos de reparo para avaliar o desempenho global do sistema. Para fins de Cálculo, a confiabilidade operacional é calculada pela Equação 3 e a taxa de falhas apresentada na Equação 4

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (4)$$

Para melhor compreensão ($R(t)$) representa a confiabilidade operacional, λ representa a taxa de falhas e t o tempo de projeção do ativo

2.7.4 EGE (Eficiência Global do Equipamento):

O *OEE (Overall Equipment Effectiveness)* foi desenvolvido no contexto do TPM e permite avaliar a eficiência global dos equipamentos por meio da integração dos índices de disponibilidade, desempenho e qualidade (NAKAJIMA, 1988). A Eficiência Global dos Equipamentos, conhecida pela sigla *OEE (Overall Equipment Effectiveness)*, é um dos indicadores mais abrangentes utilizados na indústria para avaliar o desempenho efetivo de ativos produtivos. Diferentemente de indicadores que analisam apenas aspectos específicos da operação, o *OEE* integra fatores relacionados à manutenção, à operação e à qualidade, proporcionando uma visão sistêmica da eficiência do processo produtivo. Por essa razão, é amplamente empregado como ferramenta de apoio à gestão da produção e à engenharia de manutenção.

A Figura 1 apresenta a estrutura conceitual do *OEE*, evidenciando como o tempo disponível para produção é progressivamente reduzido pelas perdas de disponibilidade,

desempenho e qualidade. O modelo demonstra a relação entre os três fatores que compõem o indicador e sua influência sobre a eficiência global do equipamento.

Inicialmente, considera-se o Tempo Total disponível. Desse período são descontados os intervalos não destinados à produção, como horários não planejados e períodos em que a fábrica permanece fechada, resultando no Tempo Programado para Produzir (A). A partir desse tempo, são subtraídas as perdas de disponibilidade, associadas a eventos que impedem a operação do equipamento, como falhas, setups e períodos de ociosidade, obtendo-se o Tempo Produzindo (B). A razão entre o Tempo Produzindo e o Tempo Programado para Produzir corresponde ao indicador de Disponibilidade.

Na sequência, são consideradas as perdas de desempenho, relacionadas à redução da velocidade operacional e às pequenas paradas ocorridas durante a produção. A eliminação dessas perdas permite comparar a Produção Real (D) com a Produção Teórica (C), possibilitando a determinação do indicador de Performance.

Por fim, a produção é avaliada sob a perspectiva da qualidade. A quantidade total produzida (Boas + Ruins, E) é comparada à quantidade de produtos aprovados (Boas, F). A diferença entre esses valores corresponde às perdas de qualidade, decorrentes principalmente de refugos de partida e refugos de produção, permitindo a obtenção do indicador de Qualidade.

Dessa forma, o *OEE* representa a parcela do tempo disponível em que o equipamento produz itens conformes, na velocidade planejada e sem interrupções não programadas. A Figura 1 (QUALYTEAM, 2025), também destaca as chamadas Seis Grandes Perdas da Produção, agrupadas em perdas de disponibilidade, desempenho e qualidade, que constituem os principais fatores responsáveis pela redução da eficiência operacional dos ativos industriais. A análise dessas perdas possibilita identificar oportunidades de melhoria e direcionar ações voltadas ao aumento da produtividade, da confiabilidade e da disponibilidade dos equipamentos.

A *Overall Equipment Effectiveness* é um dos principais indicadores utilizados na indústria para medir a eficiência operacional dos equipamentos, avaliando de forma integrada disponibilidade, desempenho e qualidade. O indicador demonstra quanto um ativo produz em relação ao seu potencial máximo, considerando perdas por paradas, redução de velocidade e defeitos de produção.

A disponibilidade está relacionada ao tempo em que o equipamento permanece apto

Figura 1 – Eficiência Global do Equipamento

Tempo Total						
OEE = Disponibilidade * Performance * Qualidade	Disponibilidade = B / A	A	Tempo programado para produzir		Horário não planejado	Horário não alocado
		B	Tempo produzindo	Perdas de Disponibilidade: -Quebra de Máquina -Ociosidade -Setup	Horário de não responsabilidade da equipe de produção	Horário em que fábrica está com as portas fechadas
	Performance = D / C	C	Produção Teórica			
		D	Produção Real	Perdas de Performance: -Velocidade reduzida -Pequenas paradas		
	Qualidade = F / E	E	Boas + Ruins			
		F	Boas	Perdas de Qualidade: -Refugos de Partida -Refugos de Produção	As Grandes Perdas de Produção	

Fonte: QUALYTEAM, 2025.

a operar, sendo influenciada por falhas, setups e manutenções. O desempenho avalia se o equipamento opera na velocidade nominal, considerando perdas causadas por microparadas e redução de capacidade. Já a qualidade mede a proporção de produtos conformes, desconsiderando refugos e retrabalhos.

O *OEE* permite identificar os principais impactos das falhas e da degradação dos ativos sobre a produtividade, auxiliando na priorização de melhorias, implementação de estratégias de manutenção e aumento da eficiência produtiva. Além disso, está fortemente associado à Manutenção Produtiva Total, sendo utilizado como ferramenta de melhoria contínua e integração entre manutenção e produção.

Matematicamente, o *OEE* é definido como o produto de três fatores fundamentais: disponibilidade (D), desempenho (P) e qualidade (Q). A relação entre esses indicadores pode ser expressa pela Equação 5, que representa a eficiência global do equipamento a partir da multiplicação dessas três variáveis.

$$OEE = D \cdot P \cdot Q \quad (5)$$

A disponibilidade está associada ao tempo em que o equipamento permanece efetivamente em operação, descontando-se paradas não planejadas, como falhas e inter-

venções corretivas. Dessa forma, esse fator reflete diretamente a influência da confiabilidade e da manutenibilidade do ativo no processo produtivo.

A performance, por sua vez, avalia se o equipamento está operando na sua capacidade nominal, considerando perdas relacionadas à redução de velocidade, pequenas paradas e ineficiências operacionais. Esse indicador compara a produção real com a produção teórica esperada em condições ideais.

Já o fator qualidade representa a proporção de produtos conformes em relação ao total produzido, indicando perdas associadas à geração de refugos, retrabalhos ou produtos fora de especificação.

De forma mais detalhada, cada um desses fatores pode ser expresso por relações matemáticas específicas. A disponibilidade, por exemplo, representa a proporção do tempo em que o equipamento permaneceu efetivamente em operação em relação ao tempo total programado para produção. Essa relação é apresentada na Equação 6.

$$D = \frac{T_{Op}}{T_p} \quad (6)$$

O fator desempenho (ou performance) mede a capacidade do equipamento de operar na velocidade prevista, comparando a produção efetivamente realizada com a produção teórica que poderia ser obtida nas condições ideais de operação. Essa relação é expressa pela Equação 7.

$$P = \frac{P_R}{P_T} \quad (7)$$

O fator qualidade avalia a proporção de produtos que atendem aos padrões especificados em relação ao total produzido. Esse indicador permite mensurar o impacto de defeitos, retrabalhos e refugos sobre a eficiência global do processo produtivo. Sua expressão matemática é apresentada na Equação 8.

$$Q = \frac{N_B}{N_T} \quad (8)$$

A análise conjunta desses três componentes permite identificar com maior precisão

as principais fontes de perda em um sistema produtivo, possibilitando a definição de estratégias mais eficazes de manutenção e melhoria contínua.

Dessa forma, o *OEE* se consolida como uma ferramenta essencial para a gestão industrial, especialmente quando utilizada em conjunto com indicadores de confiabilidade, como o *MTBF* e o *MTTR*, permitindo uma abordagem integrada entre manutenção e produção.

2.8 A indústria química:

A indústria de celulose mantém uma relação tecnológica e produtiva direta com as indústrias responsáveis pela produção de clorato de sódio e dióxido de cloro, uma vez que esses compostos químicos constituem insumos fundamentais para o processo moderno de branqueamento da polpa celulósica. Essa interdependência industrial consolidou-se ao longo da evolução tecnológica do setor, principalmente em resposta às exigências ambientais e à necessidade de melhoria da eficiência e da qualidade do produto final (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

O dióxido de cloro (ClO_2) tornou-se o principal agente oxidante empregado nas etapas de branqueamento da celulose produzida pelo processo kraft, amplamente adotado na indústria mundial. Sua utilização permite a remoção seletiva da lignina residual presente na polpa, promovendo elevados níveis de alvura com menor degradação das fibras de celulose. Além disso, o uso desse composto reduz significativamente a formação de compostos organoclorados nos efluentes industriais, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental associado ao processo produtivo (BAJPAI, 2012).

Nesse contexto, o clorato de sódio ($NaClO_3$) assume papel estratégico, pois é o principal precursor químico utilizado na geração industrial de dióxido de cloro. Devido à instabilidade química do dióxido de cloro e aos riscos relacionados ao seu armazenamento e transporte, sua produção ocorre, em geral, de forma local, por meio de sistemas geradores instalados nas próprias unidades industriais de celulose ou em complexos industriais integrados. O dióxido de cloro é produzido continuamente a partir da redução química do clorato de sódio em reatores específicos, operando sob condições rigorosamente controladas para garantir segurança operacional e fornecimento contínuo ao processo de branqueamento (BAJPAI, 2012).

Essa configuração resulta em elevada integração operacional entre os setores químico e de celulose, caracterizando uma cadeia produtiva interdependente. A produção contínua

de dióxido de cloro é essencial para a estabilidade do processo de branqueamento, tornando os sistemas associados ativos críticos dentro da planta industrial. Qualquer interrupção no fornecimento desse reagente pode impactar diretamente a produtividade da fábrica, ocasionando redução de capacidade operacional ou paradas não programadas (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

Sob a ótica da engenharia e da gestão da manutenção, os sistemas de produção de clorato de sódio e geração de dióxido de cloro apresentam elevada complexidade operacional, envolvendo equipamentos eletroquímicos, reatores químicos, sistemas de vácuo, bombas de processo, trocadores de calor e instrumentos de controle avançado. Dessa forma, a confiabilidade desses ativos torna-se fator determinante para assegurar a continuidade operacional e a estabilidade do processo produtivo da celulose (MOUBRAY, 1997).

Adicionalmente, a produção de clorato de sódio caracteriza-se por elevado consumo energético, uma vez que ocorre por meio de processos eletroquímicos intensivos em energia elétrica. Em contrapartida, unidades industriais de celulose frequentemente apresentam elevada capacidade de geração energética própria, proveniente do aproveitamento energético de subprodutos do processo produtivo. Essa complementaridade favorece a formação de polos industriais integrados, nos quais há otimização do uso de recursos energéticos e maior eficiência global do sistema produtivo (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

2.8.1 Produção do clorato de sódio ($NaClO_3$)

O clorato de sódio ($NaClO_3$) é produzido industrialmente por meio de um processo eletroquímico contínuo, baseado na eletrólise de soluções aquosas de cloreto de sódio (NaCl). Trata-se de um processo altamente intensivo em energia elétrica e que exige rigoroso controle operacional, uma vez que envolve reações químicas simultâneas, transferência de massa e fenômenos eletroquímicos que influenciam diretamente o rendimento e a segurança da operação.

O processo inicia-se com a preparação da salmoura, obtida pela dissolução de cloreto de sódio em água desmineralizada. Essa solução passa por etapas de purificação química destinadas à remoção de impurezas metálicas, como cálcio, magnésio e ferro, que podem provocar incrustações, contaminação do produto ou redução da eficiência das células eletrolíticas. A qualidade da salmoura constitui um fator crítico, pois pequenas concentrações de contaminantes podem afetar significativamente o desempenho ele-

troquímico do sistema.

Após o tratamento, a salmoura é alimentada nas células eletrolíticas, onde ocorre a eletrólise em temperaturas elevadas, normalmente entre 80 °C e 90 °C. Nessas células, aplicam-se correntes elétricas intensas entre ânodos e cátodos imersos na solução. No ânodo ocorre a oxidação dos íons cloreto (Cl^-), formando inicialmente cloro molecular (Cl_2). Esse cloro reage imediatamente com a água presente no meio, formando ácido hipocloroso e íons hipoclorito. Em condições controladas de temperatura, concentração e pH, o hipoclorito sofre reações subsequentes de desproporcionamento químico, resultando na formação do íon clorato (ClO_3^-).

De forma simplificada, o processo global pode ser entendido como uma sequência de etapas eletroquímicas e químicas acopladas, nas quais o cloreto é progressivamente oxidado até atingir o estado de oxidação correspondente ao clorato. A eficiência dessa conversão depende fortemente de parâmetros operacionais como densidade de corrente, temperatura, concentração de eletrólito, tempo de residência e hidrodinâmica do reator eletrolítico.

Durante a eletrólise, ocorre simultaneamente a geração de hidrogênio gasoso no cátodo, proveniente da redução da água. Esse hidrogênio é normalmente coletado e tratado, podendo ser utilizado como combustível energético dentro da própria planta industrial, contribuindo para a eficiência energética do processo. Entretanto, devido ao seu caráter inflamável, o controle da ventilação e dos sistemas de segurança é essencial para evitar riscos operacionais.

À medida que a reação avança, a concentração de clorato de sódio na solução aumenta gradualmente até atingir níveis adequados para cristalização. A solução eletrolítica é então direcionada para etapas de evaporação e cristalização, nas quais o clorato de sódio é separado na forma sólida. O controle térmico nessa fase é fundamental para garantir o tamanho adequado dos cristais, pureza do produto e facilidade nas etapas posteriores de separação sólido-líquido.

Após a cristalização, os cristais passam por processos de centrifugação, lavagem e secagem, resultando no produto final com elevada pureza química. A solução remanescente, conhecida como licor-mãe, é normalmente reciclada ao processo, aumentando o aproveitamento de matéria-prima e reduzindo perdas operacionais.

Do ponto de vista industrial, a produção de clorato de sódio apresenta algumas ca-

racterísticas operacionais relevantes. Primeiramente, trata-se de um processo contínuo, no qual interrupções podem gerar instabilidades químicas e perdas energéticas significativas. Em segundo lugar, o consumo específico de energia elétrica representa a principal parcela do custo operacional, tornando a eficiência eletroquímica um indicador-chave de desempenho. Por fim, os equipamentos envolvidos especialmente células eletrolíticas, sistemas de circulação, trocadores de calor e evaporadores operam sob condições severas de temperatura, corrosividade e carga elétrica elevada, exigindo estratégias robustas de manutenção e monitoramento de condição.

Sob a ótica da confiabilidade industrial, pequenas variações operacionais podem resultar em formação de subprodutos indesejados, incrustações ou degradação dos eletrodos, impactando diretamente a eficiência do processo e a disponibilidade dos ativos. Dessa forma, a integração entre controle de processo, engenharia química e gestão da manutenção torna-se essencial para garantir estabilidade operacional, segurança e competitividade econômica da produção.

Assim, o processo de produção do clorato de sódio pode ser compreendido como um sistema eletroquímico complexo e energeticamente intensivo, cuja eficiência depende do equilíbrio entre variáveis químicas, elétricas e mecânicas, sendo um exemplo representativo da forte interação entre engenharia de processos e engenharia de manutenção em ambientes industriais contínuos.

2.8.2 Produção do dióxido de cloro (ClO_2)

O dióxido de cloro (ClO_2) é produzido industrialmente por meio de processos químicos de redução do clorato de sódio, sendo amplamente utilizado como agente oxidante seletivo no branqueamento da polpa celulósica. Devido à sua elevada instabilidade química e ao potencial risco associado ao armazenamento e transporte, o dióxido de cloro é normalmente gerado no próprio local de consumo, por meio de sistemas de produção contínua integrados às unidades industriais (BAJPAI, 2012; GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

As principais matérias-primas utilizadas na produção de dióxido de cloro são o clorato de sódio ($NaClO_3$), a água, e um agente redutor, que pode variar conforme a tecnologia empregada. Entre os redutores mais utilizados destacam-se o metanol (CH_3OH), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o dióxido de enxofre (SO_2). Além desses insumos principais, utiliza-se também ácido sulfúrico (H_2SO_4), responsável por fornecer o meio ácido necessário para que as reações químicas ocorram de maneira eficiente (BAJPAI, 2012).

O processo ocorre em reatores conhecidos como geradores de dióxido de cloro, nos quais o clorato de sódio é reduzido em meio ácido sob condições controladas de temperatura, pressão e concentração. A reação química promove a conversão do íon clorato em dióxido de cloro gasoso, formando simultaneamente subprodutos, principalmente sulfato de sódio (Na_2SO_4), dependendo da rota tecnológica adotada (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

De forma simplificada, o princípio do processo consiste na redução controlada do clorato em ambiente ácido, permitindo a formação seletiva do dióxido de cloro sem a geração significativa de cloro elementar. O controle rigoroso das condições operacionais é essencial, pois desvios de concentração, temperatura ou acidez podem favorecer reações paralelas indesejadas, comprometendo o rendimento do processo e a segurança operacional (BAJPAI, 2012).

O dióxido de cloro gerado apresenta-se na fase gasosa e, devido à sua natureza explosiva em altas concentrações, é imediatamente diluído e absorvido em água fria em colunas de absorção, formando uma solução aquosa de dióxido de cloro. Essa solução é então armazenada temporariamente em tanques apropriados e enviada diretamente às etapas de branqueamento da celulose, sendo consumida quase que imediatamente após sua produção (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

Durante o processo, ocorre também a formação de subprodutos sólidos dissolvidos na solução reacional, especialmente sulfato de sódio, que pode ser removido por cristalização e separado do meio reacional. Em algumas configurações industriais, esse subproduto pode ser reaproveitado em outros processos químicos, contribuindo para a eficiência global do sistema produtivo (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 1999).

Do ponto de vista operacional, a geração de dióxido de cloro caracteriza-se como um processo contínuo e altamente sensível a variações operacionais. Os sistemas envolvidos incluem reatores químicos, colunas de absorção, sistemas de vácuo, trocadores de calor, bombas de circulação e instrumentação de controle avançada. A operação ocorre geralmente sob pressão negativa (vácuo parcial), condição adotada como medida de segurança para evitar vazamentos do gás para o ambiente industrial (BAJPAI, 2012).

Sob a ótica da engenharia de manutenção e confiabilidade, os sistemas de produção de dióxido de cloro são considerados ativos críticos dentro da cadeia produtiva da celulose. A interrupção da geração do reagente impacta diretamente o processo de branqueamento, podendo resultar em perdas produtivas significativas. Além disso, o ambiente

altamente oxidante e ácido favorece mecanismos de corrosão química, exigindo seleção adequada de materiais, inspeções periódicas e estratégias robustas de manutenção preventiva e preditiva (MOUBRAY, 1997).

Outro aspecto relevante refere-se à segurança operacional. O dióxido de cloro é um gás altamente reativo e potencialmente explosivo em determinadas concentrações, tornando indispensável o monitoramento contínuo de variáveis como concentração, temperatura, pressão e vazão. Sistemas redundantes de controle e instrumentação são frequentemente empregados para garantir operação segura e estável (BAJPAI, 2012).

2.8.3 Equipamentos de controle térmico

Os equipamentos de controle térmico possuem papel fundamental em plantas industriais de processo contínuo, especialmente em indústrias químicas, nas quais a temperatura influencia diretamente a eficiência das reações, a estabilidade operacional, a segurança do processo e a qualidade do produto final. De modo geral, esses equipamentos têm como função remover, fornecer ou transferir calor entre sistemas, mantendo fluidos, equipamentos e ambientes dentro de faixas adequadas de operação. Entre os principais exemplos presentes em ambientes industriais destacam-se trocadores de calor, chillers, condensadores, evaporadores, torres de resfriamento e sistemas auxiliares de água gelada ou água de resfriamento.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, o funcionamento desses equipamentos está diretamente relacionado aos princípios da termodinâmica e da transferência de calor. Conforme apresentado por Incropera et al. (2008), os mecanismos de condução, convecção e radiação determinam a forma como a energia térmica é transferida entre superfícies, fluidos e componentes. Em equipamentos industriais, a troca térmica ocorre predominantemente por condução através das paredes metálicas e por convecção entre os fluidos em movimento, sendo influenciada por parâmetros como vazão, diferença de temperatura, área de troca térmica, propriedades dos fluidos e condições de escoamento.

