



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DAS ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

IMPLANTAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO DE CENTRAIS DE AR
CONDICIONADO EM UMA EMPRESA MINERADORA NO ESTADO DO PARÁ

VICTOR GABRIEL DA SILVA MELO

UFPA / ITEC / FEEB
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2026

VICTOR GABRIEL DA SILVA MELO

IMPLANTAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO DE CENTRAIS DE AR
CONDICIONADO EM UMA EMPRESA MINERADORA NO ESTADO DO PARÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE
CURSO SUBMETIDO À AVALIAÇÃO DA
BANCA EXAMINADORA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

DATA DE APROVAÇÃO: 19/02/2026
CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Reinaldo Correa Leite
(ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior
(EXAMINADOR(A) INTERNO - UFPA)

Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos
(EXAMINADOR(A) INTERNO - UFPA)

"Se você não pode voar, então corra, se você não pode correr, ande, se você não pode andar, engatinhe, mas tudo que você tem que fazer é continuar seguindo em frente."

Martin Luther King Jr.

(1929 - 1968)

À Deus, minha família e amigos, dedico.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por seu amor incondicional, por ter estado ao meu lado desde o início e por ter me capacitado e dado forças para trilhar a jornada desafiadora da graduação. Sem Ele, nada disso seria possível.

Agradeço à minha família, em especial meus pais, Evaldo e Helen Melo, que me deram todo o suporte necessário e acreditaram no meu potencial. Por todos os sábios conselhos, fundamentais para manter-me nos caminhos corretos.

Aos meus irmãos, Lucas e Isabela Melo, por verem em mim uma fonte de inspiração para que possam ir em busca dos seus próprios sonhos.

À minha namorada, Dagilla Santos, por enxergar em mim virtudes que eu não percebia, por acreditar no meu potencial e estar sempre disposta a ouvir sobre as minhas experiências, boas e ruins, ao longo dessa trajetória.

A todos os amigos que fiz durante a graduação, pelo companheirismo, pela parceria e pelos bons momentos proporcionados, que aliviaram o peso das situações difíceis.

Aos meus professores, por serem a ponte para o conhecimento e exercerem com zelo e dedicação essa tão honrosa empreitada que é ensinar.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado.

Findo este capítulo tão significativo da minha trajetória acadêmica com a mesma convicção expressa pelo apóstolo Paulo em 1 Co 10:31 "Portanto, quer comais, quer bebais ou façais qualquer outra coisa, fazei tudo para a glória de Deus". Que esta conquista e as que estão por vir, não fujam do propósito final: glorificar a Deus.

Lista de Síglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Inteligência Artificial (<i>Artificial Intelligence</i>)
CLP	Controlador Lógico Programável
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i> (Sistema Computadorizado de Gestão da Manutenção)
CPMV	Custo de Manutenção sobre o Valor de Reposição
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento dos Recursos da Empresa)
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e Efeitos)
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet das Coisas Industrial)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (Tempo Médio Para Reparo)
NBR	Norma Brasileira
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficácia Global dos Equipamentos)
OM	Ordem de Manutenção
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
PPSA	Mina PPSA
RCC	Mina Rio Capim Caulim

RCM	<i>Reliability-Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada em Confiabilidade)
TI	Tecnologia da Informação
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas (equivalente em português ao MTBF)
TMPR	Tempo Médio para Reparo (equivalente em português ao MTTR)
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)

Lista de Figuras

2.1	Linha do tempo retratando os principais avanços da manutenção.	21
3.1	Mina de extração do Caulim.	49
3.2	Setor de centrifugação da mina.	50
3.3	Setor de bombeamento da polpa tratada.	51
3.4	Mapa de localização da mina RCC e outros projetos da empresa.	52
3.5	Alojamento da mina RCC.	53
3.6	Gráfico de disponibilidade física do gerador principal da mina.	55
3.7	Trecho do banco de dados gerado a partir das solicitações via Google formulários.	56
3.8	Solicitações de serviços de refrigeração registrados no ano de 2024.	57
3.9	Consolidado de informações diárias do setor de refrigeração.	57
4.1	Descrição das atividades trimestrais do plano de manutenção.	61
4.2	Descrição das atividades semestrais do plano de manutenção.	62
4.3	Recorte de um trecho do mapa de 52 semanas referente as atividades do setor de refrigeração.	62
5.1	Gráfico de ocorrências de falhas de janeiro à julho de 2025.	66
5.2	Gráfico de disponibilidade física dos equipamentos de refrigeração de janeiro à julho de 2025.	67
5.3	Consolidado de informações diárias referente ao mês de julho de 2025. . . .	67
5.4	Gráfico dos tipos de manutenção de janeiro à julho de 2025.	68