Em plantas químicas, os trocadores de calor são amplamente utilizados para aquecer ou resfriar correntes de processo, recuperar energia térmica e manter condições operacionais adequadas. Já os chillers são empregados em sistemas que demandam remoção controlada de calor, geralmente por meio de ciclos de refrigeração, nos quais ocorre a circulação de um fluido refrigerante entre etapas de compressão, condensação, expansão e evaporação. Segundo Çengel e Boles (2013), os ciclos de refrigeração por compressão de vapor são amplamente aplicados em sistemas industriais devido à sua capacidade de

retirar calor de uma região de menor temperatura e rejeitá-lo para uma região de maior temperatura mediante o fornecimento de trabalho ao compressor.

A confiabilidade dos equipamentos de controle térmico é essencial para a continuidade operacional, pois sua perda de desempenho pode provocar instabilidade de temperatura, redução da eficiência energética, sobrecarga de outros sistemas, paradas não programadas e aumento dos custos de manutenção. Em chillers, por exemplo, falhas em compressores, condensadores, evaporadores, válvulas de expansão, sensores, sistemas de lubrificação ou circuitos de controle podem comprometer a capacidade de refrigeração do equipamento. Além disso, problemas como incrustação, obstrução, vazamentos, corrosão e baixa eficiência na troca térmica podem reduzir progressivamente o desempenho térmico do sistema.

Segundo Stoecker e Jones (1985), sistemas de refrigeração industrial exigem controle adequado de variáveis como pressão, temperatura, carga térmica, superaquecimento, sub-resfriamento e condições do fluido refrigerante, uma vez que pequenas alterações operacionais podem impactar significativamente o rendimento do ciclo. Dessa forma, a manutenção desses equipamentos deve considerar tanto os aspectos mecânicos quanto os térmicos e operacionais, integrando inspeções periódicas, limpeza de superfícies de troca térmica, verificação de vazamentos, análise de vibração, controle de parâmetros de processo e acompanhamento da eficiência energética.

Nesse contexto, os equipamentos de controle térmico devem ser tratados como ativos críticos dentro da gestão da manutenção, principalmente quando sua operação está associada à estabilidade de processos químicos contínuos. A aplicação de estratégias preventivas e preditivas, aliada ao acompanhamento de indicadores como disponibilidade, *MTBF* e *MTTR*, permite identificar perdas de desempenho, antecipar falhas e melhorar a confiabilidade operacional. Assim, o estudo desses equipamentos contribui para compreender a relação entre controle térmico, continuidade produtiva, custos de manutenção e desempenho dos ativos industriais.

2.9 Principais ativos mecânicos e operacionais da planta química

Em uma indústria química de processo contínuo, os sistemas produtivos dependem da atuação integrada de diferentes tipos de equipamentos mecânicos, térmicos e auxiliares. Entre os principais ativos presentes nesse ambiente destacam-se equipamentos rotativos, como bombas, ventiladores, compressores e chillers, responsáveis pela movimentação de fluidos, controle térmico e manutenção das condições operacionais do

processo. Esses equipamentos estão sujeitos a falhas associadas a vibração, desalinhamento, desgaste de rolamentos, vazamentos, perda de rendimento e degradação de componentes.

Além dos equipamentos rotativos, também são relevantes os equipamentos estáticos e de processo, como tanques, filtros, tubulações, válvulas, trocadores de calor e estruturas de suporte. Esses ativos exercem funções essenciais relacionadas ao armazenamento, transporte, separação, troca térmica e controle do escoamento de fluidos. Em função das características químicas do processo, tais equipamentos podem estar sujeitos a mecanismos de falha como corrosão, incrustação, obstrução, fadiga, vazamentos e degradação térmica. Dessa forma, conhecer os principais tipos de equipamentos presentes na planta estudada contribui para compreender a criticidade dos ativos, os modos de falha mais recorrentes e a importância das ferramentas de gestão da manutenção aplicadas ao longo deste trabalho.

2.9.1 Equipamentos rotativos

Os equipamentos rotativos representam uma das classes mais relevantes de ativos mecânicos em plantas industriais, especialmente em processos químicos contínuos, nos quais há necessidade permanente de movimentação de fluidos, controle de vazão, pressurização, resfriamento, ventilação e transferência de energia mecânica. De modo geral, esse grupo compreende máquinas que possuem componentes em movimento de rotação, como eixos, rotores, mancais, rolamentos, acoplamentos, selos mecânicos e elementos de transmissão. Entre os principais exemplos presentes no ambiente industrial destacam-se bombas centrífugas, ventiladores, compressores, agitadores, turbinas e conjuntos associados a sistemas de refrigeração, como chillers.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, o desempenho desses equipamentos está diretamente relacionado ao correto dimensionamento e funcionamento de seus elementos de máquina. Eixos, mancais, rolamentos, acoplamentos e rotores devem suportar esforços de torção, flexão, cargas dinâmicas, vibrações e variações térmicas durante a operação. Conforme discutido por Shigley, Mischke e Budynas (2005), elementos mecânicos submetidos a carregamentos cíclicos estão sujeitos a processos de fadiga, desgaste e perda progressiva de desempenho, tornando essencial o controle das condições operacionais e das solicitações mecânicas ao longo da vida útil do equipamento.

Em plantas químicas, os equipamentos rotativos assumem papel crítico devido à

sua influência direta sobre a continuidade operacional do processo. Bombas são responsáveis pelo transporte de soluções, reagentes e utilidades industriais; ventiladores atuam em sistemas de resfriamento, exaustão e circulação de ar; compressores realizam a elevação de pressão de gases; e chillers contribuem para o controle térmico de sistemas que dependem de refrigeração. Dessa forma, a falha de um equipamento rotativo pode provocar perda de capacidade produtiva, instabilidade operacional, paradas não programadas e aumento dos custos de manutenção.

As falhas mais comuns em equipamentos rotativos estão associadas a desalinhamento, desbalanceamento, folgas mecânicas, desgaste de rolamentos, falhas de lubrificação, cavitação em bombas, vibração excessiva, falhas em selos mecânicos e degradação de acoplamentos. Segundo Bloch e Geitner (2012), a análise dessas falhas exige a compreensão conjunta dos aspectos mecânicos, operacionais e de manutenção, uma vez que muitos problemas não resultam apenas do componente em si, mas também de condições inadequadas de instalação, operação, lubrificação ou planejamento das intervenções.

Nesse contexto, a manutenção dos equipamentos rotativos demanda estratégias estruturadas de acompanhamento e controle. Técnicas como análise de vibração, termografia, inspeções periódicas, controle de lubrificação, alinhamento de eixos e balanceamento de rotores são amplamente utilizadas para identificar sinais de degradação antes da ocorrência de falhas funcionais. De acordo com Mobley (2002), a manutenção preditiva aplicada a máquinas rotativas permite aumentar a confiabilidade dos ativos, reduzir paradas inesperadas e otimizar a programação das intervenções, contribuindo diretamente para a melhoria dos indicadores de desempenho da manutenção.

Portanto, os equipamentos rotativos constituem ativos fundamentais para a confiabilidade e disponibilidade de uma planta química. Por apresentarem elevada dependência de condições operacionais adequadas e por estarem sujeitos a esforços dinâmicos constantes, esses equipamentos exigem acompanhamento técnico rigoroso e integração entre operação, manutenção e engenharia. Assim, sua análise dentro de um estudo de gestão da manutenção torna-se relevante, pois permite compreender a relação entre modos de falha, planejamento das intervenções, custos de manutenção e desempenho operacional dos sistemas produtivos.

2.9.2 Equipamentos estáticos

Os equipamentos estáticos representam uma classe essencial de ativos em plantas industriais químicas, sendo caracterizados pela ausência de partes móveis princi-

pais durante sua operação. Diferentemente dos equipamentos rotativos, cujo funcionamento depende do movimento contínuo de eixos, rotores ou impelidores, os equipamentos estáticos exercem funções associadas ao armazenamento, contenção, condução, separação, troca térmica e controle do escoamento de fluidos. Entre os principais exemplos presentes em ambientes industriais destacam-se tanques, vasos de pressão, tubulações, filtros, válvulas, colunas, reservatórios, trocadores de calor e estruturas de suporte.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, esses equipamentos devem ser projetados e mantidos considerando solicitações como pressão interna, peso próprio, esforços térmicos, cargas de tubulação, vibrações transmitidas por equipamentos próximos, corrosão, fadiga e variações de temperatura. Conforme discutido por Shigley, Mischke e Budynas (2005), componentes mecânicos submetidos a tensões estáticas e variáveis devem ser avaliados quanto à resistência dos materiais, concentração de tensões, deformações admissíveis e possibilidade de falha ao longo da vida útil. Assim, mesmo sem possuírem movimento próprio, os equipamentos estáticos estão sujeitos a mecanismos de degradação que podem comprometer sua integridade estrutural e operacional.

Em indústrias químicas, os equipamentos estáticos assumem elevada importância devido ao contato direto com fluidos de processo, reagentes, produtos químicos, utilidades industriais e condições operacionais severas. Tanques e vasos são responsáveis pelo armazenamento ou processamento de substâncias sob determinadas condições de pressão e temperatura; tubulações e válvulas garantem o transporte e o controle do escoamento; filtros realizam a retenção de partículas e impurezas; e trocadores de calor promovem a transferência de energia térmica entre correntes de processo. Dessa forma, falhas nesses ativos podem resultar em vazamentos, perda de contenção, contaminação, redução da eficiência do processo, riscos ambientais e paradas não programadas.

Os principais mecanismos de falha associados aos equipamentos estáticos incluem corrosão interna e externa, erosão, incrustação, obstrução, trincas, vazamentos em juntas e flanges, degradação de revestimentos, deformações permanentes e falhas por fadiga térmica ou mecânica. Segundo Callister e Rethwisch (2016), a seleção adequada dos materiais é fundamental para garantir o desempenho dos componentes em serviço, especialmente quando há exposição a meios corrosivos, temperaturas elevadas ou esforços mecânicos contínuos. Nesse sentido, a compatibilidade entre material, fluido de processo e condição operacional torna-se um fator determinante para a confiabilidade desses equipamentos.

A manutenção dos equipamentos estáticos exige estratégias voltadas principalmente

à inspeção, integridade mecânica e prevenção da degradação progressiva. Atividades como inspeções visuais, ensaios não destrutivos, medição de espessura, verificação de corrosão, análise de vazamentos, inspeção de juntas, limpeza interna, avaliação de suportes e acompanhamento de condições operacionais são fundamentais para identificar anomalias antes que evoluam para falhas funcionais. De acordo com Megyesy (2008), vasos de pressão e equipamentos sujeitos à pressão devem ser acompanhados com atenção especial, pois pequenas perdas de espessura, defeitos de fabricação, corrosão localizada ou concentrações de tensão podem comprometer a segurança e a vida útil do equipamento.

Portanto, os equipamentos estáticos constituem ativos fundamentais para a confiabilidade, segurança e continuidade operacional de uma planta química. Embora não apresentem componentes rotativos, sua falha pode gerar consequências significativas para o processo produtivo, principalmente em sistemas que operam com fluidos corrosivos, pressurizados ou termicamente exigentes. Dessa forma, sua análise dentro da gestão da manutenção permite compreender a importância da integridade mecânica, da correta seleção de materiais, da inspeção periódica e do planejamento das intervenções para a redução de falhas, custos e riscos operacionais.

3 Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado voltado à análise e melhoria do desempenho da manutenção industrial, tendo como foco a disponibilidade e a confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química produtora de clorato de sódio e dióxido de cloro. A metodologia adotada foi estruturada de forma a integrar análise teórica, levantamento de dados industriais reais e aplicação prática de ferramentas de gestão da manutenção.

O recorte temporal adotado compreende os anos de 2024 e 2025, escolha justificada pela maior consistência e confiabilidade dos dados disponíveis nesse período. Os registros anteriores a 2024 apresentavam inconsistências relacionadas ao preenchimento das ordens de manutenção, variações nos critérios de registro e menor padronização das informações extraídas do sistema, o que poderia comprometer a qualidade da análise e a comparação dos indicadores de manutenção.

Além disso, o período anterior a 2024 corresponde a uma fase em que o executante deste trabalho ainda não estava diretamente inserido no ambiente de manutenção estudado. Dessa forma, haveria maior dificuldade em interpretar corretamente o contexto operacional, os critérios utilizados nos registros e as particularidades das intervenções realizadas. A partir de 2024, com maior proximidade do autor em relação à rotina industrial, tornou-se possível compreender melhor o funcionamento do sistema de manutenção, validar informações, identificar limitações nos dados e analisar os resultados de forma mais coerente com a realidade da planta.

Assim, o ano de 2024 foi utilizado como período inicial de diagnóstico, permitindo avaliar o comportamento da manutenção, identificar falhas, padrões e oportunidades de melhoria. Posteriormente, o ano de 2025 foi analisado como período de comparação, considerando a aplicação das melhorias propostas e a verificação dos impactos obtidos nos indicadores de disponibilidade, confiabilidade e desempenho da manutenção. Portanto, embora o estudo esteja limitado a dois anos, esse recorte temporal foi adotado de forma intencional, priorizando a qualidade, a rastreabilidade e a confiabilidade dos dados analisados.

3.1 Levantamento dos dados

A metodologia adotada nesta etapa foi baseada em um estudo de caso aplicado ao ambiente industrial, com abordagem predominantemente quantitativa, a partir da coleta e

análise de dados históricos de manutenção. O objetivo principal foi transformar registros operacionais dispersos em informações estruturadas, capazes de representar o comportamento dos equipamentos ao longo do tempo e sustentar as análises de disponibilidade, confiabilidade e desempenho da manutenção.

A principal fonte de dados utilizada foi o sistema SAP, empregado pela empresa para o gerenciamento das atividades de manutenção. Esse sistema atua como uma ferramenta informatizada de gestão da manutenção, permitindo o registro e o acompanhamento de ordens de serviço, históricos de falhas, tipos de intervenção, datas de abertura e encerramento, centro de trabalho responsável, status das ordens e custos associados às atividades executadas.

Para a extração das informações, foi utilizada a transação IW38 do SAP, que permite consultar ordens de manutenção por meio de diferentes filtros, como equipamento, localização funcional, período de análise, tipo de ordem, prioridade, status e centro de trabalho. A utilização desses filtros possibilitou a seleção dos registros relevantes para o estudo, garantindo maior rastreabilidade e padronização na coleta dos dados.

Foram considerados, principalmente, os registros de ordens de serviço corretivas, preventivas e de melhoria. As ordens corretivas foram utilizadas para identificar falhas já ocorridas e intervenções não planejadas, enquanto as ordens preventivas permitiram avaliar o nível de planejamento aplicado à manutenção dos ativos. Já as ordens relacionadas a melhorias foram analisadas por representarem ações voltadas à otimização do desempenho e à redução da recorrência de falhas.

Após a extração, os dados passaram por uma etapa de organização e tratamento, com o objetivo de eliminar inconsistências, padronizar nomenclaturas e classificar corretamente os registros conforme o tipo de manutenção. Essa etapa foi necessária devido ao elevado volume de informações extraídas do sistema e à possibilidade de existência de registros incompletos, duplicados ou preenchidos de forma não padronizada.

Além dos dados obtidos no SAP, também foram analisados documentos complementares, como planos de manutenção preventiva, históricos operacionais e informações técnicas dos equipamentos. Esses documentos permitiram verificar a relação entre as atividades planejadas e as intervenções efetivamente executadas, contribuindo para uma avaliação mais completa do cenário da manutenção.

A partir dos dados tratados, tornou-se possível calcular e interpretar indicadores de

manutenção, como disponibilidade, *MTBF* e *MTTR*, além de avaliar a distribuição das ordens de serviço, a frequência de falhas e os custos associados aos ativos. Dessa forma, a coleta e o tratamento dos dados forneceram a base necessária para o diagnóstico da situação atual, a identificação dos equipamentos críticos e a proposição de melhorias no processo de gestão da manutenção.

3.2 Extração dos dados brutos

A extração dos dados foi realizada por meio do sistema *SAP* cuja interface esta sendo apresentada na Figura 2, utilizando a transação “IW38”, ferramenta empregada para consulta e acompanhamento das ordens de manutenção registradas pela empresa. Essa etapa teve como objetivo obter uma base histórica confiável das intervenções realizadas nos ativos, permitindo a posterior análise dos indicadores de manutenção, custos e tipos de serviço executados.

Figura 2 – Interface inicial da plataforma SAP

The screenshot displays the SAP 'PM order list: Selection of Orders' screen. At the top, there is a menu bar with 'Variant', 'Edit', 'Goto', 'System', and 'Help'. Below this is a toolbar with various icons for navigation and actions. The main header area includes 'Attributes', 'Settlement Receivers', and 'PRT'. The 'Order status' section contains checkboxes for 'Outstanding', 'In process', 'Completed', and 'Historical', along with a 'Sel.profil' field and an 'Addr.' button. The 'Order selection' section is a large area with multiple rows of input fields for criteria such as 'Order', 'Order Type', 'Functional location', 'Equipment', 'Material', 'Serial number', 'Addit. device data', 'Notification', 'Main work center', 'Plant for WorkCenter', 'Period', 'Partners', and 'Currency'. Each row has a 'to' field and a yellow arrow button. A red box highlights the 'Order' and 'Order Type' fields and their corresponding 'to' fields and arrow buttons.

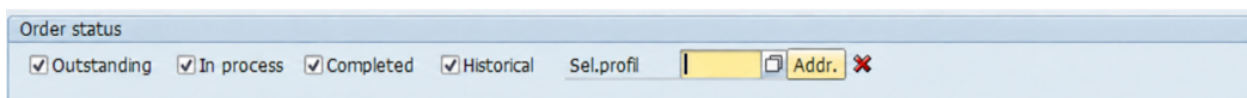
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para garantir que os dados extraídos estivessem alinhados ao estudo, foram definidos filtros específicos dentro do sistema, considerando o equipamento analisado, o período de avaliação, o tipo de ordem, o centro de trabalho responsável e o status das ordens

de serviço. Dessa forma, foi possível selecionar apenas os registros relevantes para a pesquisa, evitando a inclusão de informações que não contribuíssem diretamente para a análise proposta.

O primeiro filtro foi aplicado logo no cabeçalho da operação, onde foram selecionados os seguintes parâmetros, apresentados na Figura 3

Figura 3 – Cabeçalho parametrizado para coleta de dados

A imagem mostra a interface de usuário do SAP, especificamente a aba "Order status". No topo, há uma barra de ferramentas com quatro botões de seleção: "Outstanding", "In process", "Completed" e "Historical", todos com a caixa de seleção marcada. À direita desses botões, há um campo de texto rotulado "Sel.profil" e um botão "Addr." com um ícone de documento e uma seta vermelha. O fundo da interface é azul claro.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 3 apresenta a aba "Order status", utilizada no SAP para definir quais ordens de manutenção serão consideradas durante a consulta. Essa etapa é importante porque permite filtrar os registros conforme a situação operacional da ordem, garantindo que a extração dos dados contemple apenas os documentos relevantes para a análise da manutenção. Ao selecionar as caixas disponíveis, o usuário amplia ou restringe o histórico consultado, influenciando diretamente a quantidade e o tipo de ordens retornadas pelo sistema.

A opção "*Outstanding*" corresponde às ordens ainda pendentes, ou seja, ordens criadas no sistema, mas que ainda não foram finalizadas. A opção "*In process*" representa as ordens em andamento, nas quais a execução da manutenção já foi iniciada, mas ainda não concluída. A opção "*Completed*" permite incluir ordens tecnicamente concluídas, indicando que a intervenção foi realizada e encerrada do ponto de vista operacional. Por fim, a opção "*Historical*" contempla ordens arquivadas ou pertencentes ao histórico do sistema, utilizadas principalmente para consultas de períodos anteriores e análises retrospectivas.

Dessa forma, ao marcar todas as caixas, a pesquisa passa a considerar ordens em diferentes estágios do ciclo de manutenção, desde as pendentes até as já concluídas e históricas. Essa configuração é recomendada quando o objetivo é realizar uma análise ampla do histórico de manutenção, evitando a exclusão de registros que possam interferir nos indicadores de desempenho, como quantidade de ordens, tipos de intervenção, custos, tempo de parada e confiabilidade dos ativos.

A Figura 4 apresenta a aba "*Order selection*", utilizada no SAP para definir os critérios

de filtragem das ordens de manutenção que serão consultadas. Nessa etapa, o campo "Period" foi preenchido com o intervalo de "01.01.2024" a "31.12.2025", delimitando o período de análise considerado no estudo. Esse preenchimento é fundamental para garantir que a extração dos dados contemple apenas as ordens geradas dentro do horizonte temporal definido para a pesquisa.

Figura 4 – Interface inicial da plataforma SAP

Order selection			
Order		to	
Order Type		to	
Functional location		to	
Equipment		to	
Material		to	
Serial number		to	
Addit. device data		to	
Notification		to	
Main work center		to	
Plant for WorkCenter		to	
Period	01.01.2024	to	31.12.2025
Partners			
Currency			

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O primeiro campo do período corresponde à data inicial da consulta, ou seja, o ponto a partir do qual o sistema passa a considerar as ordens de manutenção registradas. Já o segundo campo representa a data final, limitando a busca até o último dia do intervalo estabelecido. Dessa forma, ao inserir as datas de início e término, o SAP retorna somente os registros compreendidos entre os anos de 2024 e 2025, permitindo a comparação entre os dois períodos analisados.

Além do campo "Period", a aba "Order selection" também permite aplicar outros filtros, como número da ordem, tipo de ordem, localização funcional, equipamento, material, centro de trabalho e notificações. Entretanto, para uma análise ampla do histórico de manutenção, o preenchimento do período se destaca como um dos critérios mais importantes, pois organiza a base de dados conforme o recorte temporal adotado na metodologia. Assim, essa configuração contribui para a padronização da coleta de dados e para a confiabilidade das análises posteriores relacionadas às ordens de manutenção. Uma vez que as adequações foram feitas, podemos rodar a transação e obter os dados em sua forma mais Bruta

3.3 Lapidação dos dados

Mesmo depois de realizar um certo polimento na estratificação primária da base de dados, ainda existem muitas outras informações desnecessárias presentes nos dados obtidos. Para tanto, internamente na aba que mostra os dados brutos, é possível editar o layout dos dados e deixar apenas aquelas colunas que são de real interesse para a pesquisa.

Logo foi configurado um layout específico no SAP com as principais colunas necessárias para a análise das ordens de manutenção. Obtendo a primeira base de dados. No entanto o arquivo ainda tinha mais de 2700 linhas contendo os referidos dados que seriam estudados posteriormente.

Com os dados devidamente tabelados no Excel, foram separados os dados referentes ao ano de 2024 e o ano de 2025. Além disso, foram realizadas outras estratificações, subdividindo a tabela em outras menores com intuito de facilitar na compreensão e na análise da vasta lista de dados. Logo foram obtidas três tabelas diferentes, estas apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Assim a primeira tabela Obtida, Tabela 1 é apresentada a baixo e sera responsável por carregar as informações básicas das manutenções realizadas, como ordem equipamento que esta se referenciando, data de inicio, data de termino da manutenção, tipo da manutenção realizada ("zm01"), ("zm02"), ("zm03") e ("zm05"), representando respectivamente, ordens corretivas, ordens preventivas, projetos de melhoria e preventivas legais, priorização da ordem, e os custos atrelados a manutenção

Tabela 1 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 1

Ordem	Equip.	Início	Término	Tipo	Prior.	Custo estim.	Total real	Total plan.
201292482	1020513	01/01/2025	01/01/2025	ZM02	1	0,00	0,00	0,00
201291146	1018726	02/01/2025	02/01/2025	ZM02	3	9.688,23	9.679,10	88,23
201291147	1021941	02/01/2025	02/01/2025	ZM02	3	9.788,23	9.768,49	88,23
201281069	1018684	02/01/2025	03/01/2025	ZM02	2	0,00	1.014,66	1.235,24
201238739	1021341	19/12/2024	03/01/2025	ZM02	3	3.747,24	2.218,62	2.306,86
201207213	1019971	02/01/2025	03/01/2025	ZM02	4	0,00	4.810,84	4.943,07
101107778	1018873	06/01/2025	06/01/2025	ZM01	1	356,00	132,35	0,00
201287024	1020039	06/01/2025	06/01/2025	ZM02	2	0,00	308,81	308,81
101107900	1020275	06/01/2025	06/01/2025	ZM01	1	264,69	0,00	264,69
201273532	1019285	06/01/2025	06/01/2025	ZM02	4	0,00	293,81	308,81
201291056	1019187	07/01/2025	07/01/2025	ZM02	6	0,00	1.858,41	2.099,04
101107774	1019496	03/01/2025	07/01/2025	ZM01	S	4.922,09	1.984,29	4.788,98
201290672	1020147	07/01/2025	07/01/2025	ZM02	5	0,00	132,35	617,61
101108237	1020750	07/01/2025	07/01/2025	ZM01	0	0,00	176,46	176,46
101108530	1020060	08/01/2025	08/01/2025	ZM01	1	132,35	264,70	132,35
101108854	1020039	08/01/2025	08/01/2025	ZM01	S	356,00	308,81	0,00
101068080	1021379	06/01/2025	08/01/2025	ZM01	3	7.723,79	1.381,68	3.926,14
101084100	1019964	09/01/2025	09/01/2025	ZM01	4	1.246,00	264,69	308,81
101089401	1019963	09/01/2025	09/01/2025	ZM01	4	623,00	529,38	617,61
101108840	1019322	08/01/2025	09/01/2025	ZM01	S	972,81	649,01	972,81
201289499	1021341	09/01/2025	09/01/2025	ZM02	2	0,00	10.249,62	10.558,43
201290656	1020068	16/12/2024	09/01/2025	ZM02	3	0,00	533,36	533,36
101104407	1021298	06/01/2025	09/01/2025	ZM01	S	3.568,80	1.706,36	1.764,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim a segunda tabela Obtida, Tabela 2 é apresentada a baixo e será responsável por carregar as informações referentes ao problema que deveria ser resolvido, a oficina que se deveria executar a manutenção e o equipamento a qual estava necessitando da manutenção

Tabela 2 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 2

Ordem	Equip.	Centro	Descrição
201292482	1020513	TLA-PROD	PMP-003 Inversão equipamentos rotativos
201291146	1018726	TLA-EIA	Contrato – serviço mensal Carrier 12/24
201291147	1021941	TLA-EIA	Contrato – mensal Artifrio 12/2024
201281069	1018684	TLA-MECH	PMM-030 Lubrificação equipamentos planta
201238739	1021341	TLA-MECH	F-5812 Confecção 02 hastes reservas
201207213	1019971	TLA-MECH	P-5168 Inst. filtro/coxim/junta exp. flex.
101107778	1018873	TLA-MECH	Vazamento de ECW na tubulação 1”
201287024	1020039	TLA-EIA	PMM-029 Inspeção Chiller
101107900	1020275	TLA-EIA	LT-48211 Falha na indicação
201273532	1019285	TLA-EIA	PME-024 Manutenção Chiller Glauber
201291056	1019187	TLA-MECH	PMM-017 Manut. prevent. centrífuga H-5501
101107774	1019496	TLA-MECH	CX 05A Instalação da caixa
201290672	1020147	TLA-EIA	PMI-005 Inspeção/calibração balança CLO3
101108237	1020750	TLA-EIA	XV-07010 em falha parando envio peróxido
101108530	1020060	TLA-EIA	LC-47101 com falsa indicação
101108854	1020039	TLA-MECH	G-5201 Furo em tubulação cristalizador
101068080	1021379	TLA-MECH	Grade da canaleta danificada
101084100	1019964	TLA-MECH	SP-33 Trincado pote de coleta
101089401	1019963	TLA-MECH	F-5100 Dreno ponto de coleta quebrado
101108840	1019322	TLA-EIA	LV-45202 Válvula travando em área
201289499	1021341	TLA-MECH	PMM-023 Inspeção filtros de sais
201290656	1020068	TLA-MECH	PMM-042 Inspeção gaxeta do cristalizador
101104407	1021298	TLA-MECH	F-5811 Instalar lubrificador de corrente

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim a terceira tabela Obtida, Tabela 3 apresentada abaixo será responsável por carregar as informações referentes ao equipamento, para que seja possível verificar qual equipamento esta em manutenção

Tabela 3 – Dados básicos referentes à manutenção executada – parte 2

Ordem	Equip.	Centro	Descrição
201292482	1020513	TLA-PROD	PMP-003 Inversão equipamentos rotativos
201291146	1018726	TLA-EIA	Contrato – serviço mensal Carrier 12/24
201291147	1021941	TLA-EIA	Contrato – mensal Artifrio 12/2024
201281069	1018684	TLA-MECH	PMM-030 Lubrificação equipamentos planta
201238739	1021341	TLA-MECH	F-5812 Confecção de 02 hastes reservas
201207213	1019971	TLA-MECH	P-5168 Inst. filtro/coxim/junta exp. flex.
101107778	1018873	TLA-MECH	Vazamento de ECW na tubulação 1”
201287024	1020039	TLA-EIA	PMM-029 Inspeção Chiller
101107900	1020275	TLA-EIA	LT-48211 Falha na indicação
201273532	1019285	TLA-EIA	PME-024 Manutenção Chiller Glauber
201291056	1019187	TLA-MECH	PMM-017 Manut. prevent. centrífuga H-5501
101107774	1019496	TLA-MECH	CX 05A Instalação da caixa
201290672	1020147	TLA-EIA	PMI-005 Inspeção/calibração balança CLO3
101108237	1020750	TLA-EIA	XV-07010 em falha parando envio peróxido
101108530	1020060	TLA-EIA	LC-47101 com falsa indicação
101108854	1020039	TLA-MECH	G-5201 Furo em tubulação cristizador
101068080	1021379	TLA-MECH	Grade da canaleta danificada
101084100	1019964	TLA-MECH	SP-33 Trincado pote de coleta
101089401	1019963	TLA-MECH	F-5100 Dreno ponto de coleta quebrado
101108840	1019322	TLA-EIA	LV-45202 Válvula travando em área
201289499	1021341	TLA-MECH	PMM-023 Inspeção filtros de sais
201290656	1020068	TLA-MECH	PMM-042 Inspeção gaxeta do cristizador
101104407	1021298	TLA-MECH	F-5811 Instalar lubrificador de corrente

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Lembrando apenas que os dados apresentados nas tabelas anteriores são apenas uma amostra representativa de como foram estratificados, uma vez que ao somar o ano de 2024 com 2025, temos mais de 2500 linhas com dados para ser analisados, o que inviabiliza colocar todos em uma tabela no trabalho.

3.4 Aplicação das ferramentas de gestão da manutenção e escolha do ativo a ser analisado:

A aplicação das ferramentas de gestão da manutenção representa a etapa da metodologia em que o estudo deixa de possuir caráter exclusivamente diagnóstico e passa a assumir uma abordagem interventiva, voltada à promoção de melhorias estruturadas no desempenho dos sistemas e equipamentos analisados. Após a identificação das fragilidades existentes na gestão da manutenção, serão selecionadas metodologias capazes de atuar diretamente sobre as causas das perdas de disponibilidade e confiabilidade observadas no processo produtivo.

Inicialmente, a aplicação das ferramentas considerará o contexto operacional da indústria química estudada, caracterizado por processos contínuos, elevada criticidade operacional e forte interdependência entre os equipamentos. Além disso, a planta industrial apresenta grande quantidade de ativos operacionais, distribuídos entre diferentes sistemas e etapas do processo produtivo, fator que aumenta a complexidade da gestão da manutenção e dificulta a definição de prioridades para aplicação das análises e intervenções. Nesse cenário, intervenções isoladas tendem a apresentar resultados limitados, tornando necessária uma abordagem sistêmica que integre análise técnica, gestão de dados e planejamento das atividades de manutenção. Dessa forma, a definição das ferramentas utilizadas será orientada diretamente pelos problemas identificados durante a etapa de diagnóstico.

Posteriormente, será realizada a seleção do ativo objeto de estudo por meio da análise histórica das ordens de serviço (W.O.s) registradas no sistema de manutenção da empresa. Essa etapa considerará critérios relacionados à recorrência de falhas, frequência de intervenções corretivas, impacto operacional das paradas e custos associados às atividades de manutenção. Também serão avaliados fatores como criticidade do equipamento para o processo produtivo, influência sobre a continuidade operacional e potencial de aplicação das ferramentas de gestão da manutenção.

A partir da consolidação dessas informações, será conduzida uma análise comparativa entre os ativos avaliados, buscando identificar os equipamentos que apresentem maior relevância em termos de impacto operacional, custos de manutenção e oportunidades de melhoria relacionadas à confiabilidade. A definição do equipamento selecionado terá como objetivo garantir que o estudo seja aplicado em um sistema representativo e compatível com os objetivos da pesquisa, possibilitando avaliar de forma prática os impactos das ferramentas de gestão da manutenção sobre o desempenho operacional do

processo analisado.

A partir da definição do equipamento estudado, realizou-se inicialmente a análise de criticidade do ativo, com a finalidade de priorizar as ações de manutenção conforme o impacto operacional, custos associados à falha, influência na continuidade produtiva e dificuldade de reparo. Essa análise permitiu direcionar os esforços técnicos para os componentes e sistemas com maior relevância operacional, evitando a distribuição uniforme de recursos de manutenção.

Em seguida, foram aplicadas ferramentas voltadas à análise da confiabilidade do equipamento, utilizando indicadores como (*MTBF*), (*MTTR*) e disponibilidade operacional para quantificar o desempenho do chiller e identificar padrões de degradação e recorrência de falhas. Esses indicadores foram utilizados como suporte à tomada de decisão, auxiliando na revisão dos planos de manutenção e na definição de estratégias mais adequadas para melhorar a disponibilidade e reduzir os custos de manutenção do equipamento.

Posteriormente, empregou-se a análise de modos e efeitos de falha como ferramenta estruturada para investigação das principais ocorrências registradas no histórico de manutenção. Essa abordagem permitiu analisar as funções do equipamento, identificar modos de falha recorrentes, determinar suas causas prováveis e avaliar os impactos operacionais associados às falhas identificadas. Com base nessas informações, tornou-se possível redefinir tarefas preventivas e propor a inclusão de técnicas preditivas direcionadas às condições reais de operação do ativo.

A aplicação dos conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade contribuiu para avaliar a efetividade das atividades preventivas existentes, verificando se as intervenções executadas efetivamente reduziam os riscos operacionais do equipamento. Dessa forma, buscou-se eliminar atividades sem impacto significativo na confiabilidade do sistema e direcionar os esforços para ações tecnicamente justificadas.

Paralelamente, princípios da Manutenção Produtiva Total foram considerados com o objetivo de fortalecer a identificação precoce de anomalias operacionais e ampliar a integração entre operação e manutenção. Essa abordagem favoreceu o compartilhamento de informações sobre o estado do equipamento e contribuiu para o fortalecimento da cultura de confiabilidade dentro do ambiente industrial analisado.

Além disso, foram propostas ações voltadas à padronização dos processos de manutenção, incluindo classificação padronizada de falhas, revisão dos procedimentos técnicos

e melhoria na qualidade dos registros das ordens de serviço. Essas medidas tiveram como finalidade aumentar a confiabilidade das informações coletadas e fortalecer o processo contínuo de análise e melhoria da manutenção.

Por fim, a aplicação das ferramentas de gestão da manutenção foi conduzida como parte de um processo contínuo de melhoria, sendo os resultados monitorados por meio de indicadores de desempenho ao longo do estudo. Essa abordagem permitiu avaliar a efetividade das ações implementadas e fornecer suporte técnico para o desenvolvimento de estratégias voltadas ao aumento da confiabilidade, disponibilidade e eficiência operacional do equipamento analisado.

3.5 Definição e acompanhamento dos indicadores:

A etapa de definição e acompanhamento dos indicadores de desempenho será incorporada à metodologia experimental com o objetivo de avaliar, de forma quantitativa, os efeitos das ferramentas de gestão da manutenção aplicadas ao longo do estudo. Essa etapa terá como finalidade verificar se as ações propostas poderão contribuir para melhorias na disponibilidade, confiabilidade e desempenho operacional dos equipamentos analisados.

Após a aplicação das ferramentas de análise de criticidade, análise de modos de falha e revisão dos planos de manutenção, serão estabelecidos indicadores capazes de representar o comportamento operacional dos ativos e a eficiência do sistema de manutenção. A seleção dos indicadores será realizada considerando os objetivos do estudo, especialmente o aumento da confiabilidade dos sistemas mecânicos e a redução de falhas não programadas.

Inicialmente, será definido um conjunto de variáveis relacionadas tanto à ocorrência de falhas quanto à eficiência das intervenções executadas. Serão utilizados indicadores associados à confiabilidade dos equipamentos, permitindo avaliar a frequência de falhas, e indicadores de manutenibilidade, voltados à análise da eficiência dos processos de reparo e restabelecimento operacional.

Entre os principais indicadores adotados, destacam-se o tempo médio entre falhas (*MTBF*), utilizado para avaliar a estabilidade operacional dos equipamentos, e o tempo médio para reparo (*MTTR*), empregado para analisar a eficiência das intervenções de manutenção. Também serão considerados indicadores relacionados à disponibilidade operacional e à incidência de manutenção corretiva, possibilitando uma análise integrada

do desempenho dos ativos.

O monitoramento dos indicadores será realizado de forma contínua ao longo do período de análise, permitindo a observação de tendências operacionais e a comparação entre a condição inicial diagnosticada e o cenário posterior às intervenções propostas. Essa abordagem buscará verificar a consistência dos resultados obtidos e identificar se as melhorias apresentam potencial de sustentabilidade ao longo do tempo.

A metodologia também contemplará a institucionalização do acompanhamento dos indicadores dentro da rotina de gestão da manutenção, por meio da utilização de relatórios técnicos, painéis de monitoramento e reuniões periódicas de análise de desempenho. Essa sistemática buscará transformar os dados coletados em informações de suporte à tomada de decisão e ao processo contínuo de melhoria.

Relembrando que a confiabilidade dos indicadores depende diretamente da qualidade dos dados obtidos nas etapas anteriores da pesquisa, estabelecendo uma relação metodológica entre levantamento de dados, diagnóstico da gestão, aplicação das ferramentas de manutenção, proposição de melhorias e avaliação dos resultados obtidos.

3.6 Proposição de melhorias:

A etapa metodológica de sugestão e aplicação de melhorias foi estruturada a partir da consolidação dos resultados obtidos durante as fases de diagnóstico, levantamento de dados e análise dos indicadores de manutenção. O objetivo dessa etapa consistiu em transformar os dados coletados e as fragilidades identificadas ao longo do estudo em propostas práticas de intervenção, direcionadas ao aumento da confiabilidade operacional, da disponibilidade dos ativos e da eficiência das atividades de manutenção.