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Motivação	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivos específicos	14
1.4	Estrutura do Trabalho	15
1.5	Metodologia	15
2	Referencial Teórico	18
2.1	Histórico e evolução da Manutenção	18
2.2	Gestão da manutenção e a importância do Planejamento e Controle da Manutenção	21
2.3	Defeito, Falha e Pane	24
2.4	Tipos de Manutenção	26
2.4.1	Manutenção Corretiva	26
2.4.2	Manutenção Preventiva	28
2.4.3	Manutenção Preditiva	29
2.4.4	Manutenção Prescritiva	31
2.4.5	Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM	33
2.5	Indicadores de Desempenho da Manutenção	36
2.5.1	Indicadores Clássicos de Desempenho da Manutenção	36
2.5.2	Indicadores Estratégicos e Modernos de Desempenho da Manutenção	40

3	Estudo de Caso: Empresa Mineradora no Estado do Pará	47
3.1	Caracterização da Empresa	47
3.2	Situação Prévia da Manutenção	54
4	Proposta de Implantação do PCM	59
4.1	Escopo da Proposta	59
4.2	Elaboração do Plano de Manutenção	60
4.3	Indicadores de Desempenho Utilizados	62
4.4	Implementação no <i>software</i> ERP TOTVS Protheus	63
5	Resultados	65
6	Considerações Finais	70

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar a implantação de um projeto piloto de Plano de Manutenção em uma empresa do setor de mineração localizada no estado do Pará, com foco na gestão de manutenção dos equipamentos de refrigeração. A proposta foi motivada pela observação, durante realização de estágio técnico, da predominância de práticas corretivas na manutenção, resultando em elevados índices de falhas, sobrecarga das equipes e disponibilidade insatisfatória dos ativos. O escopo do trabalho ficou restrito aos sistemas de ar-condicionado *split* instalados nos alojamentos, prédios administrativos e oficinas da mina, totalizando cerca de 140 equipamentos. A metodologia aplicada combinou abordagens qualitativa e quantitativa, e envolveu o diagnóstico da situação anterior, elaboração de um plano de manutenção preventiva, definição de indicadores básicos e implementação no sistema ERP TOTVS Protheus. Como resultado, observou-se uma redução significativa no número de ocorrências de falhas, aumento da disponibilidade operacional e mudança de postura da equipe, que passou a atuar de forma mais planejada e preventiva. O trabalho demonstrou que, mesmo com recursos limitados, é possível alcançar melhorias relevantes na gestão da manutenção, estabelecendo uma base sólida para uma possível implementação em outros setores da planta.

Palavras-chave: Manutenção; PCM; Mineração; Confiabilidade;

Abstract

This study aims to present the implementation of a pilot maintenance plan project at a mining company located in the state of Pará, focusing on the maintenance management of cooling equipment. The proposal was motivated by the observation, during a technical internship, that corrective maintenance practices predominated, resulting in high failure rates, team overload, and unsatisfactory asset availability. The scope of the study was limited to split air-conditioning systems installed in the accommodations, administrative buildings, and mine workshops, totaling about 140 units. The applied methodology combined qualitative and quantitative approaches and involved a baseline assessment, development of a preventive maintenance plan, definition of basic indicators, and implementation of the plan in the TOTVS Protheus ERP system. As a result, there was a significant reduction in the number of breakdowns, an increase in operational availability, and a shift in the team's approach, which began to operate in a more planned and preventive manner. The study showed that, even with limited resources, it is possible to achieve meaningful improvements in maintenance management, establishing a solid foundation for potential implementation in other areas of the plant.

Keywords: Maintenance; Maintenance Planning and Control (MPC); Mining; Reliability;

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa

A manutenção industrial evoluiu de uma abordagem puramente corretiva para um papel estratégico dentro das organizações, especialmente em setores de alta exigência operacional, como a mineração. A eficiência dos processos produtivos, a segurança dos trabalhadores e a disponibilidade dos ativos estão diretamente ligadas à forma como a manutenção é planejada e executada. Dentro desse contexto, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) surge como uma metodologia fundamental para tornar a manutenção mais proativa, organizada e alinhada aos objetivos da empresa.

No setor de mineração, onde os equipamentos operam sob condições extremas e ambientes frequentemente desfavoráveis, a ausência de uma gestão estruturada da manutenção resulta em interrupções inesperadas, desperdício de recursos e aumento dos riscos operacionais. Estudos apontam que os custos decorrentes de falhas não previstas nesse setor são substanciais, evidenciando a importância da implementação de práticas avançadas de manutenção, mesmo em sistemas de apoio como os de refrigeração. Equipamentos de climatização, embora não estejam diretamente ligados ao processo produtivo, exercem papel relevante no conforto e descanso adequado dos colaboradores que trabalham em regime de turno, impactando indiretamente a produtividade e a segurança operacional.