Com base na análise histórica das falhas, dos registros de manutenção e do comportamento operacional dos equipamentos avaliados, foram identificados os principais pontos críticos relacionados à gestão da manutenção e ao desempenho dos sistemas produtivos. A partir dessa identificação, foram elaboradas propostas de melhoria voltadas tanto aos aspectos técnicos das intervenções quanto às práticas organizacionais associadas ao processo de manutenção industrial.

Entre as ações consideradas na metodologia, destaca-se a reavaliação dos planos de manutenção preventiva, utilizando como referência os padrões de falha observados, a frequência das intervenções corretivas e os indicadores de desempenho analisados

durante o estudo. Essa revisão teve como finalidade adequar as periodicidades das atividades preventivas às reais condições operacionais dos equipamentos, reduzindo intervenções desnecessárias e minimizando ocorrências de falhas não programadas.

Também foram consideradas melhorias relacionadas à padronização das atividades de manutenção, por meio da revisão de procedimentos operacionais, critérios de inspeção e registros técnicos utilizados pela equipe. A adoção de práticas padronizadas buscou aumentar a confiabilidade das intervenções executadas, reduzir variabilidades operacionais e contribuir para a preservação do conhecimento técnico dentro do ambiente industrial.

Adicionalmente, a metodologia contemplará sugestões direcionadas ao fortalecimento do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), especialmente no que se refere à programação das ordens de serviço, controle do *backlog*, priorização das atividades e aumento da participação da manutenção planejada em relação às intervenções corretivas emergenciais. Paralelamente, serão considerados os princípios da Manutenção Centrada em Confiabilidade (*RCM*), buscando direcionar as estratégias de manutenção de acordo com a criticidade dos equipamentos, os modos de falha identificados e os impactos operacionais associados às falhas funcionais. Essas propostas terão como objetivo melhorar a previsibilidade das atividades de manutenção, otimizar a alocação de recursos e reduzir perdas associadas a paradas não planejadas.

Por fim, as melhorias propostas serão analisadas considerando sua viabilidade operacional e potencial impacto sobre os indicadores de manutenção e desempenho produtivo, permitindo estabelecer recomendações compatíveis com a realidade operacional do sistema estudado e alinhadas aos princípios de confiabilidade e gestão estratégica da manutenção.

4 Análise de Resultados e Discussões

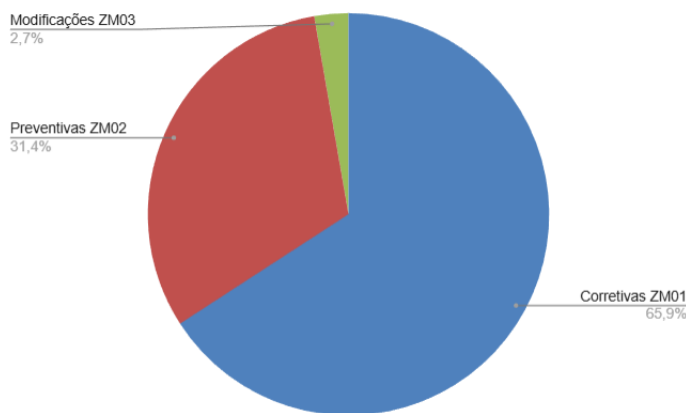
Inicialmente, seguindo a metodologia anteriormente fornecida, realizou-se o levantamento e coleta de dados, etapa fundamental para garantir a confiabilidade das análises subsequentes. Foram reunidas informações provenientes de ordens de serviço, históricos de falhas, planos de manutenção preventiva, registros operacionais dos equipamentos e dados extraídos do sistema de gestão da manutenção utilizado pela organização. Foram consideradas observações em campo e entrevistas técnicas com profissionais da manutenção e operação, possibilitando uma compreensão prática das rotinas executadas e das dificuldades enfrentadas no dia a dia operacional.

4.1 Campanha de manutenção em 2024:

Ao analisar a base de dados com base no histórico de manutenção, observa-se que, para o ano de 2024, foram geradas cerca de 1767 ordens de serviço. Estratificando essas ordens, verifica-se que aproximadamente 1105 estão relacionadas à manutenção corretiva, 616 referem-se à manutenção preventiva e, por fim, cerca de 46 correspondem a projetos de alteração e melhoria. A partir dessa classificação inicial, torna-se possível compreender de forma mais clara o perfil das atividades de manutenção executadas ao longo do período analisado e identificar tendências relevantes para a gestão da manutenção.

Pela Figura 5 podemos ter uma melhor compreensão a respeito de como a manutenção esta distribuída entre corretivas (ZM01), preventivas (ZM02) e melhorias (ZM03) na fábrica para o ano de 2024

Figura 5 – Pilares da manutenção em 2024:

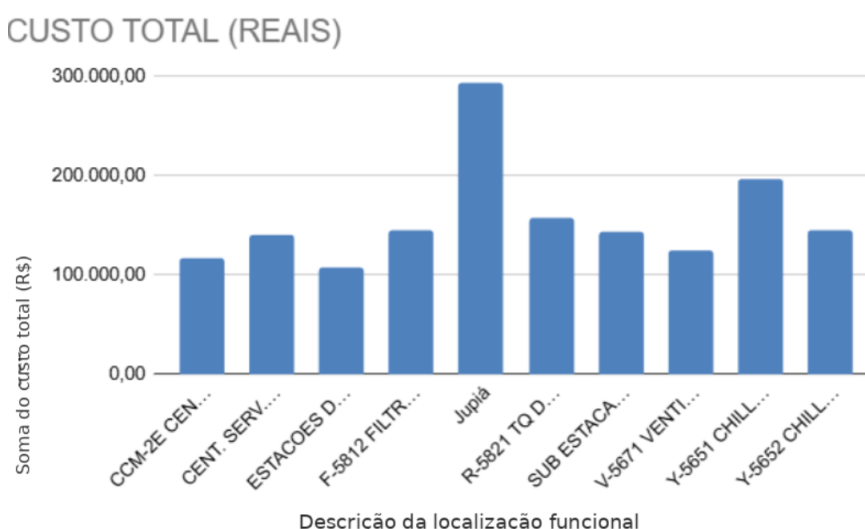


Elaborado pelo autor com base em dados do SAP (2024)

Em relação ao tipo de manutenção predominante, a análise da distribuição das ordens de serviço permite identificar qual abordagem de manutenção é mais recorrente dentro da organização. A predominância de determinado tipo de intervenção pode indicar características importantes da estratégia de manutenção adotada. Quando há maior incidência de ordens corretivas, por exemplo, isso pode sugerir uma postura mais reativa da manutenção, na qual as intervenções ocorrem majoritariamente após a ocorrência de falhas. Por outro lado, uma maior participação de atividades preventivas ou de melhoria pode indicar um grau mais elevado de planejamento e maturidade na gestão da manutenção, refletindo esforços voltados à prevenção de falhas, aumento da confiabilidade dos ativos e melhoria contínua dos processos produtivos. Dessa forma, a identificação do tipo de manutenção predominante constitui um passo importante para compreender o estágio atual da gestão da manutenção e direcionar possíveis ações de aprimoramento. Assim ao analisar o histórico quantitativo relacionado as ordens de manutenção temos que o pilar corretivo é o mais presente, característica que pode ser justificada por analisarmos uma fabrica que opera a mais de 18 anos

Além da análise quantitativa das ordens de serviço, também serão avaliados equipamentos específicos que concentram os maiores custos e recorrências de problemas registrados nas *WOs* (*Work Orders*), que estão relacionados na Figura 6.

Figura 6 – Concentração de gastos com manutenção em 2024:



Elaborado pelo autor com base em dados do SAP (2024)

Essa etapa tem como objetivo identificar os ativos que exercem maior impacto financeiro e operacional no sistema produtivo. A análise será conduzida considerando critérios como frequência de intervenções, custos associados às atividades de manutenção e cri-

tividade do equipamento dentro do processo produtivo. A partir desse levantamento, será possível destacar os equipamentos que demandam maior atenção da equipe de manutenção, permitindo direcionar estudos mais aprofundados sobre as causas das falhas, a adequação dos planos preventivos existentes e a necessidade de aplicação de técnicas adicionais, como manutenção preditiva ou revisão das estratégias de manutenção. Esse tipo de análise contribui para uma gestão mais eficiente dos recursos de manutenção, uma vez que permite priorizar ações nos ativos que apresentam maior impacto na disponibilidade operacional e nos custos globais do sistema.

O custo englobado de manutenção pode ser entendido como o conjunto de todos os gastos diretos e indiretos associados à preservação, recuperação e melhoria dos ativos ao longo do seu ciclo de vida. Ou seja, não se limita apenas ao valor gasto em consertos, mas envolve toda a estrutura necessária para garantir a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos dentro de um sistema produtivo.

Quando se analisa esse custo de forma mais completa, ele se desdobra em algumas vertentes principais.

A primeira delas são os custos diretos de manutenção, que são os mais visíveis. Envolvem mão de obra técnica, peças de reposição, materiais consumíveis, ferramentas e serviços terceirizados. Esses custos estão diretamente ligados à execução das atividades de manutenção, sejam elas corretivas, preventivas ou preditivas.

Em paralelo, existem os custos indiretos, que muitas vezes têm impacto ainda maior, embora sejam menos perceptíveis. Aqui entram fatores como perdas de produção devido a paradas não programadas, redução de eficiência dos equipamentos, aumento do consumo energético por falhas operacionais e até impactos na qualidade do produto final. Esses custos estão fortemente relacionados à indisponibilidade e à baixa confiabilidade dos ativos.

Outra vertente importante são os custos de manutenção preventiva e preditiva, que, apesar de representarem um investimento planejado, têm como objetivo reduzir falhas inesperadas e, conseqüentemente, minimizar custos corretivos e perdas operacionais. Uma gestão eficiente busca equilibrar esses custos para evitar tanto a manutenção excessiva quanto a insuficiente.

Também se destacam os custos administrativos e de gestão, que incluem planejamento, controle, sistemas de gestão (como softwares de manutenção), treinamentos,

desenvolvimento de procedimentos e análise de indicadores. Embora não atuem diretamente no equipamento, são fundamentais para aumentar a eficiência global da manutenção.

Além disso, há os custos associados ao ciclo de vida do ativo, conceito ligado ao *Life Cycle Cost (LCC)*. Essa abordagem considera desde a aquisição do equipamento até sua desativação, incluindo instalação, operação, manutenção e descarte. Muitas vezes, decisões tomadas na fase de projeto ou compra impactam significativamente os custos de manutenção ao longo do tempo.

De forma geral, o item com maior custo é a unidade Jupιά, com um valor bastante superior aos demais, cerca de 300 mil reais. No primeiro momento temos um indicativo que se trata de um ativo altamente relevante dentro do processo produtivo, possivelmente associado a sistemas de utilidades ou fornecimento de energia/insumos. Custos elevados nesse tipo de ativo podem estar relacionados tanto à complexidade dos equipamentos quanto ao impacto que eventuais falhas geram na operação, exigindo intervenções mais rápidas, especializadas e, conseqüentemente, mais onerosas.

Na sequência, destacam-se equipamentos como o Y-5651 Chiller 1 com 200 mil reais, o R-5821 tanque de estocagem de ClO_2 e o F-5812 filtro de sulfato ambos com cerca de 150 mil reais de gastos atrelados às manutenções. Esses ativos estão diretamente ligados a sistemas de utilidades térmicas e processos químicos, o que sugere que boa parte dos gastos está concentrada em equipamentos de suporte ao processo produtivo. No caso dos chillers, por exemplo, falhas podem comprometer o controle térmico, afetando diretamente a eficiência e a segurança operacional. Já o tanque de ClO_2 envolve um insumo crítico e potencialmente perigoso, o que pode elevar os custos devido a exigências de segurança, inspeções e manutenção mais rigorosa.

Outro ponto relevante é a presença de estruturas como subestações, CCM (Centro de Controle de Motores) e sistemas de operação e gerenciamento. Esses itens, como o CCM-2E (Centro de Controle de Motores 2) e a subestação, indicam custos associados à infraestrutura elétrica e de automação. Embora nem sempre sejam equipamentos produtivos diretos, sua falha pode causar paradas generalizadas, o que justifica investimentos maiores em manutenção, seja preventiva ou corretiva.

Além disso, observa-se um valor considerável associado ao centro de serviços de manutenção de equipamentos e prédios, o que evidencia a parcela dos custos indiretos e administrativos dentro do custo englobado. Esse tipo de gasto inclui atividades de

suporte, conservação de infraestrutura e intervenções que não estão vinculadas a um único ativo, mas que são essenciais para a sustentação do sistema como um todo.

Para facilitar a análise vamos verificar apenas os mais relevantes, Iniciando com o intitulado pelo sistema SAP de "JUPIA".

4.1.1 JUPIA:

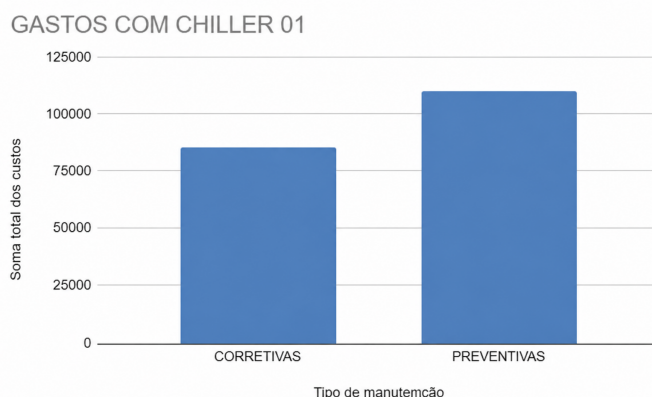
Ao analisar verifica-se que o todas as *Work Orders* que foram alocadas em "JUPIA" são preventivas geradas automaticamente, e que ao entender o real significado temos que "JUPIA" apenas faz referencia ao site onde o custo destas manutenções foi alocado. Portanto para o ano de 2024 se considerarmos apenas o custo de preventivas, temos cerca de 293 mil reais investidos em manutenção preventivas distribuídas automaticamente dentro dos variados planos de manutenção.

4.1.2 Y-5651 CHILLER 1 2024:

Partindo para o segundo equipamento que aparece na base de dados, "Y-5651 CHILLER 1", obtemos o seguinte. A partir dessa identificação, torna-se possível aprofundar a análise de seu histórico de manutenção, permitindo uma avaliação mais detalhada do seu desempenho operacional, padrões de falha e impactos no sistema como um todo.

Para a análise dos custos a Figura 7 apresenta a distribuição dos gastos de manutenção associados ao Chiller 01, considerando a soma total dos custos por tipo de manutenção. A análise contempla as intervenções corretivas e preventivas, permitindo comparar a representatividade financeira de cada categoria no período avaliado.

Figura 7 – Distribuição de gastos Chieller 1



Elaborado pelo autor com base em dados do SAP (2024)

Observa-se que os custos relacionados às manutenções preventivas foram superiores aos das corretivas, indicando maior concentração de recursos em atividades planejadas. Esse comportamento pode estar associado à execução de serviços programados, contratos, inspeções e ações voltadas à preservação da confiabilidade operacional do equipamento.

A primeira impressão, uma estratégia de manutenção mais orientada à prevenção, o que é positivo do ponto de vista de confiabilidade operacional. Investir mais em preventivas geralmente significa que o equipamento está sendo acompanhado de forma planejada, com inspeções, trocas programadas e intervenções antes da falha ocorrer. Em sistemas como chillers — que são críticos para processos industriais — isso é fundamental, já que falhas podem gerar impactos produtivos relevantes.

Por outro lado, o fato de o custo preventivo ser mais alto também merece uma análise mais crítica. Existem algumas possibilidades:

- Os planos preventivos podem estar superdimensionados, com frequência ou escopo maior do que o necessário.
- Pode haver uso excessivo de trocas preventivas por tempo, sem base em condição real do equipamento.
- O custo de insumos e serviços preventivos pode estar elevado.

Já o custo corretivo, embora menor, não necessariamente significa ausência de problemas. É importante avaliar também a quantidade de falhas, tempo de parada e criticidade dessas intervenções. Um custo corretivo baixo pode coexistir com falhas frequentes de baixo custo, o que ainda é indesejável. Nesse sentido, será elaborada uma linha do tempo das ocorrências de manutenção, com o objetivo de investigar a distribuição dessas falhas ao longo do período analisado, identificando possíveis padrões, recorrências e correlações com as condições operacionais do equipamento.

4.2 Escolha do ativo a ser analisado:

Tomaremos como Base do estudo, o ativo chamado pelo sistema SAP de Y-5651 Chiller 1. A escolha do Y-5651 Chiller 1 como objeto de aprofundamento da análise mostrou-se tecnicamente coerente a partir dos resultados obtidos na avaliação dos custos de manutenção referentes ao ano de 2024. Diferentemente do item “JUPIA”, cuja elevada

representatividade financeira estava associada majoritariamente à alocação sistêmica de custos preventivos distribuídos em diversos planos de manutenção, o chiller apresentou custos diretamente vinculados a um único ativo físico, permitindo uma análise mais precisa e representativa de seu comportamento operacional e histórico de manutenção.

Além disso, o equipamento ocupa posição de destaque entre os ativos com maior custo de manutenção da planta, evidenciando sua relevância operacional dentro do processo industrial. Sistemas de refrigeração industrial, como chillers, possuem elevada criticidade por estarem diretamente relacionados ao controle térmico de processos e utilidades, sendo fundamentais para garantir estabilidade operacional, eficiência energética e segurança do processo produtivo. Dessa forma, falhas nesse tipo de equipamento podem ocasionar impactos significativos, incluindo perdas produtivas, aumento do consumo energético e riscos operacionais.

Outro fator determinante para sua escolha foi a própria composição dos custos observados. A predominância de gastos associados à manutenção preventiva indica a existência de uma estratégia estruturada de acompanhamento do equipamento, criando um cenário adequado para avaliar a efetividade das ações preventivas adotadas. Ao mesmo tempo, essa distribuição de custos levanta questionamentos relevantes quanto ao possível superdimensionamento dos planos de manutenção, frequência excessiva de intervenções ou utilização de práticas baseadas exclusivamente em periodicidade temporal, sem necessariamente considerar a condição real do ativo.

Nesse contexto, o Y-5651 Chiller 1 torna-se um objeto de estudo particularmente relevante, pois permite não apenas analisar custos absolutos de manutenção, mas também investigar a relação entre manutenção preventiva, ocorrência de falhas corretivas, confiabilidade operacional e impacto produtivo. A elaboração de uma linha do tempo das intervenções realizadas possibilita identificar padrões de recorrência, períodos críticos de falha e potenciais oportunidades de otimização da estratégia de manutenção aplicada ao equipamento.

4.3 Custo englobado 2024 para o Chiller:

A análise do custo englobado de manutenção referente ao ano de 2024 tem como objetivo identificar os ativos que apresentaram maior impacto financeiro dentro da estrutura de manutenção da planta industrial. Por meio dessa avaliação, torna-se possível compreender como os recursos foram distribuídos entre diferentes equipamentos e sistemas, permitindo identificar ativos críticos, padrões de gasto e possíveis oportunidades de

otimização das estratégias de manutenção. Além disso, essa análise contribui para direcionar estudos mais aprofundados sobre os equipamentos de maior relevância operacional e econômica dentro do processo produtivo.

4.3.1 Estudando a respeito da campanha da máquina no ano de 2024:

Ao analisar o histórico de ordens de manutenção do ativo ao longo de 2024, fica claro que se trata de um equipamento crítico que apresentou um comportamento operacional instável, com forte predominância de intervenções corretivas no início do ano e uma tentativa de estabilização ao longo dos meses via manutenção contratada.

Logo no primeiro trimestre, o ativo já demonstra sinais evidentes de degradação funcional. As ocorrências de vibração excessiva (V-19184 e VI-19182) indicam possíveis problemas mecânicos, como desalinhamento, desbalanceamento ou desgaste em componentes rotativos. Paralelamente, o equipamento Y-5651 apresenta baixo rendimento e operação fora de parâmetros, o que sugere perda de eficiência térmica ou falhas no controle do processo. Esse conjunto inicial já caracteriza um cenário típico de manutenção reativa, onde as falhas começam a se manifestar de forma recorrente.

Ainda nesse período, chama atenção a entrada de contratos mensais com a Carrier, indicando uma tentativa de estruturar uma manutenção mais sistemática. No entanto, a continuidade das falhas ao longo do ano mostra que, embora haja suporte externo, ele não foi suficiente para eliminar a causa raiz dos problemas.

Ao longo do segundo e terceiro trimestres, observa-se uma diversificação dos tipos de falha. Problemas relacionados à instrumentação e controle começam a aparecer, como variações de pressão (PI-1178) e necessidade de substituição de sensor de temperatura. Além disso, a falha no atuador de *guide vane* é um ponto crítico, pois esse componente é essencial para o controle de capacidade do chiller. Esse tipo de falha impacta diretamente na eficiência energética e estabilidade operacional do equipamento.

Outro ponto relevante é o volume de intervenções em válvulas (bloqueio, controle, substituição por oxidação), o que sugere problemas no sistema hidráulico, possivelmente associados à qualidade da água ou à ausência de um plano de manutenção preventiva mais robusto para o circuito de resfriamento.

4.3.2 Tempo médio entre falhas do chiller para campanha de 2024

No último trimestre fora realizado uma parada geral possibilitando a intervenção no equipamento sem prejudicar o rendimento do processo, ficando evidente uma intensificação das ações corretivas estruturais: limpeza mecânica do condensador, substituição de válvulas e aquisição de placa de controle (ICVC). Essas ações indicam que o equipamento já operava com perda de desempenho, exigindo intervenções mais profundas para restabelecer condições mínimas de operação. Por ultimo, mas não menos importante, é preciso ressaltar que o ativo em questão teve 3 parada não programadas para manutenção corretiva, entretanto todas as vezes que o sistema parou, foram realizadas análises técnicas para não perder produção uma vez q o sistema de refrigeração é composto por outras duas maquinas, sendo a terceira estudada um ponto fora da curva para garantir que a transferência térmica do processo seja executada plenamente e com margem em todas as épocas do ano.

As três Paradas que aconteceram foram contabilizadas a partir de 3 W.O's, das quais descreveram os seguintes ocorridos:

- "Y-5651 FALHA ATUADOR GUIDE VANE"
- "Y-5651 Limpeza Mecanica Condensador"
- "Y-5651 Subst. Val. Oxidada Agua Gelada"

O cálculo do Tempo Médio Entre Falhas *MTBF* foi realizado considerando o período completo do ano de 2024, adotando-se como referência o intervalo entre 01 de janeiro e 31 de dezembro. Durante esse período, foram registradas três ocorrências de falhas do equipamento, nas datas de 22 de julho, 23 de outubro e 06 de dezembro.

Considerando que o ano de 2024 possui 366 dias (ano bissexto), o *MTBF* foi determinado pela razão entre o tempo total disponível e o tempo total do equipamento indisponível devido a falha, conforme apresentado na Equação 1.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{funcionamento}]}{N_{falhas}} \quad (9)$$

$$T_{funcionamento} = T_{operacional} - T_{indisponivel} \quad (10)$$

Substituindo equação 10 na equação 1 obtemos a Equação 11:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{operacional} - T_{indisponivel}]}{N_{falhas}} \quad (11)$$

Logo considerando que o equipamento ficou aproximadamente 7 horas em falha, até voltar a operar em devidas condições, temos os seguintes resultados.

$$T_{indisponivel} = 3 \cdot 7(hrs) \quad (12)$$

Substituindo os resultados na equação 11 temos

$$MTBF = \frac{[366 \cdot 24] - [7 \cdot 3]}{3}$$

O valor obtido para horas é:

$$MTBF = 121,71 \cdot 24 = 2921,04 \text{ horas}$$

Dessa forma, o equipamento apresenta um Tempo Médio Entre Falhas de aproximadamente 121,71 dias, ou 2921,04 horas. Ressalta-se que este cálculo considera o equipamento em operação contínua ao longo de todo o período analisado, não sendo descontadas eventuais paradas programadas

4.3.3 Tempo médio entre falhas do chiller para campanha de 2024

Para calculo do *MTTR* foram contabilizados os tempos de manutenção para concertar a máquina em cada uma das paradas do equipamento para reparo, cada manutenção durou 7 horas, no geral devido ao tempo de liberação do equipamento para manutenção até a finalização do serviço e funcionamento da máquina. Assim os dados foram alocados na Equação 2

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{reparo}]}{N_{falhas}} = \frac{3 \cdot 7}{3} = 7 \text{ horas}$$

4.4 Resumo dos resultados de 2024 para o ativo

Com base nos dados levantados, conclui-se que o ativo apresenta uma campanha relativamente estável, com um *MTBF*, de 2921 horas, indicando um bom intervalo médio entre falhas. As três paradas registradas ao longo do período, associadas a um *MTTR* médio de 7 horas, demonstram que, embora ocorram falhas, o tempo de recuperação se mantém controlado e dentro de um patamar aceitável. De forma geral, o comportamento do equipamento sugere um nível de confiabilidade adequado, com oportunidades pontuais de melhoria voltadas ao aumento da disponibilidade operacional.

Entre os principais pontos de melhoria, destaca-se a necessidade de evolução das estratégias de manutenção, com maior ênfase em técnicas preditivas, como análise de vibração e termografia, permitindo a identificação antecipada de falhas e contribuindo para o aumento do *MTBF*. Além disso, a realização de análises de causa raiz das ocorrências registradas, por meio de metodologias estruturadas, possibilita a eliminação de falhas recorrentes. A revisão dos planos de manutenção também se mostra relevante, com ajustes de periodicidade, padronização de procedimentos e definição de ações específicas para componentes críticos.

No que se refere à redução do *MTTR*, a capacitação da equipe interna, aliada à criação de instruções de trabalho e checklists, pode tornar as intervenções mais ágeis e eficientes. A gestão adequada de sobressalentes também desempenha papel fundamental, evitando atrasos decorrentes da indisponibilidade de peças. O uso de sistemas de gestão, como o SAP, contribui para um melhor planejamento e controle das atividades de manutenção.

Cabe ainda destacar que tanto a manutenção preventiva quanto a corretiva são realizadas pela própria empresa fabricante do equipamento, o que agrega valor ao processo devido ao elevado conhecimento técnico e maior assertividade nas intervenções. Entretanto, essa dependência pode impactar o tempo de resposta, especialmente em função de mobilização e disponibilidade da equipe externa. Nesse contexto, o desenvolvimento gradual da equipe interna para atuação em falhas de menor complexidade, bem como o alinhamento eficiente com o fabricante, surge como uma oportunidade relevante para redução do *MTTR* e melhoria contínua dos indicadores.

4.5 Pontos de melhoria para implementar na campanha de 2025:

A Figura 8 apresenta uma síntese das principais ações de melhoria propostas para aumentar a confiabilidade, disponibilidade dos equipamentos da planta industrial. As iniciativas contemplam aspectos técnicos, organizacionais e gerenciais da manutenção, abrangendo desde a adoção de técnicas preditivas e metodologias de análise de falhas até o aprimoramento do planejamento, capacitação da equipe e gestão de recursos. Em conjunto, essas ações visam reduzir a ocorrência de falhas, minimizar os tempos de reparo e promover uma gestão da manutenção mais eficiente, contribuindo para a elevação dos indicadores de desempenho operacional do ativo.

Figura 8 – Melhorias propostas



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa (2026)

4.6 Análise da viabilidade e aplicação das melhorias cabíveis

A evolução para a manutenção preditiva mostra-se plenamente viável devido à disponibilidade de tecnologias amplamente difundidas no ambiente industrial, como a análise de vibração e a termografia. Sua aplicação consiste na definição de rotas periódicas de inspeção e no monitoramento contínuo dos principais parâmetros operacionais do equipamento. A partir da análise das tendências observadas, torna-se possível identificar anomalias em estágios iniciais e programar intervenções antes da ocorrência de falhas funcionais. Embora essa prática exija investimento inicial em instrumentos e capacitação técnica, os ganhos obtidos com a redução de paradas não planejadas justificam sua adoção, especialmente em ativos de elevada criticidade.

Além disso, a aplicação da análise de causa raiz pode ser realizada após a ocorrência de falhas relevantes ou reincidentes, utilizando metodologias estruturadas como os 5 Porquês e o Diagrama de Ishikawa. Sua viabilidade é elevada, pois demanda principalmente conhecimento técnico e organização das informações históricas de manutenção. Esse processo permite identificar os fatores que contribuem para as falhas, evitando soluções apenas paliativas e direcionando os esforços para a eliminação definitiva das causas fundamentais. Dessa forma, reduz-se a recorrência dos problemas e aumenta-se a confiabilidade operacional do equipamento.

Outra oportunidade relevante consiste na revisão dos planos de manutenção, por meio da reavaliação das atividades preventivas existentes e da adequação de periodicidades, procedimentos e pontos de inspeção às condições reais de operação do equipamento. Essa revisão pode ser realizada com base na análise do histórico de falhas, nas recomendações do fabricante e na experiência prática da equipe de manutenção. A viabilidade dessa proposta é elevada, uma vez que não requer investimentos significativos em infraestrutura, sendo baseada principalmente em estudos técnicos e ajustes nos procedimentos já existentes. Como resultado, espera-se maior efetividade das intervenções e redução das falhas inesperadas.

A capacitação da equipe interna também representa uma medida importante para a melhoria do desempenho da manutenção. Essa ação envolve a realização de treinamentos técnicos voltados ao diagnóstico, manutenção e solução de problemas relacionados ao equipamento analisado. Sua aplicação pode ocorrer por meio de cursos internos, treinamentos ministrados pelo fabricante ou programas de desenvolvimento profissional. A viabilidade da ação é favorecida pela utilização dos próprios recursos humanos da organização, reduzindo a dependência de suporte externo. O aprimoramento das com-

petências técnicas contribui diretamente para a redução dos tempos de diagnóstico e reparo, aumentando a eficiência das atividades de manutenção.

Nesse mesmo sentido, a criação de procedimentos padronizados e checklists operacionais representa uma medida de fácil implementação e baixo custo. Sua aplicação consiste na elaboração de documentos que orientem a execução das atividades de inspeção, manutenção preventiva e manutenção corretiva, garantindo maior uniformidade na realização das tarefas. A viabilidade é elevada devido à necessidade limitada de recursos financeiros, demandando principalmente conhecimento técnico para elaboração e validação dos documentos. A padronização reduz falhas humanas, melhora a qualidade das intervenções e facilita a transferência de conhecimento entre os profissionais.

A gestão adequada dos sobressalentes também se mostra essencial para a redução dos tempos de parada. Essa prática envolve a identificação dos componentes críticos do equipamento e a definição de níveis mínimos de estoque, de modo a garantir sua disponibilidade quando necessário. Sua aplicação requer análise do histórico de falhas, do tempo de reposição dos fornecedores e do impacto operacional causado pela indisponibilidade de cada componente. A viabilidade dessa ação está associada ao equilíbrio entre o custo de armazenagem e os prejuízos decorrentes de longos períodos de parada. Assim, a manutenção de peças estratégicas em estoque pode reduzir significativamente o tempo necessário para a execução dos reparos.

A melhoria da gestão e do planejamento da manutenção pode ser realizada por meio da utilização mais eficiente dos sistemas informatizados já disponíveis na organização, como o SAP. Essa aplicação consiste no controle estruturado das ordens de serviço, na programação das atividades, no acompanhamento de indicadores e no registro adequado do histórico de manutenção. A viabilidade da proposta é elevada, pois aproveita recursos já existentes na empresa e demanda principalmente disciplina operacional e padronização dos processos. Como resultado, obtém-se maior previsibilidade das intervenções e melhor utilização dos recursos disponíveis.

Outro aspecto importante refere-se à redução da dependência do fabricante, que pode ser alcançada por meio da internalização gradual dos conhecimentos técnicos relacionados à operação e à manutenção do equipamento. Essa ação envolve a criação de procedimentos internos, o treinamento da equipe e a documentação das intervenções realizadas ao longo do tempo. Sua viabilidade é favorecida pela experiência acumulada dos profissionais da manutenção e pela disponibilidade de informações técnicas já existentes na organização. Com maior autonomia, torna-se possível solucionar falhas de menor

complexidade de forma mais rápida, reduzindo os tempos de parada.

Por fim, o fortalecimento do relacionamento com o fabricante consiste na criação de canais de comunicação mais eficientes e no planejamento antecipado das intervenções que dependam de suporte externo. Sua aplicação pode incluir reuniões periódicas, definição de contatos estratégicos e acordos de nível de serviço para atendimento de emergências. A viabilidade da proposta é elevada, pois requer principalmente alinhamento organizacional e melhoria dos fluxos de comunicação. Como benefício, espera-se maior agilidade no atendimento, melhor disponibilidade de recursos especializados e redução dos impactos causados por intervenções externas.

4.7 Campanha de manutenção em 2025:

A comparação entre os anos de 2024 e 2025 evidencia mudanças importantes no perfil das atividades de manutenção executadas. Em 2024, foram registradas aproximadamente 1767 ordens de serviço, sendo 1105 relacionadas à manutenção corretiva, 616 à manutenção preventiva e 46 destinadas a projetos de alteração e melhoria. Já em 2025, observou-se a emissão de cerca de 1381 ordens de serviço, distribuídas entre 1004 ordens corretivas, 346 preventivas e 31 de melhoria.

De forma geral, verifica-se uma redução de aproximadamente 21,8% no número total de ordens de serviço entre os dois períodos, passando de 1767 para 1381 registros. As manutenções corretivas apresentaram redução de cerca de 9,1%, enquanto as atividades preventivas tiveram uma diminuição mais significativa, da ordem de 43,8%. Da mesma forma, as ordens relacionadas a projetos de alteração e melhoria reduziram aproximadamente 32,6%.

Apesar da redução do volume total de intervenções, observa-se que a participação relativa das manutenções classificadas como corretivas aumentou de 62,5% em 2024 para 72,7% em 2025. Entretanto, esse resultado deve ser analisado com cautela, uma vez que foi identificado, durante o levantamento dos dados, que parte dos custos e atividades associados à manutenção preventiva foram registrados em ordens classificadas como corretivas. Dessa forma, a distribuição observada pode não representar integralmente a natureza real das intervenções executadas no período. Ainda assim, os dados evidenciam oportunidades de aprimoramento nos processos de gestão e classificação das ordens de serviço, reforçando a importância da padronização dos registros e da adoção de práticas que permitam maior rastreabilidade das atividades de manutenção.

Considerando esse cenário, a aplicação das melhorias propostas ao longo deste trabalho torna-se fundamental para aumentar a confiabilidade das informações gerenciais e promover uma evolução consistente da estratégia de manutenção. A partir da implementação das ações identificadas, espera-se que o perfil da manutenção apresente mudanças significativas em relação ao cenário observado em 2025. A adoção de práticas voltadas à manutenção preditiva, à análise estruturada de falhas, à revisão dos planos de manutenção e ao fortalecimento da gestão dos recursos tende a promover uma redução gradual da ocorrência de falhas corretivas, aumentando a confiabilidade operacional do equipamento.

Nesse contexto, é esperado que parte das intervenções anteriormente classificadas como corretivas passe a ser substituída por atividades preventivas e preditivas planejadas, refletindo uma maior maturidade da gestão da manutenção. A utilização de técnicas de monitoramento de condição, associada à aplicação sistemática de análises de causa raiz, deverá contribuir para a identificação antecipada de anomalias e para a eliminação das principais causas de falhas recorrentes, elevando o valor do *MTBF* do ativo.

Paralelamente, a capacitação da equipe interna, a padronização dos procedimentos de manutenção e a melhoria da gestão de sobressalentes deverão proporcionar maior agilidade na execução das intervenções, reduzindo os tempos de diagnóstico, mobilização e reparo. Dessa forma, espera-se uma diminuição consistente do *MTTR*, aumentando a disponibilidade operacional do equipamento e reduzindo os impactos produtivos decorrentes de paradas não planejadas.

A melhoria do planejamento e controle da manutenção, aliada à redução da dependência de suporte externo e ao fortalecimento do alinhamento com o fabricante, também deverá contribuir para uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis, permitindo maior previsibilidade das intervenções e melhor aproveitamento da mão de obra e dos materiais empregados.

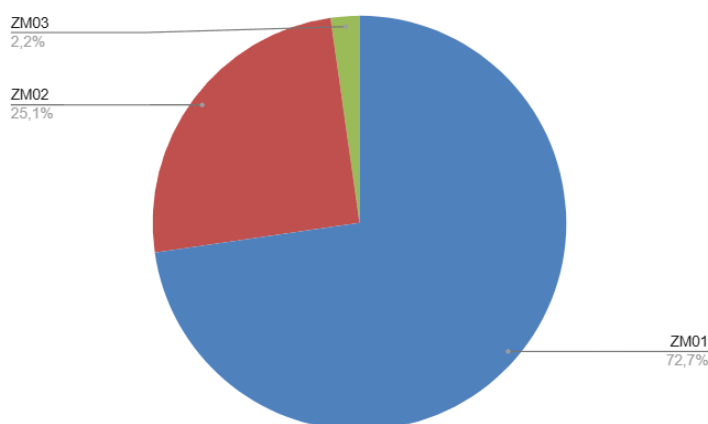
Sob a ótica econômica, a expectativa é de redução dos custos globais de manutenção ao longo do tempo. Embora algumas das ações propostas demandem investimentos iniciais em treinamento, monitoramento e estruturação dos processos, a diminuição das falhas inesperadas, dos tempos de parada e das intervenções emergenciais tende a compensar esses investimentos, resultando em uma operação mais confiável, segura e economicamente sustentável.

Dessa forma, espera-se que a aplicação integrada das melhorias propostas promova

uma transição gradual de uma abordagem predominantemente corretiva para uma estratégia de manutenção mais proativa e orientada à confiabilidade, contribuindo para a elevação do desempenho operacional do ativo e para a consolidação de uma cultura de melhoria contínua na gestão da manutenção.

Pela Figura 9 podemos ter uma melhor compreensão a respeito de como a manutenção esta distribuída, sendo (ZM01), preventivas(ZM02) e melhorias (ZM03) na fábrica para o ano de 2025

Figura 9 – Pilares da manutenção em 2025:



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar um comparativo inicial entre os anos de 2024 e 2025, observa-se, primeiramente, uma redução no volume total de ordens de serviço, passando de 1767 em 2024 para 1381 em 2025. Essa diminuição pode indicar uma possível melhoria na confiabilidade dos ativos, embora também possa estar associada a mudanças na estratégia de manutenção, critérios de abertura de ordens ou até mesmo variações operacionais.

No que diz respeito à manutenção corretiva, nota-se uma leve redução absoluta, de 1105 ocorrências em 2024 para 1004 em 2025. Entretanto, proporcionalmente, há um aumento da participação da corretiva no total de ordens, o que sugere uma maior dependência desse tipo de intervenção ao longo de 2025. Esse comportamento pode ser um indicativo de que, apesar da redução geral de falhas, o sistema ainda opera de forma mais reativa do que o ideal.

Por outro lado, a primeira impressão que temos é que manutenção preventiva apresentou uma queda mais acentuada, passando de 616 registros em 2024 para 346 em 2025. Essa redução é significativa tanto em termos absolutos quanto proporcionais, indicando uma possível diminuição na execução de planos preventivos. Esse fator merece

atenção, pois a redução da preventiva tende a impactar diretamente no aumento relativo da corretiva ao longo do tempo.