Diante desse cenário, justifica-se a implantação de um Plano de Manutenção voltado aos sistemas de ar-condicionado *split* instalados nos alojamentos, prédios administrativos

e oficinas da mina, como forma de reduzir a predominância de ações corretivas, diminuir a ocorrência de falhas e elevar a disponibilidade operacional desses ativos.

1.2 Motivação

Este trabalho foi motivado pela experiência prática do autor durante a realização de estágio técnico em uma mina de caulim localizada no estado do Pará. Durante esse período, foi possível observar a predominância de práticas corretivas na manutenção dos equipamentos de refrigeração, resultando em elevados índices de falhas, sobrecarga das equipes técnicas e disponibilidade insatisfatória dos ativos. Essa realidade despertou o interesse em propor uma solução estruturada que pudesse contribuir para a melhoria da gestão da manutenção no setor.

A escolha pelo escopo restrito aos sistemas de ar-condicionado *split* se deu principalmente pela maior viabilidade de implementação dentro do período de estágio e pelo impacto direto desses equipamentos no bem-estar dos colaboradores alojados na unidade. A possibilidade de aplicar conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação em um contexto real de operação industrial, aliada à oportunidade de gerar resultados mensuráveis e contribuir efetivamente para a empresa, consolidaram a motivação para o desenvolvimento deste projeto piloto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Implantar um projeto piloto de Plano de Manutenção voltado aos equipamentos de refrigeração em uma unidade mineradora no estado do Pará.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar a situação atual da manutenção de equipamentos de refrigeração na mina;
- Realizar o mapeamento técnico dos equipamentos envolvidos;
- Elaborar um plano de manutenção preventiva com base em ciclos periódicos;

- Implementar as rotinas e registros de manutenção no sistema ERP TOTVS Protheus;
- Aplicar indicadores básicos de desempenho para acompanhar os resultados;
- Comparar os indicadores obtidos após a implantação com os dados do modelo anterior;
- Avaliar a viabilidade da expansão da metodologia para outros equipamentos da planta.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando o histórico e a evolução da manutenção industrial desde a Primeira Revolução Industrial até a Indústria 4.0, os fundamentos da gestão da manutenção e a importância do PCM, os conceitos de defeito, falha e pane conforme a NBR 5462, os tipos de manutenção (corretiva, preventiva, preditiva, prescritiva e centrada em confiabilidade) e os principais indicadores de desempenho utilizados na área.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso na mineradora, incluindo a caracterização da empresa e o diagnóstico da situação prévia da manutenção dos equipamentos de refrigeração.

O Capítulo 4 detalha a proposta de implantação do Plano de Manutenção, contemplando o escopo, a elaboração do plano de manutenção preventiva, os indicadores de desempenho utilizados e a implementação no sistema ERP TOTVS Protheus. O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos após a implantação do projeto piloto, apresentando a análise comparativa dos indicadores de desempenho. Por fim, o Capítulo 6 traz as considerações finais, sintetizando as principais contribuições do trabalho e apontando sugestões para a expansão futura da metodologia para outros setores da planta.

1.5 Metodologia

A metodologia empregada neste estudo é de natureza aplicada, pois busca oferecer uma solução prática para um problema real de manutenção industrial. O trabalho foi desenvolvido com base em uma abordagem mista, combinando análises qualitativas e quantitativas, estruturadas em etapas sequenciais que vão desde o diagnóstico inicial até a

implementação da proposta e avaliação de seus resultados.

Na primeira etapa foi realizado o levantamento da situação atual da manutenção na empresa, a princípio por meio da observação do ambiente de trabalho e análise de registros internos da equipe de manutenção, e posterior brainstorming. Esse diagnóstico possibilitou identificar as práticas predominantes e os gargalos operacionais associados ao modelo empregado, caracterizado principalmente por ações corretivas.

Em seguida, foi feita uma análise comparativa das abordagens de manutenção discutidas no referencial teórico, como corretiva, preventiva e preditiva. De acordo com a literatura, seria adequado aplicar a metodologia FMEA para definir a abordagem mais eficiente para o dado cenário, contudo, essa metodologia não foi empregada neste trabalho, uma vez que a supervisão de manutenção optou diretamente por empregar a abordagem preventiva baseada em inspeções e substituições programadas, após julgar que esta seria a abordagem mais compatível com a realidade da empresa, considerando a limitação de recursos humanos e estruturais impostos.