Em relação aos projetos de alteração e melhoria, também houve redução, de 46 em 2024 para 31 em 2025. Isso pode indicar uma menor atuação em ações estruturais voltadas à eliminação de causas raiz e aumento de confiabilidade dos ativos, o que, a médio e longo prazo, pode limitar ganhos mais consistentes de desempenho.

Com base nos pontos anteriormente discutidos, observa-se que o aspecto mais crítico está na redução de aproximadamente 43% nas atividades de manutenção preventiva em relação à campanha do ano anterior. À primeira vista, esse comportamento pode ser interpretado como um ponto de atenção relevante; no entanto, essa queda está diretamente associada a uma mudança na forma de geração das ordens de serviço.

Na campanha de 2024, havia a possibilidade de abertura manual de ordens preventivas, o que acabava permitindo a ocorrência de inconsistências conceituais e classificações inadequadas. Esse cenário contribuía para uma distorção dos indicadores, inflando artificialmente os números de manutenção preventiva e mascarando a real efetividade das ações executadas.

Dessa forma, a redução observada em 2025 não necessariamente representa uma piora no desempenho da manutenção, mas sim um reflexo de um controle mais rigoroso e de uma classificação mais fiel das atividades, permitindo uma análise mais precisa e confiável dos resultados.

4.7.1 Custo englobado 2025:

Para facilitar as análises realizaremos as comparações com os valores encontrados para o ano de 2024. Logo tomando 2025 como referência principal, a análise dos custos de manutenção evidencia um cenário de maior controle e redução dos gastos em comparação com 2024, porém com pontos que merecem atenção quanto à consistência dos dados.

Em 2025, observa-se que os maiores custos concentram-se em poucos ativos, com destaque para “Jupiá” (139 mil), “Y-5651 Chiller 1” (131 mil) e o “V-5671 Ventilador da torre de resfriamento” (111 mil). Esses equipamentos passam a representar os principais focos de dispêndio, indicando que, mesmo com a redução global, ainda concentram a maior demanda de manutenção e, possivelmente, maior criticidade operacional.

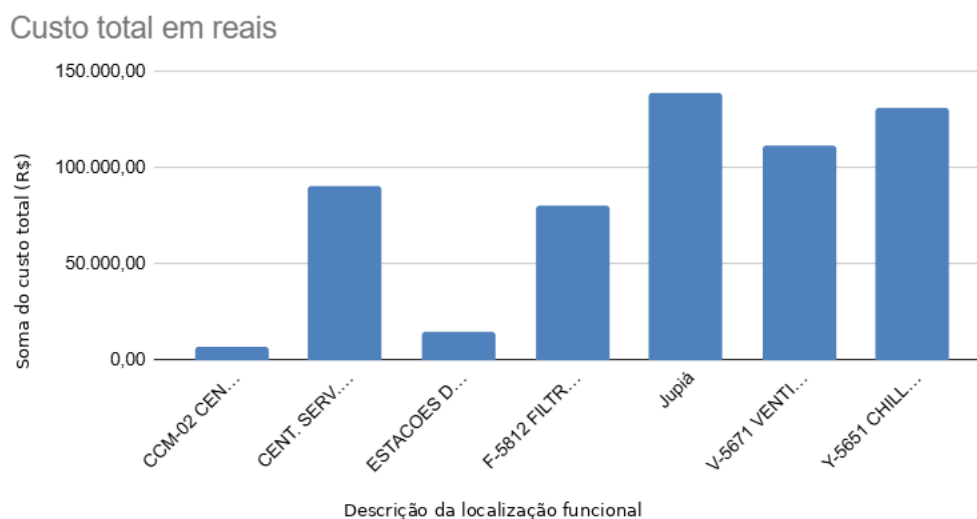
Ao comparar com 2024, percebe-se que esses mesmos ativos já figuravam entre os mais relevantes, porém com valores significativamente superiores. A redução observada pode estar associada a melhorias na estratégia de manutenção, maior efetividade de ações preventivas/preditivas ou até menor incidência de falhas ao longo do período analisado.

Por outro lado, alguns itens apresentam quedas muito acentuadas, como as “Estações de Operação e Gerenciamento” (de 107 mil para 14,9 mil) e, principalmente, o “CCM”, que reduz de aproximadamente 117 mil para apenas 6,8 mil. Para este último, foi realizada uma investigação mais aprofundada, na qual foram identificados erros de lançamento de custos no ano de 2024, o que acabou inflando artificialmente os valores daquele período e comprometendo a comparação direta entre os anos.

Além disso, a ausência de determinados ativos em 2025, como o tanque de estocagem de ClO_2 e a subestação, reforça a hipótese de alteração estrutural na contabilização ou no escopo analisado, o que impacta diretamente a comparabilidade entre os anos.

Dessa forma, embora 2025 apresente um cenário aparentemente mais eficiente sob o ponto de vista de custos, a interpretação desses resultados deve considerar as correções realizadas. Parte da redução observada está diretamente relacionada ao ajuste de inconsistências nos lançamentos anteriores, e não necessariamente aos ganhos reais de desempenho dos ativos. O Gráfico 10 a seguir mostra os gastos para o ano de 2025

Figura 10 – Gastos de manutenção em 2025



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar os resultados atuais com a análise realizada para 2024, observa-se que o comportamento geral dos custos se mantém bastante semelhante, principalmente no que diz respeito à concentração em poucos pontos específicos.

Assim como no ano anterior, Jupiá permanece como o principal responsável pelo custo total, mantendo-se muito acima dos demais. Isso reforça a interpretação já levantada em 2024, de que esse agrupador não representa necessariamente um ativo físico isolado, mas sim um centro de alocação de custos — possivelmente associado à geração automática de ordens preventivas. Dessa forma, a sua representatividade elevada continua sendo muito mais um reflexo da estrutura de apontamento do sistema do que, necessariamente, de criticidade operacional direta.

Na sequência, também se mantém o padrão de concentração de custos em equipamentos ligados às utilidades, como o Y-5651 CHILLER 1, o V-5671 VENTILADOR TORRE RESFRIAMENTO 01 e o F-5812 FILTRO DE SULFATO. Esse comportamento é coerente com o observado em 2024, onde já se destacava que sistemas de suporte ao processo produtivo — especialmente os relacionados a controle térmico e processos químicos — tendem a demandar maior investimento em manutenção, seja pela sua criticidade ou pela complexidade envolvida nas intervenções.

O CENT. SERV. - MANUT. - EQUIP. / PREDIOS também continua apresentando um peso relevante, indicando que os custos indiretos e de suporte permanecem representativos dentro do custo total de manutenção. Isso sugere uma estrutura de manutenção que ainda depende significativamente de atividades não diretamente associadas a um único ativo, mas essenciais para a sustentação da operação.

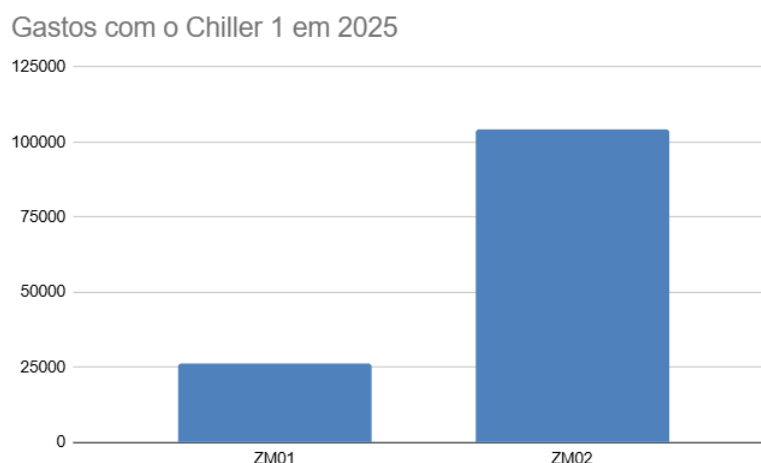
Por outro lado, o CCM-02 CENTRO DE CONTROLE DE MOTORES 02 segue com baixo custo aparente, porém, diferentemente de uma leitura direta de alta confiabilidade, esse resultado deve novamente ser analisado com cautela. Conforme já identificado em 2024, houve erros de lançamento de custos nesse centro, que foram posteriormente investigados. Assim, a baixa representatividade pode estar mais associada à qualidade dos dados do que, de fato, ao desempenho do ativo.

4.7.2 Y-5651 CHILLER 1 2025:

Para validar o ponto discutido neste trabalho, analisaremos o histórico de manutenção da máquina Y-5651 CHILLER 1

A análise comparativa dos custos de manutenção do Chiller 01 entre os anos de 2024 e 2025 evidencia uma mudança significativa no perfil das intervenções realizadas, os resultados referentes aos custeios em manutenção preventiva e corretiva em 2025 para o ativo em questão estão apresentados no Gráfico 11.

Figura 11 – Custos de manutenção em para o chiller 1 2025



Fonte: Elaborado pelo autor

No ano de 2025, observa-se uma predominância acentuada dos custos de manutenção preventiva, na ordem de aproximadamente R\$ 100 mil, enquanto os custos corretivos se mantêm em um patamar consideravelmente inferior, em torno de R\$ 25 mil. Esse comportamento é característico de uma estratégia de manutenção mais madura, com foco na antecipação de falhas e na preservação da confiabilidade do equipamento.

Por outro lado, no ano de 2024, embora os custos de manutenção preventiva ainda sejam superiores (aproximadamente R\$ 110 mil), os custos corretivos apresentam um aumento expressivo, atingindo cerca de R\$ 85 mil. Essa redução na diferença entre os custos preventivos e corretivos indica um cenário com maior incidência de falhas ou intervenções não planejadas, caracterizando uma abordagem mais reativa.

Dessa forma, a comparação entre os dois períodos evidencia uma evolução positiva de 2024 para 2025, destacada principalmente pela redução significativa dos custos corretivos e pelo aumento da predominância da manutenção preventiva. Tal comporta-

mento sugere um ganho de confiabilidade do ativo, possivelmente associado à melhoria na execução dos planos de manutenção, eliminação de falhas recorrentes e maior controle sobre as intervenções realizadas.

Em síntese, enquanto o ano de 2024 apresenta características de uma manutenção mais reativa, o cenário observado em 2025 indica uma transição para uma abordagem mais preventiva e controlada, alinhada às boas práticas da engenharia de manutenção.

4.7.3 Estudando a respeito da campanha da máquina no ano de 2025:

No início do período, em janeiro, a abertura para medição das juntas indica uma ação mais investigativa ou preventiva, possivelmente já motivada por indícios de perda de desempenho ou risco de falha. A partir de março, observa-se uma intensificação clara das ocorrências, com destaque para o evento de baixa pressão de óleo e, poucos dias depois, a medição de vibração no ponto 5. Essa proximidade temporal sugere que o equipamento começou a apresentar sintomas clássicos de degradação mecânica, possivelmente relacionados a lubrificação inadequada ou desalinhamentos, o que justifica a sequência de inspeções mais específicas.

Ainda em março e início de abril, há uma transição do diagnóstico para intervenções diretas, como a instalação de componentes associados à instrumentação (bolachas do sensor e ferrite de comunicação). Isso indica uma tentativa de melhorar a confiabilidade dos dados de monitoramento, o que é coerente com uma estratégia de manutenção baseada em condição. Ou seja, antes de atacar completamente o problema, houve um esforço para garantir que o sistema de aquisição de dados estivesse confiável.

No final de abril e início de junho, com a intervenção no chiller e a atuação na válvula borboleta (abertura/fechamento BV), percebe-se uma atuação mais voltada ao sistema como um todo, e não apenas ao componente isolado. Isso pode indicar que as causas das falhas estavam distribuídas ou que havia interdependência entre subsistemas, como troca térmica, fluxo e controle.

A partir de julho, com a instalação de transformadores nos guide vanes e difusor, a abordagem se torna mais estruturante, sugerindo modificações ou melhorias no sistema, e não apenas correções pontuais. Esse tipo de ação geralmente está associado a aprendizado acumulado das falhas anteriores.

Já no último trimestre, o acompanhamento pela Carrier reforça a entrada de suporte especializado, o que costuma ocorrer quando o problema atinge um nível de complexi-

dade ou criticidade maior. O reaparecimento do evento relacionado ao chiller em outubro indica uma possível reincidência ou, no mínimo, que a solução implementada anteriormente não foi totalmente eficaz.

4.7.4 Tempo médio entre falhas do chiller para campanha de 2025

Para 2025 tivemos duas paradas emergenciais para intervenção emergencial que acarretaram na parada do equipamento, eventos que foram registrados seguindo as descrições apresentadas a seguir

- "Y-5651-PRESSAO BAIXA DE ÓLEO"
- "INSTALAÇÃO TRAFOS GUIDE VANES E DIFUSOR"

O cálculo do Tempo Médio Entre Falhas *MTBF* foi realizado considerando o período completo do ano de 2025, adotando-se como referência o intervalo entre 01 de janeiro e 31 de dezembro. Durante esse período, foram registradas duas ocorrências de falhas do equipamento, nas datas de 07 de Março, 23 de outubro.

Considerando que o ano de 2025 possui 365 dias, o *MTBF* foi determinado pela razão entre o tempo total disponível e o tempo total do equipamento indisponível devido a falha, conforme apresentado na Equação 11 seguiremos com o seguinte cálculo.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{operacional} - T_{indisponivel}]}{N_{falhas}}$$

Logo considerando que o equipamento ficou aproximadamente 7 horas em falha, até voltar a operar em devidas condições, temos os seguintes resultados.

$$T_{indisponivel} = 2 \cdot 7(hrs)$$

Substituindo os resultados na equação 11 temos

$$MTBF = \frac{[365 \cdot 24] - [7 \cdot 2]}{2} = 4373 \text{ hrs}$$

Dessa forma, o equipamento apresenta um Tempo Médio Entre Falhas de aproximadamente 182 dias, ou 4373 horas. Ressalta-se que este cálculo considera o equipamento em operação contínua ao longo de todo o período analisado, não sendo descontadas eventuais paradas programadas

4.7.5 Tempo médio entre falhas do Chiller para campanha de 2025

Para cálculo do *MTTR* foram contabilizados os tempos de manutenção para concertar a máquina em cada uma das paradas do equipamento para reparo, cada manutenção durou 7 horas, no geral devido ao tempo de liberação do equipamento para manutenção até a finalização do serviço e funcionamento da máquina. Assim os dados foram alocados na Equação 2, obtendo os seguintes resultados para o *MTTR*.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{reparo}]}{N_{falhas}} = \frac{2 \cdot 7}{2} = 7 \text{ horas}$$

4.8 Resumo dos resultados de 2025 para o ativo

Ao comparar com os valores de 2024, observa-se uma evolução significativa no desempenho do ativo, especialmente no que se refere à confiabilidade. O *MTBF* passou de 2921 horas para 182,21 horas, o que representa um aumento de aproximadamente 49,7% no intervalo médio entre falhas. Esse crescimento expressivo indica uma melhora consistente na estabilidade operacional do equipamento, sugerindo maior efetividade das práticas de manutenção adotadas ao longo do período.

Por outro lado, o *MTTR* permaneceu em 7 horas, mantendo-se 0% de variação em relação ao ano anterior. Essa estabilidade evidencia que, embora o equipamento esteja falhando menos, o tempo necessário para recuperação não apresentou evolução. Esse comportamento está diretamente associado à característica operacional da equipe, que concentra as intervenções predominantemente durante o turno administrativo, limitando reduções adicionais nesse indicador.

Dessa forma, enquanto o aumento de 49,7% no *MTTR* reflete um avanço relevante na confiabilidade do ativo, a estagnação do *MTTR* aponta para uma oportunidade clara de melhoria. A ampliação da capacidade de atendimento fora do horário administrativo e a otimização dos processos de manutenção surgem como fatores-chave para evoluir o desempenho global, especialmente no que diz respeito à disponibilidade operacional.

4.9 Curva de Confiabilidade:

Para avaliar o impacto da distribuição de falhas na confiabilidade do ativo, foram definidos dois cenários distintos, ambos considerando um horizonte de operação de dois anos, porém com abordagens diferentes na forma como as falhas são distribuídas ao longo do tempo.

No primeiro cenário, a curva de confiabilidade é construída assumindo um comportamento uniforme de falhas, com base em uma média de 3 falhas por ano. Dessa forma, ao longo dos dois anos de operação, o ativo acumula um total de 6 falhas, distribuídas de maneira homogênea no período. Essa abordagem implica, na prática, em uma taxa de falha constante, o que tende a gerar uma curva de confiabilidade com decaimento mais regular, representando um comportamento estável do equipamento, sem considerar possíveis melhorias ou degradações ao longo do tempo.

Já no segundo cenário, a curva de confiabilidade é construída a partir de uma distribuição não uniforme das falhas, sendo consideradas 3 falhas no primeiro ano (2024) e 2 falhas no segundo ano (2025), totalizando 5 paradas no mesmo período de dois anos. Nesse caso, observa-se uma redução na frequência de falhas ao longo do tempo, o que pode estar associado a ações de manutenção mais eficazes, melhorias operacionais ou estabilização do equipamento. Como consequência, a curva de confiabilidade tende a apresentar um decaimento menos acentuado no segundo ano, refletindo uma melhora no desempenho do ativo.

O objetivo da comparação entre os dois cenários é quantificar o gap de confiabilidade ao final do segundo ano de operação. Espera-se que o primeiro cenário apresente uma confiabilidade inferior, uma vez que considera um número maior de falhas acumuladas (6 contra 5).

Dessa forma, a diferença entre as curvas ao final do período analisado evidencia o impacto direto tanto da quantidade total de falhas quanto da sua distribuição temporal. Essa análise permite entender não apenas o nível de confiabilidade do ativo, mas também como a evolução do seu comportamento ao longo do tempo influencia a percepção de desempenho, sendo um insumo importante para tomada de decisão em estratégias de manutenção e gestão de ativos.

4.9.1 Cenário 1: 5 falhas

Para o período analisado, foram consideradas as falhas registradas ao longo dos anos de 2024 e 2025. No total, o equipamento apresentou cinco falhas, sendo três ocorridas em 2024 (22/07, 23/10 e 06/12) e duas em 2025 (03/07 e 24/07).

O tempo total de operação corresponde à soma dos dias dos dois anos analisados. Como 2024 é um ano bissexto, ele possui 366 dias, enquanto 2025 possui 365 dias, resultando em um total de 731 dias de operação.

O *MTBF* foi calculado a partir da Equação 11 dividindo-se o tempo total de operação pelo número de falhas registradas:

$$MTBF = \frac{731}{5} = 146,2 \text{ dias}$$

Para facilitar a interpretação no contexto de manutenção, o valor também foi convertido para horas, resultando em aproximadamente 3508,8 horas.

Dessa forma, conclui-se que o equipamento apresentou um tempo médio entre falhas de 146,2 dias ao longo do período analisado, indicando o intervalo médio esperado de operação entre ocorrências de falha.

A partir do valor de *MTBF* obtido, é possível modelar o comportamento de falha do equipamento ao longo do tempo. Para sistemas onde se assume uma taxa de falha constante, é comum utilizar o modelo exponencial de confiabilidade. Nesse modelo, (λ) é considerada constante e pode ser obtida a partir da Equação 4

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Substituindo o valor encontrado anteriormente na Equação 11 na Equação 4 teremos a taxa de falha do problema:

$$\lambda = \frac{1}{146,2} \approx 0,00684 \text{ falhas/dia}$$

Substituindo o valor encontrado na Equação 4 na Equação 3 obteremos a Curva de confiabilidade que dita o comportamento da confiabilidade no objeto de estudo

$$R(t) = e^{-0,00684t} \quad (13)$$

onde t é o tempo em dias.

A partir da Equação 13 é possível estimar a probabilidade de o equipamento permanecer em operação sem falhas ao longo do tempo, sendo uma ferramenta fundamental para análises de confiabilidade e tomada de decisão em estratégias de manutenção, Logo a partir dessa equação é possível estimar uma curva de confiabilidade a qual é apresentada a seguir no Figura 12

Figura 12 – Curva de confiabilidade R(t)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.9.2 Cenário 2: 6 falhas

Para o mesmo período de análise (2024 e 2025), considera-se agora que o equipamento apresentou um total de seis falhas ao longo dos dois anos, simulando como se as 3 falhas que aconteceram para o ano de 2024 continuassem ocorrendo, cenário hipotético, mas que poderia ser realidade caso as mudanças propostas não tivessem sido aplicadas, ou surtisses efeitos.

O tempo total de operação permanece inalterado, sendo de 731 dias, considerando 366 dias para 2024 (ano bissexto) e 365 dias para 2025.

O *MTBF* é então recalculado partido mais uma vez da Equação 11 dividindo-se o tempo total de operação pelo novo número de falhas:

$$MTBF = \frac{731}{6} = 121,8 \text{ dias}$$

Observa-se que, com o aumento no número de falhas, o tempo médio entre falhas é reduzido, indicando uma piora no desempenho de confiabilidade do equipamento. Assumindo novamente uma taxa de falha constante, aplica-se o modelo exponencial para descrever o comportamento do equipamento ao longo do tempo. A taxa de falha é obtida pela Equação 4:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Substituindo o valor calculado pela Equação 11 na Equação 4 teremos a nova taxa de falha diária para o problema:

$$\lambda = \frac{1}{121,8} \approx 0,00821 \text{ falhas/dia}$$

Substituindo o valor encontrado na Equação 4 na Equação 3 obteremos a Curva de confiabilidade que dita o comportamento da confiabilidade no objeto de estudo

$$R(t) = e^{-0,00821 t} \quad (14)$$

Comparando com o cenário anterior, nota-se que o aumento da taxa de falha resulta em uma curva de confiabilidade mais acentuada, ou seja, a probabilidade de falha ao longo do tempo cresce mais rapidamente, refletindo diretamente a redução do *MTBF*.

A partir da Equação 14 permite estimar a probabilidade de o equipamento permanecer em operação sem falhas ao longo do tempo, sendo uma ferramenta fundamental para análises de confiabilidade e tomada de decisão em estratégias de manutenção, Logo a partir dessa equação é possível estimar uma curva de confiabilidade a qual é apresentada a seguir no Figura 13

Figura 13 – Curva de confiabilidade R(t)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.9.3 Comparativo de Confiabilidade ao Final do Período

Para avaliar o impacto do número de falhas na confiabilidade do equipamento, foi calculada a probabilidade de operação sem falhas ao final do último dia do segundo ano, ou seja, para $t = 731$ dias. No primeiro cenário, considerando cinco falhas no período, a taxa de falha é $\lambda = 0,00684$ falhas/dia. Substituindo na Equação 13:

$$R(731) = e^{-0,00684 \times 731} \approx e^{-5} \approx 0,0067$$

Isso indica que a probabilidade de o equipamento operar continuamente por todo o período de dois anos sem falhar é de aproximadamente 0,67%.

No segundo cenário a partir da Equação 14, considerando seis falhas, a taxa de falha aumenta para $\lambda = 0,00821$ falhas/dia. Assim:

$$R(731) = e^{-0,00821 \times 731} \approx e^{-6} \approx 0,0025$$

Nesse caso, a probabilidade de operação sem falhas ao longo dos dois anos cai para aproximadamente 0,25%.

Comparando os dois resultados, observa-se que o aumento de apenas uma falha no período reduz significativamente a confiabilidade do equipamento ao longo do tempo. Em termos relativos, há uma queda de aproximadamente 63% na probabilidade de operação sem falhas, evidenciando a sensibilidade do modelo exponencial ao aumento da taxa de falha.

Observa-se que, em ambos os cenários analisados, os valores de confiabilidade ao final do período de 731 dias são extremamente baixos, próximos de zero. Esse resultado, à primeira vista, pode parecer indicar um desempenho inadequado do equipamento, porém deve ser interpretado com cautela.

A função de confiabilidade utilizada representa a probabilidade de o equipamento operar continuamente sem nenhuma falha ao longo de todo o intervalo de tempo considerado. Nesse contexto, ao se avaliar um período longo, como dois anos, a probabilidade de não ocorrer nenhuma falha tende naturalmente a valores muito reduzidos, mesmo para sistemas considerados confiáveis.

Além disso, o modelo exponencial assume uma taxa de falha constante, o que implica que a probabilidade de falha se acumula continuamente ao longo do tempo. Dessa forma, quanto maior o horizonte de análise, menor será o valor de $R(t)$.

Portanto, os baixos valores encontrados não necessariamente indicam um problema crítico de confiabilidade, mas sim refletem a natureza do modelo probabilístico adotado e o longo período de avaliação. Para análises mais práticas de manutenção, é comum avaliar a confiabilidade em intervalos menores de tempo ou intervalos maiores, quando se conhece o histórico completo do ativo, o que não é o nosso caso.

Dessa forma, a interpretação adequada dos resultados deve sempre considerar o horizonte de tempo analisado, evitando conclusões equivocadas sobre o desempenho real do equipamento.

Logo partindo do princípio que se não tivéssemos realizados as alterações para a campanha de 2025, supondo que a média de falhas ao ano continuasse em 3 ao ano, teríamos que a confiabilidade do ativo cairia em torno de 63% quando comparados os dois valores no último dia do período analisado.

4.10 OEE do equipamento

A Eficiência Global do Equipamento, conhecida pela sigla *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*), é um indicador amplamente utilizado para avaliar o desempenho global de um ativo produtivo. No contexto deste trabalho, o cálculo do *OEE* foi inicialmente considerado como uma possibilidade de análise complementar, pois o indicador permitiria avaliar de forma mais ampla o impacto das ações de manutenção sobre o desempenho operacional do equipamento. No entanto, sua aplicação quantitativa não foi possível devido à indisponibilidade de dados essenciais para a determinação confiável dos três fatores que compõem o indicador.

Embora tenham sido levantadas informações relacionadas às ordens de manutenção, custos, falhas, tempos de reparo e indicadores como *MTBF*, *MTTR* e confiabilidade operacional, não estavam disponíveis registros suficientemente completos sobre o tempo planejado de operação, tempo real de operação, velocidade ou capacidade real do equipamento, perdas de desempenho, produção associada ao ativo e índices de qualidade do processo. Esses dados são indispensáveis para o cálculo do *OEE*, uma vez que o indicador depende da integração entre informações de manutenção, operação e qualidade.

Além disso, o ativo estudado, o Chiller 1, caracteriza-se como um equipamento de utilidade industrial, responsável por fornecer suporte térmico ao processo, e não como uma máquina diretamente associada à contagem de peças ou unidades produzidas. Dessa forma, a aplicação direta do modelo tradicional de *OEE*, baseado em produção real, produção teórica, peças boas e peças totais, exigiria adaptações metodológicas. Para esse tipo de equipamento, seria necessário definir critérios específicos, como capacidade térmica nominal, capacidade térmica real entregue, tempo em que a temperatura de operação permaneceu dentro da faixa especificada e impacto das variações térmicas sobre o processo produtivo.

Como essas informações não estavam disponíveis de forma padronizada e rastreável no período analisado, a realização do cálculo poderia gerar resultados imprecisos ou pouco representativos da real eficiência operacional do equipamento. A utilização de estimativas sem base operacional consistente comprometeria a confiabilidade da análise e poderia levar a interpretações equivocadas sobre o desempenho do ativo.

Dessa forma, optou-se por não calcular quantitativamente o *OEE* neste estudo. Em seu lugar, a análise concentrou-se nos indicadores mais diretamente relacionados à base de dados disponível, como custos de manutenção, *MTBF*, *MTTR* e confiabilidade ope-

racional ($R(t)$). Esses indicadores permitiram avaliar de maneira mais segura os efeitos das ações de manutenção sobre a disponibilidade e a confiabilidade do equipamento ao longo das campanhas de 2024 e 2025.

Portanto, o *OEE* foi tratado como uma ferramenta conceitualmente relevante, porém não aplicada quantitativamente devido às limitações da base de dados.

4.11 Curva da banheira

A curva da banheira é uma representação clássica da taxa de falhas de um equipamento ao longo de sua vida útil. Diferentemente da curva de confiabilidade ($R(t)$), que representa a probabilidade de o ativo operar sem falhas até determinado intervalo de tempo, a curva da banheira descreve o comportamento da taxa instantânea de falhas em função do tempo.

No entanto, para que a curva da banheira seja calculada de forma estatisticamente representativa, é necessário dispor de um histórico amplo de falhas ao longo de diferentes fases da vida do equipamento, preferencialmente desde sua instalação ou comissionamento até estágios avançados de operação. Além disso, é necessário que os dados sejam suficientemente detalhados, contendo datas exatas de falha, tempos acumulados de operação, modos de falha, causas associadas, condições operacionais, intervenções realizadas e eventuais substituições de componentes. Essa separação é importante porque diferentes mecanismos de falha podem apresentar comportamentos distintos, não sendo adequado agrupá-los indiscriminadamente em uma única curva.

No presente trabalho, o recorte temporal adotado compreendeu apenas os anos de 2024 e 2025, período suficiente para avaliar a evolução dos indicadores de manutenção, como *MTBF*, *MTTR* e confiabilidade operacional ($R(t)$), mas limitado para caracterizar todo o ciclo de vida do equipamento. Durante o período analisado, foram observadas poucas ocorrências de falha no Chiller 1, o que permitiu comparar cenários de confiabilidade e avaliar a redução da frequência de falhas, porém não forneceu uma quantidade de dados suficiente para estimar com segurança os parâmetros estatísticos necessários à construção da curva da banheira.

Dessa forma, a curva da banheira não foi calculada quantitativamente neste estudo, pois sua aplicação exigiria uma base histórica mais extensa e representativa, capaz de abranger as diferentes fases de vida do ativo. A tentativa de ajustar uma curva com poucos eventos poderia gerar interpretações imprecisas, como classificar equivocadamente o equipamento em fase de mortalidade infantil, vida útil ou desgaste. Assim, optou-se por utilizar a curva de confiabilidade ($R(t)$), o *MTBF* e o *MTTR* como indicadores mais adequados ao volume e à qualidade dos dados disponíveis.

4.12 Discussão dos resultados

Para finalizar este trabalho, vamos avaliar se as medidas tomadas foram válidas para sustentar o ponto inicial do trabalho "Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de gestão da manutenção para a melhoria da disponibilidade e confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro"

Logo para validar o ponto central deste trabalho, espera-se demonstrar que a aplicação das ferramentas de gestão da manutenção foi capaz de gerar melhorias reais e mensuráveis nos indicadores de desempenho dos sistemas e equipamentos mecânicos da planta química estudada. Dessa forma, a conclusão deve verificar se as ações implementadas sustentaram a proposta inicial do estudo, comprovando a efetividade das metodologias utilizadas na melhoria da disponibilidade e confiabilidade operacional.

A validação ocorre principalmente por meio da comparação entre os cenários anteriores e posteriores à aplicação das ferramentas de manutenção. Espera-se observar redução na frequência de falhas corretivas, aumento do Tempo Médio Entre Falhas, manutenção ou redução do Tempo Médio para Reparo, além do aumento da disponibilidade operacional dos ativos. Esses resultados indicam que os equipamentos passaram a operar de maneira mais estável, com menor impacto de interrupções não programadas no processo produtivo.

Outro ponto esperado é a demonstração de que as ferramentas de gestão permitiram maior controle sobre o processo de manutenção. A utilização de indicadores de desempenho, análise histórica de falhas, planejamento de intervenções e acompanhamento sistemático das ordens de manutenção deve evidenciar uma gestão mais estruturada e orientada por dados. Assim, espera-se comprovar que as decisões passaram a ser tomadas com base em critérios técnicos e estatísticos, reduzindo ações reativas e aumentando a previsibilidade operacional.

Também é importante validar se houve melhoria na confiabilidade dos equipamentos ao longo do período analisado. Através das curvas de confiabilidade e da análise probabilística de falhas, espera-se demonstrar que os ativos apresentaram maior capacidade de permanecer em operação durante o intervalo de tempo estudado. Caso as curvas indiquem maior probabilidade de funcionamento sem falhas após as intervenções realizadas, isso reforça a eficácia das estratégias aplicadas.

Além dos resultados quantitativos, espera-se verificar impactos qualitativos relacionados à cultura de manutenção da empresa. A padronização de processos, melhoria no fluxo de informações, maior integração entre operação e manutenção e aumento da capacidade de planejamento representam fatores que sustentam a continuidade dos ganhos obtidos. Esses aspectos demonstram que a melhoria não está limitada apenas aos indicadores numéricos, mas também ao amadurecimento da gestão de ativos industriais.

4.12.1 Custos 2024 x 2025

A comparação entre os Gráficos 6 e 10 de custos totais dos anos de 2024 e 2025 demonstra uma mudança significativa no comportamento dos gastos relacionados aos ativos e sistemas avaliados. Em 2024, observa-se uma distribuição mais elevada e dispersa dos custos entre os equipamentos, com destaque para o ativo de Jupiá, que apresentou o maior custo do período, aproximando-se de R\$ 300 mil. Além disso, outros equipamentos também apresentaram valores expressivos, indicando um cenário de maior incidência de falhas corretivas e intervenções de manutenção com impacto financeiro relevante.

Já em 2025, percebe-se uma redução considerável dos custos totais em praticamente todos os ativos analisados. O custo máximo registrado caiu para aproximadamente R\$ 140 mil, representando uma redução próxima de 50% em relação ao maior valor observado no ano anterior. Essa redução evidencia um comportamento mais controlado dos gastos de manutenção, sugerindo aumento da estabilidade operacional dos equipamentos e maior eficiência nas ações aplicadas.

Outro ponto importante é a diminuição da variabilidade entre os custos dos ativos em 2025, demonstrando uma padronização maior do desempenho operacional e da gestão de manutenção. Equipamentos que anteriormente apresentavam custos elevados passaram a operar com menores impactos financeiros, indicando possível redução da frequência de falhas, melhoria no planejamento das intervenções e maior efetividade das estratégias de manutenção implementadas.

Além da redução dos custos, um dos principais aprendizados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho foi a importância do melhor gerenciamento e da organização do alojamento dos custos de manutenção. A padronização dos registros e a correta distribuição dos gastos entre os ativos permitiram uma análise mais precisa dos impactos financeiros, contribuindo para tomadas de decisão mais assertivas e para uma gestão de manutenção mais estratégica e eficiente.

4.12.2 Tempo médio entre falhas do Chiller estudado 2024 X 2025:

A análise dos resultados obtidos para o Chiller 1 entre os anos de 2024 e 2025 demonstra uma evolução significativa na confiabilidade operacional do equipamento. O Tempo Médio Entre Falhas apresentou aumento de aproximadamente 2921,04 horas em 2024 para 4373 horas em 2025, representando um crescimento em torno de 47,9% no intervalo médio de operação entre falhas.

Esse resultado evidencia uma redução na frequência de ocorrências de falhas ao longo do período analisado, indicando que o equipamento passou a operar por mais tempo de forma contínua e estável. O aumento do *MTBF* está diretamente relacionado à melhoria das práticas de manutenção aplicadas, ao melhor acompanhamento das intervenções e à maior efetividade no tratamento das causas de falha identificadas durante o estudo.

Além do impacto técnico, a evolução observada também contribui para ganhos operacionais e financeiros, uma vez que a diminuição das paradas corretivas reduz perdas produtivas, custos de manutenção emergencial e impactos na disponibilidade do sistema. Os resultados demonstram que a aplicação das ferramentas de gestão da manutenção possibilitou um aumento da confiabilidade do Chiller 1, validando a efetividade das ações implementadas ao longo do trabalho.

Dessa forma, conclui-se que as estratégias adotadas para reorganizar a manutenção do equipamento, juntamente com a melhoria no planejamento das intervenções, no acompanhamento das falhas e na gestão das atividades de manutenção, contribuíram de maneira positiva para o aumento da confiabilidade operacional do Chiller 1. Além disso, a reorganização da geração de ordens de manutenção e do processo de alocamento de custos permitiu obter um custeio mais verídico e representativo sobre o ativo, proporcionando maior precisão na análise dos gastos relacionados ao equipamento. Os resultados obtidos reforçam a importância da utilização de indicadores de manutenção como suporte para tomadas de decisão mais assertivas e para a promoção de maior estabilidade operacional dos ativos industriais.

4.12.3 Tempo médio de reparo do Chiller estudado 2024 X 2025:

A análise do Tempo Médio para Reparo *MTTR* do Chiller 1 entre os anos de 2024 e 2025 demonstra que o indicador permaneceu estável em aproximadamente 7 horas para ambos os períodos analisados. Esse comportamento indica que a equipe de manutenção manteve um padrão consistente no tempo necessário para execução das intervenções

corretivas no equipamento.

A estabilidade do *MTTR* evidencia que os procedimentos de manutenção já apresentavam um nível consolidado de eficiência operacional, permitindo que as falhas fossem tratadas dentro de um intervalo de tempo semelhante nos dois anos avaliados. Esse resultado também pode estar relacionado ao conhecimento técnico da equipe sobre o ativo, à padronização das atividades de manutenção e à disponibilidade dos recursos necessários para execução dos reparos.

Mesmo sem redução no tempo médio de reparo, os ganhos observados no aumento do *MTBF* demonstram que o principal avanço obtido esteve relacionado à diminuição da frequência de falhas, e não necessariamente à redução do tempo de intervenção. Dessa forma, o equipamento passou a operar por períodos maiores entre ocorrências, mantendo a capacidade da equipe em executar os reparos de maneira consistente e controlada.

Além disso, as estratégias adotadas para reorganização da manutenção, da geração de ordens de serviço e do alocamento dos custos contribuíram para uma gestão mais estruturada das intervenções realizadas no Chiller 1. Esse processo permitiu maior rastreabilidade das atividades executadas e um custeio mais verídico relacionado ao ativo, fortalecendo a confiabilidade das informações utilizadas para análise e tomada de decisão na gestão da manutenção.

4.12.4 Confiabilidade operacional:

A análise das curvas de confiabilidade $R(t)$ desenvolvidas neste trabalho permitiu avaliar quantitativamente o comportamento do equipamento ao longo de um período de 731 dias de operação, considerando dois cenários distintos de ocorrência de falhas. A partir da aplicação do modelo exponencial de confiabilidade, foi possível verificar de forma clara o impacto que a variação da taxa de falha exerce sobre a probabilidade de operação contínua do ativo.

No cenário com cinco falhas ao longo dos dois anos analisados, o equipamento apresentou um *MTBF* de aproximadamente 146,2 dias, equivalente a 3508,8 horas, resultando em uma taxa de falha de aproximadamente 0,00684 falhas por dia. Já no cenário hipotético com seis falhas no mesmo período, o *MTBF* foi reduzido para aproximadamente 121,8 dias, aumentando a taxa de falha para cerca de 0,00821 falhas por dia. Essa diferença, embora aparentemente pequena, provocou alterações significativas no comportamento das curvas de confiabilidade.

Os resultados mostraram que, ao final do período analisado, a probabilidade de operação contínua sem falhas foi de aproximadamente 0,67% para o cenário com cinco falhas e de aproximadamente 0,25% para o cenário com seis falhas. Comparando os dois resultados, observou-se uma redução relativa de aproximadamente 63% na confiabilidade do equipamento ao final do período, evidenciando a elevada sensibilidade do modelo exponencial ao aumento da frequência de falhas.