A terceira etapa consistiu no mapeamento dos equipamentos de refrigeração que fariam parte do estudo, presentes em alojamentos, prédios administrativos, subestações e oficinas da empresa. Esse levantamento foi realizado em planilhas, contemplando informações como quantidade de ativos, características técnicas, localização, entre outros.

Com base nesses dados foi elaborado um Plano de Manutenção, estruturado em ciclos de manutenção previamente definidos (semanal, mensal e anual, conforme a necessidade). O plano contemplou inspeções periódicas, e ações preventivas sistemáticas, e também foram definidos indicadores básicos de desempenho, como disponibilidade operacional e frequência de falhas.

Na etapa seguinte, as informações levantadas (equipamentos, *tags*, periodicidade, tarefas de manutenção, entre outros) foram implementadas no sistema ERP de manutenção Totvs Protheus, disponibilizado pela empresa. Essa integração permitiu maior organização no acompanhamento das intervenções e maior confiabilidade nos registros.

Finalmente o plano proposto foi aplicado em campo, possibilitando a obtenção de resultados concretos. Os dados foram comparados ao cenário anterior, de forma que ficou evidente as melhorias relacionadas à redução de falhas inesperadas, aumento de

disponibilidade e outros benefícios. Essa análise comparativa validou a aplicabilidade da proposta e sua viabilidade como modelo para ser expandido futuramente a outros setores da planta.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Histórico e evolução da Manutenção

Segundo [WYREBSK 1997], a prática de manutenção remonta ao século XVI, com o surgimento das primeiras máquinas têxteis a vapor, quando os operadores eram também responsáveis pelos reparos, treinados pelos próprios projetistas de tais máquinas. Muito tempo depois, durante a Primeira Revolução Industrial (c. 1760–1840), marcada principalmente pela mecanização movida a vapor e hidráulica, as intervenções de manutenção eram predominantemente reativas, geralmente sem qualquer planejamento de forma sistêmica [Moubray 1997]. Faltavam métodos estruturados de manutenção preventiva – uma característica da chamada “primeira geração” da manutenção, na qual, segundo [Moubray 1997], a baixa mecanização tornava a prevenção de falhas pouco prioritária e limitada a rotinas simples de limpeza e lubrificação. Apesar de se tratar de uma abordagem simples, implicava em custos muito elevados de manutenção, interrupções não previstas e perdas expressivas de produtividade, que era resultado da inexistência de métodos estruturados para prevenir essas falhas [Marcorin e Lima 2003]. Até meados da década de 1910, a abordagem de direcionar o próprio operador para diagnosticar e corrigir falhas simples era mantida, e persistia mesmo com a expansão das primeiras linhas de montagem de Henry Ford, as quais já apontavam a necessidade de métodos de manutenção mais sistemáticos [COSTA 2013].

Na Segunda Revolução Industrial (c. 1870–1914), agora marcada pela eletrificação e

pela produção em massa, a manutenção corretiva continuava a predominar no cenário da época, porém nesse mesmo período começaram a surgir as primeiras iniciativas de manutenção preventiva. Em decorrência da Segunda Guerra Mundial (1939–1945) houve um crescimento expressivo na demanda por produção em massa de todo tipo de produtos, que somada a escassez de mão de obra também causada pela guerra, motivaram a transição para técnicas de manutenção preventiva. Nesse período, foram adotadas inspeções periódicas e substituições programadas de componentes, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos equipamentos. [Moubray 1997] classifica essa fase como a “segunda geração” de manutenção, enquanto [Kardec e Nascif 2009] discutem os benefícios e desafios relacionados aos altos custos inerentes às trocas antecipadas de componentes [Moubray 1997, Kardec e Nascif 2009].

Durante a Terceira Revolução Industrial, iniciada por volta dos anos 1960 e impulsionada pelos avanços no ramo da eletrônica, que possibilitou a utilização dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e robôs nos processos de produção industriais, emergiram técnicas de manutenção preditiva, que rapidamente se consolidaram em meados dos anos 1970 [WYREBSK 1997]. A abordagem de manutenção preditiva era fortemente marcada pela utilização de ferramentas de monitoramento, como análise de vibração, termografia infravermelha, ultrassom e análise de lubrificantes, que tornaram possível antecipar os sintomas de falhas, e dessa forma reduzir intervenções emergenciais e os custos relacionados com essas práticas [Otani e Machado 2008].