Entretanto, os baixos valores de confiabilidade obtidos ao final dos 731 dias não devem ser interpretados isoladamente como um indicativo de desempenho inadequado do equipamento. Esse comportamento é consequência da própria natureza probabilística do modelo exponencial adotado, no qual a probabilidade de ocorrência de falhas se acumula continuamente ao longo do tempo. Dessa forma, quanto maior o horizonte de análise considerado, menor tende a ser o valor da função de confiabilidade $R(t)$, mesmo para equipamentos que apresentam comportamento operacional satisfatório.

Além disso, a comparação entre os cenários permitiu demonstrar que a redução do número de falhas ao longo do tempo impacta diretamente o comportamento da curva de confiabilidade, contribuindo para um decaimento menos acentuado da probabilidade de operação sem falhas. Assim, os resultados obtidos evidenciam a importância da redução da taxa de falha como estratégia para melhoria do desempenho operacional e aumento da confiabilidade de ativos industriais.

Dessa forma, os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitem concluir que a aplicação das ferramentas de gestão da manutenção foi eficaz para sustentar a proposta inicial do estudo de caso desenvolvido na planta química de clorato de sódio e dióxido de cloro. A análise dos indicadores demonstrou que as ações implementadas contribuíram diretamente para a melhoria da confiabilidade e da disponibilidade operacional dos equipamentos avaliados, validando a utilização de metodologias estruturadas de manutenção como suporte para o aumento da estabilidade operacional dos ativos industriais.

Os resultados apresentados evidenciaram redução dos impactos financeiros relacionados às intervenções corretivas, maior controle sobre os custos de manutenção e evolução significativa na organização das informações e das ordens de serviço. A melhoria no processo de alocamento de custos permitiu uma análise mais precisa e representativa dos gastos associados aos ativos, fortalecendo a confiabilidade das informações utilizadas para tomada de decisão e tornando o processo de gestão mais estratégico e orientado por dados.

Além disso, o aumento de aproximadamente 45,7% no *MTBF* do Chiller 1 demonstrou que o equipamento passou a operar por períodos maiores entre falhas, refletindo diretamente a efetividade das ações aplicadas no acompanhamento das intervenções, no tratamento das causas de falha e no planejamento das atividades de manutenção. Mesmo com a manutenção do *MTTR* em aproximadamente 7 horas, os resultados reforçam que os principais ganhos obtidos estiveram relacionados à redução da frequência de falhas e ao aumento da estabilidade operacional do sistema.

As análises de confiabilidade também permitiram comprovar a importância da redução da taxa de falha no comportamento operacional do equipamento. As curvas desenvolvidas demonstraram que pequenas reduções na frequência de falhas geram impactos significativos na probabilidade de operação contínua ao longo do tempo, evidenciando a relevância das estratégias preventivas e do monitoramento sistemático dos indicadores de manutenção.

Por fim, conclui-se que a aplicação integrada das ferramentas de gestão da manutenção não apenas proporcionou melhorias quantitativas nos indicadores analisados, mas também contribuiu para o amadurecimento da cultura de manutenção da empresa, promovendo maior padronização dos processos, melhor rastreabilidade das intervenções e maior integração entre planejamento, execução e controle das atividades. Dessa forma, o trabalho demonstra que a utilização de indicadores de desempenho, análise histórica de falhas e estratégias estruturadas de manutenção representa um fator fundamental para o aumento da confiabilidade, disponibilidade e eficiência operacional de sistemas e equipamentos mecânicos industriais.

Entretanto, apesar dos resultados positivos obtidos ao longo deste estudo, destaca-se que a ausência de dados completos relacionados à operação do equipamento limitou uma análise ainda mais abrangente sobre a eficiência global do ativo. Caso houvesse acesso integral às informações operacionais da máquina, seria possível complementar a problemática abordada por meio da aplicação do indicador *OEE* (*Overall Equipment Effectiveness*), ferramenta amplamente utilizada na indústria para mensurar a eficiência global dos equipamentos. A utilização desse indicador permitiria integrar em uma única análise fatores relacionados à disponibilidade, desempenho e qualidade operacional, proporcionando uma avaliação mais robusta dos impactos das estratégias de manutenção implementadas. Assim, a inclusão do *OEE* contribuiria significativamente para fortalecer as conclusões obtidas, ampliando a compreensão sobre a real eficiência operacional e a efetividade das ações de manutenção aplicadas no equipamento estudado.

Além disso, ressalta-se que o presente trabalho foi desenvolvido com base em duas épocas distintas de análise, as quais se complementam e possibilitam uma avaliação comparativa da evolução dos indicadores e das estratégias de manutenção aplicadas ao equipamento. Contudo, caso houvesse disponibilidade do histórico completo de operação da máquina para a realização dos cálculos comparativos, seria possível obter maior confiabilidade e robustez nos resultados operacionais apresentados. A utilização de um volume mais amplo de dados permitiria análises mais consistentes sobre o comportamento do equipamento ao longo do tempo, reduzindo incertezas, identificando tendências operacionais e fortalecendo a precisão técnica das conclusões obtidas. Dessa forma, os resultados apresentados poderiam ser avaliados com maior segurança e profundidade, ampliando ainda mais a confiabilidade das análises desenvolvidas ao longo deste estudo.

4.12.5 Pontos de melhorias para futuros estudos:

Com base nos resultados obtidos ao longo deste estudo temos oportunidades de melhoria identificadas durante a aplicação das ferramentas de gestão da manutenção, alguns pontos podem ser considerados como propostas para trabalhos futuros e continuidade desta pesquisa e serão apresentados a seguir.

Inicialmente, recomenda-se aprofundar a aplicação de técnicas de manutenção preditiva baseadas em monitoramento contínuo de condição, utilizando sensores inteligentes, sistemas supervisórios. A integração dessas tecnologias pode ampliar a capacidade de monitoramento em tempo real dos ativos industriais, permitindo intervenções mais assertivas e redução das falhas inesperadas.

Outro ponto relevante consiste na implementação de modelos de manutenção prescritiva utilizando inteligência artificial e aprendizado de máquina. Estudos futuros podem avaliar algoritmos capazes de prever falhas com maior antecedência e recomendar automaticamente estratégias de intervenção, contribuindo para otimização do planejamento das atividades de manutenção e melhoria da disponibilidade operacional.

Também se sugere o aprofundamento das análises de criticidade e confiabilidade aplicadas aos equipamentos considerados estratégicos dentro do processo produtivo. A ampliação do estudo para outros ativos industriais além do equipamento analisado neste trabalho pode contribuir para a construção de uma matriz global de criticidade da planta, auxiliando na priorização de recursos, investimentos e planos de manutenção.

Outro aspecto importante refere-se ao desenvolvimento de análises econômicas mais

detalhadas relacionadas às estratégias de manutenção adotadas. Trabalhos futuros podem incluir estudos de custo do ciclo de vida dos ativos (*Life Cycle Cost LCC*), retorno sobre investimento das melhorias implementadas e avaliação financeira dos impactos obtidos com o aumento da confiabilidade e redução das falhas operacionais.

Sugere-se ainda ampliar a utilização integrada de indicadores de desempenho, relacionando métricas de confiabilidade, como *MTBF* e *MTTR*, com indicadores produtivos, energéticos e de eficiência operacional, como o *OEE*. Essa abordagem pode proporcionar uma visão mais sistêmica dos impactos da manutenção sobre o desempenho global da planta industrial.

Outro ponto de continuidade está relacionado ao fortalecimento da cultura organizacional voltada à confiabilidade. Estudos futuros podem avaliar os impactos do treinamento técnico das equipes, da integração entre manutenção e operação e da aplicação mais aprofundada dos pilares da Manutenção Produtiva Total sobre a redução de falhas e melhoria do desempenho operacional.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos com períodos maiores de acompanhamento operacional, permitindo análises mais robustas sobre o comportamento das falhas, validação dos ganhos obtidos nos indicadores de confiabilidade e disponibilidade e avaliação da sustentabilidade das melhorias implementadas ao longo do ciclo de vida dos equipamentos. Também é recomendado que, para os próximos estudos, sejam realizadas análises de falha mais aprofundadas, utilizando metodologias estruturadas como análise de causa raiz, *FMEA* e estudos de confiabilidade aplicados aos modos de falha mais críticos, possibilitando a identificação de falhas recorrentes e o desenvolvimento de estratégias de manutenção ainda mais assertivas.

Além disso, sugere-se a ampliação da integração entre os dados históricos de manutenção, operação e custos, permitindo análises mais completas sobre o impacto econômico das intervenções realizadas e contribuindo para tomadas de decisão mais estratégicas dentro da gestão da manutenção. Dessa forma, os estudos futuros poderão não apenas consolidar os resultados obtidos neste trabalho, mas também promover maior maturidade dos processos de manutenção, aumento da confiabilidade operacional e otimização contínua da disponibilidade dos ativos industriais.

4.12.6 Continuidade do estudo:

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho evidenciam oportunidades adicionais de desenvolvimento que poderão ser exploradas em etapas futuras da pesquisa. Considerando que o presente estudo ainda se encontra em processo de consolidação das melhorias propostas, espera-se que a continuidade das análises permita aprofundar a compreensão dos impactos das ações implementadas e ampliar os ganhos relacionados à gestão da manutenção.

Um dos fatores que favorecerá a evolução deste trabalho será a maior confiabilidade das informações registradas no sistema de gestão da manutenção após a implementação das mudanças realizadas entre 2024 e 2025. Com a padronização dos registros, melhoria da qualidade dos apontamentos e maior aderência das equipes aos processos estabelecidos, será possível dispor de uma base de dados mais robusta para futuras análises. Dessa forma, as avaliações subsequentes poderão ser conduzidas com maior precisão, permitindo conclusões mais consistentes e representativas da realidade operacional.

Como continuidade da metodologia desenvolvida, pretende-se implementar uma análise de backlog avançada e automatizada. Essa abordagem deverá incorporar critérios como criticidade dos ativos, impacto na produção, riscos operacionais, tempo de permanência das atividades em carteira e disponibilidade de recursos. Além disso, a utilização de ferramentas de Business Intelligence (BI) poderá permitir a construção de dashboards dinâmicos para acompanhamento em tempo real das demandas de manutenção, proporcionando maior agilidade no processo de tomada de decisão.

Também está prevista a criação de uma rotina estruturada de avaliação semanal do desempenho da manutenção baseada em indicadores-chave de desempenho (KPIs). O monitoramento contínuo de métricas como backlog, aderência ao planejamento, percentual de execução das manutenções preventivas, disponibilidade operacional, MTBF e MTTR permitirá acompanhar a evolução dos resultados obtidos e identificar oportunidades de melhoria de forma mais rápida e sistemática.

Em etapas futuras, pretende-se ainda aprofundar as análises de confiabilidade dos ativos críticos por meio da aplicação contínua de metodologias como FMEA, Análise de Causa Raiz (RCA) e estudos estatísticos de falhas. Espera-se que essas ferramentas contribuam para a identificação das principais fontes de perdas e para a definição de estratégias mais eficientes de mitigação dos problemas recorrentes.

Outra frente de desenvolvimento envolve o fortalecimento da integração entre as áreas de manutenção, operação e engenharia. A consolidação de rotinas colaborativas de planejamento e acompanhamento das atividades poderá aumentar a eficiência na utilização dos recursos disponíveis, reduzir conflitos de programação e melhorar o alinhamento entre os objetivos operacionais e estratégicos da organização.

Por fim, a disponibilidade de uma base histórica de dados mais consistente poderá viabilizar, em trabalhos futuros, a aplicação de técnicas de manutenção preditiva e análise avançada de dados, permitindo uma gestão cada vez mais orientada por informações confiáveis e pela antecipação de falhas. Espera-se que essa evolução contribua para elevar os níveis de disponibilidade, confiabilidade e desempenho dos ativos industriais.

5 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de ferramentas de gestão da manutenção para a melhoria da disponibilidade e da confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro. A partir do estudo de caso desenvolvido, foi possível verificar que as ações adotadas contribuíram de forma positiva para a organização das informações de manutenção, para o acompanhamento dos indicadores de desempenho e para a melhoria da estabilidade operacional dos ativos analisados. Dessa forma, os resultados obtidos sustentam a proposta inicial do trabalho, demonstrando que a utilização estruturada de dados, indicadores e práticas de planejamento pode auxiliar diretamente na tomada de decisão e no aumento da eficiência da gestão da manutenção.

A comparação entre os anos de 2024 e 2025 evidenciou uma melhora significativa no controle dos custos de manutenção. Em 2024, os gastos apresentaram maior dispersão entre os ativos, com valores mais elevados e maior concentração em equipamentos críticos. Já em 2025, observou-se redução expressiva dos custos totais, com diminuição do maior valor registrado de aproximadamente 300 mil para cerca de 140 mil Reais. Esse resultado indica maior controle financeiro das intervenções, melhor alocação dos custos e maior confiabilidade das informações registradas no sistema de manutenção. Além da redução dos valores, a melhoria na padronização dos registros permitiu uma análise mais precisa dos impactos financeiros associados aos equipamentos, fortalecendo a gestão baseada em dados.

Em relação ao ativo estudado, o Chiller 1, os indicadores demonstraram evolução relevante na confiabilidade operacional. O Tempo Médio Entre Falhas (*MTBF*) aumentou de aproximadamente 2921,04 horas em 2024 para 4373 horas em 2025, representando crescimento de cerca de 47,9%. Esse aumento indica que o equipamento passou a operar por períodos maiores entre falhas, reduzindo a frequência de interrupções corretivas e contribuindo para maior estabilidade do processo. O Tempo Médio para Reparo (*MTTR*), por sua vez, manteve-se em aproximadamente 7 horas nos dois períodos analisados, demonstrando que a equipe de manutenção preservou um padrão consistente de resposta e execução dos reparos. Assim, o principal ganho observado esteve associado à redução da frequência de falhas, e não necessariamente à diminuição do tempo de reparo.

As curvas de confiabilidade ($R(t)$) também reforçaram a importância da redução da taxa de falhas para o desempenho operacional do equipamento. A análise dos cenários com cinco e seis falhas ao longo do período demonstrou que pequenas variações na

quantidade de falhas podem provocar impactos relevantes na probabilidade de operação contínua sem falhas. Embora os baixos valores de confiabilidade ao final do horizonte analisado sejam consequência do próprio modelo exponencial adotado, a comparação entre os cenários permitiu evidenciar que a redução da frequência de falhas contribui para um decaimento menos acentuado da confiabilidade ao longo do tempo.

Dessa forma, conclui-se que as medidas aplicadas foram válidas para sustentar o ponto central do trabalho. A utilização de ferramentas de gestão da manutenção, associada ao acompanhamento de indicadores como custos, *MTBF*, *MTTR* e confiabilidade operacional, permitiu demonstrar melhorias reais no desempenho do ativo estudado e maior maturidade no controle das informações de manutenção. Além dos ganhos quantitativos, observou-se também evolução qualitativa no processo de gestão, com maior rastreabilidade das ordens de serviço, melhor organização dos dados, maior previsibilidade das intervenções e fortalecimento da cultura de manutenção orientada por indicadores.

Entretanto, algumas limitações devem ser destacadas. A ausência de dados operacionais completos impediu o cálculo quantitativo do OEE, uma vez que não estavam disponíveis informações suficientes sobre tempo planejado de operação, desempenho real, capacidade entregue e qualidade do processo. Da mesma forma, a curva da banheira não foi calculada devido ao recorte temporal limitado e ao baixo número de falhas registradas, fatores que não permitem caracterizar com segurança todas as fases da vida útil do equipamento. Portanto, recomenda-se que estudos futuros sejam desenvolvidos com maior período de acompanhamento, maior integração entre dados de manutenção, operação e custos, além da aplicação de metodologias como *FMEA*, análise de causa raiz, manutenção preditiva e indicadores de eficiência global. Com isso, será possível aprofundar a análise da confiabilidade dos ativos e consolidar uma gestão de manutenção cada vez mais estratégica, preventiva e orientada por dados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 55000: gestão de ativos: visão geral, princípios e terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BAJPAI, Pratima. **Biotechnology for pulp and paper processing**. New York: Springer, 2012.

BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Machinery failure analysis and troubleshooting**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GULLICHSEN, Johan; FOGELHOLM, Carl-Johan. **Chemical pulping**. Helsinki: Fapet Oy, 1999. v. 6.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

KELLY, Anthony; HARRIS, Michael J. **Management of industrial maintenance**. London: Butterworths, 1983.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEVITT, Joel. **Complete guide to preventive and predictive maintenance**. New York: Industrial Press, 2003.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introduction to TPM: total productive maintenance**. Portland: Productivity Press, 1988.

QUALYTEAM. **OEE: como medir a eficiência global dos equipamentos**. João Pessoa: Qualyteam, 29 jul. 2025. Disponível em:

<https://qualyteam.com/pb/blog/oeeficiencia-global-dos-equipamentos/>.

Acesso em: 18 mar. 2026.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM: planejamento e controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MEGYESY, Eugene F. **Pressure vessel handbook**. 14. ed. Tulsa: Pressure Vessel Publishing, 2008.

WIREMAN, Terry. **Total productive maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2004.

ANEXO A – Ata de defesa Completa

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Estudo de caso sobre a aplicação de ferramentas de gestão da manutenção para a melhoria da disponibilidade e confiabilidade de sistemas e equipamentos mecânicos em uma indústria química de clorato de sódio e dióxido de cloro

Aluno: Matheus Henrique Panini R.A:182053857

Orientador: Dr Márcio Antonio Bazani

Aprovado (x) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 8.0

Comissão Examinadora:

Prof.Dr Márcio Antonio Bazani

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO ANTONIO BAZANI**
Data: 18/06/2026 15:34:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ass: _____

Presidente (Orientador)

Doutorando(a): Edimar Aparecido dos Santos Duran

Ass: _____

Documento assinado digitalmente
 **EDIMAR APARECIDO DOS SANTOS DURAN**
Data: 18/06/2026 14:47:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutorando(a): Letícia Karolayne Moreira Firmo .

Ass: _____

Documento assinado digitalmente
 **LETICIA KAROLAYNE MOREIRA FIRMO**
Data: 18/06/2026 14:54:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ass: _____



Assinatura do Aluno

Assinado digitalmente via ZapSign por
matheus henrique panini
Data 16/06/2026 21:39:17.130 (UTC-0300)

Ilha Solteira (SP) 15 de Junho de 2026

Relatório de Assinaturas

Datas e horários em UTC-0300 (America/Sao_Paulo)
Última atualização em 16 Junho 2026, 21:39:17

Status: Assinado

Documento: Ata De Defesa TG (1).Pdf

Número: 37247391-fc4c-4423-b8bc-6484fb79e735

Data da criação: 16 Junho 2026, 21:37:56

Hash do documento original (SHA256): 8073f84603a2a38355ce0af87b9a44f677c659081094c22e7126cf777b7a03b1



Assinaturas

1 de 1 Assinaturas

Assinado  via ZapSign by Truora MATHEUS HENRIQUE PANINI Data e hora da assinatura: 16/06/2026 21:39:17 Token: 69203d96-921d-4ddb-8662-4671fa01a11d		Assinatura  matheus henrique panini
Pontos de autenticação: Telefone: 5518981646148 E-mail: matheus.panini@unesp.br		Localização aproximada: -20.813284, -51.679441 IP: 170.254.20.12 Dispositivo: Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/148.0.0.0 Safari/537.36 OPR/132.0.0.0

INTEGRIDADE CERTIFICADA - ICP-BRASIL

Assinaturas eletrônicas e físicas têm igual validade legal, conforme MP 2.200-2/2001 e Lei 14.063/2020.

Confirme a integridade do documento aqui.



Este Log é exclusivo e parte integrante do documento número 37247391-fc4c-4423-b8bc-6484fb79e735, segundo os [Termos de Uso da ZapSign](#), disponíveis em zapsign.com.br