Na década de 1980, a redução dos preços de microcomputadores e a popularização dos Sistemas Computadorizados de Gestão da Manutenção (CMMS) foram cruciais no fortalecimento da área de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), que será abordado com mais detalhes ao longo deste trabalho. Como consequência, nesse período houve a popularização e incorporação de indicadores como Tempo médio entre falhas (MTBF, do inglês *Mean Time Between Failures*) e Tempo Médio para Reparo (MTTR, do inglês *Mean Time To Repair*), bem como de métodos estruturados como a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA, do inglês *Failure Modes and Effects Analysis*), que elevaram os níveis de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos industriais da época [Xenos 1998, COSTA 2013]. A partir da década de 1990, surgiu o conceito de

manutenção proativa, formalizado por [Fitch 1992], que enfatiza a eliminação das causas-raiz das falhas em vez de focar nos sintomas, enquanto o método RCM de [Moubray 1997] orienta-se pela criticidade e impacto dos equipamentos, embora este autor não categorize a manutenção proativa como uma geração à parte.

Por fim, com a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), a partir de 2010, tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, armazenamento em nuvem, *Machine Learning* e Inteligência Artificial revolucionaram o conceito de manutenção [Machado et al. 2023]. Conforme destacado por [Borlido 2017], tecnologias como a virtualização e a computação em nuvem aumentaram a conectividade e a visibilidade dos processos industriais. Esse contexto tecnológico possibilitou o desenvolvimento da manutenção prescritiva (RxM), que representa a quarta geração da manutenção e uma evolução natural da manutenção preditiva [Machado et al. 2023]. Enquanto a manutenção preditiva indica o que pode acontecer em determinada situação, prevendo resultados futuros de possíveis falhas, a manutenção prescritiva vai além: ela prescreve formas de combater e prevenir essas falhas, integrando algoritmos e modelos matemáticos de previsão com o aprendizado das máquinas para sugerir possibilidades de atuações e intervenções [Machado et al. 2023]. A Inteligência Artificial, nesse contexto, desempenha funções autônomas como detectar, diagnosticar, analisar e solicitar ações de correção, informando a possível causa, quando e onde atuar e como corrigir [Machado et al. 2023]. Estudos mais recentes, como o de [Mahale, Kolhar e More 2025], reforçam o papel da inteligência artificial explicável e integrada como elemento central na manutenção moderna.

Atualmente, as práticas de manutenção estão fundamentadas em normas bem consolidadas: a ABNT NBR 5462:1994, que define os conceitos de confiabilidade e mantenedibilidade, e a ISO 55000:2014, que padroniza a gestão de ativos ao longo de seu ciclo de vida. Essas orientações normativas associadas à gestão estratégica da manutenção como discutido por [COSTA 2013], consolidam o papel da manutenção contemporânea como um elemento essencial para a competitividade, segurança e sustentabilidade nas organizações da atualidade [ABNT NBR 5462 1994, COSTA 2013, ISO 55000 2014].

De forma geral, a evolução da manutenção reflete uma transformação da abordagem puramente corretiva e reativa para uma atividade mais estratégica e estruturada, como é

ilustrado na figura (2.1). A integração de tecnologias digitais, metodologias analíticas e estruturas de gestão tem permitido visibilidade e nível de controle nunca alcançados anteriormente, mas também trazem consigo grandes desafios no que tange ao desenvolvimento de competências em análise de dados, Internet das Coisas, entre outros.



Figura 2.1: Linha do tempo retratando os principais avanços da manutenção.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.2 Gestão da manutenção e a importância do Planejamento e Controle da Manutenção

A gestão da manutenção pode ser compreendida como um conjunto de estratégias, práticas e metodologias aplicadas com o objetivo de garantir a operação eficiente e confiável dos ativos industriais, e sempre buscando a redução das ocorrências de falhas, a otimização dos custos operacionais e ganhos de produtividade nas operações [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013]. No contexto industrial, as atividades de manutenção vão muito além da mera execução pontual de ações corretivas, e assume um papel estratégico fundamental para assegurar a continuidade dos processos produtivos e garantir a segurança operacional dos ativos e das equipes envolvidas [COSTA 2013].

Segundo [Kardec e Nascif 2009], embora a manutenção represente em média 4,47% do faturamento das empresas, seu papel estratégico é fundamental. A disponibilidade e confiabilidade dos ativos correspondem a 95,53% da equação $\text{Faturamento} \times \text{Custo}$, demonstrando que uma simples redução de custos pode ser prejudicial se comprometer esses fatores essenciais, impactando negativamente o lucro e a imagem da empresa. [Marcorin e Lima 2003] apontam que somente ao confrontar os custos da manutenção com os custos da não manutenção (falhas e paradas) percebe-se que investir em manutenção traz retorno, pois reduz tanto os gastos de reparo quanto as perdas por indisponibilidade. Por outro lado, a ausência de uma gestão bem estruturada resulta frequentemente em interrupções inesperadas, desperdício de recursos e aumento dos riscos operacionais, de forma que a eficiência produtiva é diretamente afetada [LINO 2019], além de prejudicar também a segurança dos trabalhadores [Kardec e Nascif 2009].

Especialmente no setor de mineração, onde os equipamentos operam sob condições extremas e ambientes muitas vezes desfavoráveis, a boa gestão da manutenção tem um peso ainda maior. Ativos críticos, em especial os que estão presentes no setor de mineração, tais como caminhões fora-de-estrada, escavadeiras e correias transportadoras demandam um planejamento rigoroso, tendo em vista que qualquer falha pode impactar significativamente a produção e o faturamento da empresa [Morad, Pourgol-Mohammad e Sattarvand 2014]. A literatura bem consolidada nessa área ressalta que, especificamente neste setor, os custos decorrentes de falhas não previstas são substanciais, logo fica evidente a importância da implementação de práticas avançadas e estruturadas na manutenção, inclusive em setores críticos como a mineração [WYREBSK 1997, Xenos 1998].

Dentro deste cenário, um elemento essencial para o sucesso da gestão da manutenção é o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). O PCM é o setor dentro da gestão de manutenção industrial responsável por planejar, programar e monitorar as atividades de manutenção de forma sistemática. Em suma, envolve a elaboração de planos de manutenção – ou seja, a definição de um conjunto de ações de manutenção (principalmente preventivas) e suas respectivas datas de execução – de forma que a manutenção se torne uma atividade organizada e proativa, em vez de meramente reativa às falhas inesperadas [Xenos 1998]. Um plano de manutenção bem estruturado funciona como

um calendário de ações preventivas, baseado nas necessidades reais dos equipamentos e nos dados históricos de falhas e intervenções [Xenos 1998]. Além do planejamento em si, o PCM abrange a programação detalhada dos serviços (quem irá executar, quando e com quais recursos) e o controle de sua execução, garantindo o registro de ocorrências e o acompanhamento dos resultados para realimentar o processo de planejamento. Em outras palavras, o PCM fecha um ciclo de planejar–fazer–verificar–agir dentro da manutenção, permitindo ajustes nos planos com base nos resultados obtidos em campo [Xenos 1998].

Ao programar manutenções preventivas e preditivas nos momentos adequados e coordenar paradas de equipamento previamente com a produção, o PCM busca minimizar paradas não planejadas e evitar falhas catastróficas. Um dos princípios fundamentais é que trabalhos de manutenção planejados são sempre mais vantajosos do que intervenções de emergência. Estudos indicam que a vantagem do trabalho planejado sobre o não-planejado é que este é “sempre mais barato, mais rápido, mais seguro e de maior qualidade” [Karddec e Nascif 2009, p. 39]. Isso ocorre porque, com o planejamento, pode-se aprovisionar antecipadamente peças de reposição, ferramentas e mão-de-obra, evitando improvisos de última hora que costumam elevar os custos e tempo de reparo. O PCM também permite alinhar as intervenções de manutenção aos interesses da produção – por exemplo, agendar paradas em períodos de baixa demanda ou durante janelas de manutenção já previstas –, reduzindo o impacto no desempenho operacional da fábrica. Essa necessidade de sincronização entre manutenção e operação já é destacada por [Xenos 1998, p. 28], ao afirmar que apenas as ações da manutenção não bastam e que é indispensável uma estreita cooperação com o departamento de produção para elevar a *performance* dos equipamentos. Dessa forma, um bom planejamento equilibra o *trade-off* entre disponibilidade e custos, visando alcançar o ponto ótimo mencionado por [Marcorin e Lima 2003], em que o custo de manutenção proporciona a máxima disponibilidade com o máximo lucro, sendo este equilíbrio o grande desafio da gestão.

A relevância prática do PCM na indústria é enorme. Em termos de resultados, a aplicação disciplinada do planejamento e controle gera redução de custos e aumento da confiabilidade dos ativos. Por meio do PCM, as empresas podem implementar políticas de manutenção mistas de forma otimizada – combinando manutenção preventiva, preditiva

e até corretiva planejada onde for adequado –, de acordo com a criticidade de cada equipamento [Xenos 1998]. Ainda conforme [Xenos 1998], a melhor manutenção resulta da combinação dos diversos métodos de manutenção de forma otimizada para cada caso, de acordo com a criticidade do equipamento, evitando tanto excesso de intervenções quanto falhas graves por falta de prevenção. Estudos de caso mostram que, ao sair de um cenário de manutenção puramente reativa e adotar práticas de PCM, as empresas obtêm melhora significativa na disponibilidade operacional das máquinas e na confiabilidade do processo produtivo como um todo. Além disso, o PCM contribui para a segurança e meio ambiente, pois ao programar intervenções preventivas evita-se que falhas inesperadas coloquem em risco os operadores ou causem danos ambientais. Em resumo, o PCM eleva a manutenção a um patamar estratégico: em vez de “apagar incêndios”, a manutenção passa a antecipar problemas e otimizar recursos, tornando-se parte integrante do sucesso operacional e financeiro da organização, corroborando assim com a conclusão de [Marcorin e Lima 2003, p. 41], em que “a função manutenção deve ser encarada como estratégica dentro da organização”, devendo ser implementada como um investimento e não como um gasto, para reduzir os custos totais do processo produtivo.

Neste trabalho, utiliza-se o termo manutenção para designar o conjunto de ações técnicas e administrativas, incluindo atividades de supervisão, destinadas a manter ou restaurar um item em condições que permitam desempenhar sua função requerida, em conformidade com a norma brasileira NBR 5462.

2.3 Defeito, Falha e Pane

De acordo com a [ABNT NBR 5462 1994], que trata sobre a terminologia relacionada à confiabilidade e manutenibilidade, os conceitos de defeito, falha e pane são fundamentais para compreender de forma clara os fenômenos ligados à degradação do desempenho de equipamentos e sistemas industriais. O entendimento preciso desses termos não só permite uma melhor análise de confiabilidade, mas também é indispensável ao definir as estratégias de manutenção mais adequadas em cada caso específico, em especial no que se refere às ações corretivas e preventivas.

Defeito é definido pela [ABNT NBR 5462 1994, p. 3] como o “desvio de uma ca-

racterística de um item em relação aos seus requisitos”. Em outras palavras, o defeito é qualquer desvio, imperfeição ou anomalia que não necessariamente compromete a funcionalidade total do equipamento ou sistema, mas já confere um estado em que uma ou mais características estão fora dos limites especificados em projeto, normas ou padrões técnicos das companhias. É importante destacar que um equipamento pode apresentar defeitos sem necessariamente deixar de executar sua função principal — em muitos casos, defeitos são detectados em inspeções rotineiras ou por meio de monitoramento, e podem ser corrigidos antes que estes evoluam para uma situação mais crítica [ABNT NBR 5462 1994].

Falha, segundo a mesma norma [ABNT NBR 5462 1994, p. 3], é definida como o “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. Ao contrário do defeito, a falha implica na incapacidade do equipamento de cumprir, de maneira total ou parcial, a função para a qual foi projetado, sob condições especificadas de operação. Sabendo disso, tem-se que a falha representa um evento de maior gravidade, uma vez que impacta diretamente na confiabilidade operacional dos equipamentos, e implica em potenciais perdas de produção, qualidade ou até mesmo em riscos à segurança das pessoas e ao meio ambiente. Vale ressaltar que toda falha é, necessariamente, consequência de um ou mais defeitos, mas nem todo defeito evolui para uma falha, pois ao ser descoberto precocemente, pode ser tratado antes de tomar maiores proporções [ABNT NBR 5462 1994].

Já o termo *pane* é definido pela [ABNT NBR 5462 1994, p. 4] como o “Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.”, ou seja, é o estado em que o equipamento perde totalmente sua capacidade funcional, e torna-se completamente incapaz de executar qualquer uma das suas funções requeridas. De forma prática, a *pane* representa uma condição de indisponibilidade total, e exige intervenção imediata para restabelecimento da operação. Assim, pode-se dizer que toda *pane* é uma falha, mas nem toda falha se caracteriza como *pane*, já que existem falhas parciais, em que o equipamento ainda opera, mesmo que de forma limitada [ABNT NBR 5462 1994].

Compreender de forma clara tais diferenças entre defeito, falha e pane é crucial para os profissionais de manutenção diagnosticarem de forma assertiva o estado de “saúde” dos ativos industriais e, a partir daí, definir estratégias adequadas de manutenção. A habilidade de fazer essa diferenciação permite, por exemplo, identificar situações em que ações preventivas podem ser suficientes para evitar o agravamento de defeitos, bem como reconhecer os momentos em que intervenções corretivas são a melhor opção para restaurar a função do equipamento.

2.4 Tipos de Manutenção

2.4.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é definida como a intervenção realizada após a ocorrência de uma pane em equipamento ou sistema, onde o objetivo principal é restabelecer as condições originais de operação. [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013] consideram que as ações corretivas por serem, desencadeadas diretamente pela ocorrência de falhas que não foram previstas, são uma abordagem predominantemente reativa.

Entretanto, em [Kardec e Nascif 2009], os autores dividem a manutenção corretiva em dois tipos principais: a manutenção corretiva emergencial (ou corretiva não planejada) e a manutenção corretiva planejada, conferindo um certo grau de proatividade a estas ações. A manutenção corretiva emergencial se refere à intervenção imediata necessária devido à ocorrência de uma falha não prevista em um ativo crítico e que acaba resultando em paradas imediatas de operação ou perdas significativas de desempenho produtivo. Por outro lado, é considerada como manutenção corretiva planejada quando a falha é identificada e avaliada previamente, e com isso permite que as intervenções necessárias sejam planejadas de maneira que gere o mínimo de impacto na produção.

Apesar deste tipo de manutenção ser amplamente utilizado historicamente, alguns estudos recentes alertam sobre suas limitações, principalmente relacionadas ao aumento dos custos operacionais, à sua natureza imprevisível e ao impacto negativo sobre a produtividade e segurança industrial [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013, VIANA 2020]. Empresas cujos métodos mantenedores são exclusivamente ou predominantemente deste tipo, correm

grandes riscos de enfrentar situações críticas de perda de eficiência operacional, elevação dos custos de manutenção e redução na disponibilidade e confiabilidade dos ativos, além de expor os operadores a riscos de acidentes [COSTA 2013, LINO 2019].

Nos dias atuais, especialmente com o advento da Indústria 4.0 e o desenvolvimento nas áreas de automação e integração dos sistemas produtivos, a manutenção puramente corretiva torna-se uma estratégia inadequada, pois não garante os níveis exigidos de disponibilidade, segurança e eficiência operacional. Por esse motivo, as organizações tendem a buscar cada vez mais uma gestão de manutenção que mescla abordagens corretivas com estratégias proativas, tais como preventivas e preditivas, formando um sistema híbrido que consiga maximizar a eficiência operacional e minimizar os custos totais associados às falhas [Borlido 2017, Mahale, Kolhar e More 2025].

Outro aspecto relevante é o aumento dos custos indiretos que resultam da aplicação excessiva da manutenção corretiva não planejada. Estes custos estão associados à interrupção do processo produtivo, à necessidade de peças de reposição em caráter emergencial, ao risco de danos secundários aos equipamentos e à elevação dos riscos relacionados à segurança dos trabalhadores [Fitch 1992].

Ainda que a predominância da abordagem corretiva se apresente financeiramente e estrategicamente desfavorável, a sua utilização em situações específicas continuará sendo necessária nas indústrias, visto que nem todas as falhas podem ser previstas ou antecipadas adequadamente. É recomendável uma abordagem equilibrada da manutenção corretiva dentro da estratégia global da gestão de ativos, priorizando seu uso em equipamentos de menor criticidade operacional e cuja falha não implique em impactos relevantes à segurança, ao meio ambiente ou aos custos totais da operação [Moubray 1997, Borlido 2017]. Em contrapartida, para ativos de maior criticidade, a manutenção corretiva deve ser minimizada e substituída progressivamente por abordagens mais modernas e eficientes, proporcionando melhores resultados operacionais e financeiros [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013, Mahale, Kolhar e More 2025].

É importante que as empresas mantenham equipes de manutenção treinadas e prontas para intervenções corretivas, visando minimizar os impactos negativos associados às falhas inevitáveis [Kardec e Nascif 2009].

2.4.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é uma abordagem muito utilizada pelas organizações até hoje, e tem como sua principal característica a realização sistemática e planejada de intervenções mantenedoras nos equipamentos, com o intuito de reduzir ou até mesmo eliminar a probabilidade de ocorrência de falhas inesperadas durante a operação industrial [Xenos 1998, Kardec e Nascif 2009]. Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela execução periódica de ações como lubrificação, ajustes, limpezas, inspeções, substituições programadas de componentes e outros procedimentos técnicos que seguem uma pauta pré-definida, fundamentada em intervalos de tempo ou ciclos de utilização específicos [Slack et al. 2009].

De acordo com [VIANA 2020], o objetivo principal da manutenção preventiva é assegurar que o desempenho e confiabilidade dos equipamentos sejam mantidos dentro dos padrões operacionais desejados, e dessa forma evitar desgastes prematuros e paradas inesperadas, que tendem a gerar custos elevados e perda de produtividade. A utilização dessa estratégia de manutenção contribui de forma significativa para prolongar a vida útil dos ativos e aumentar a segurança operacional.

Borlido 2017 classifica a manutenção preventiva como manutenção planejada dentro da Indústria 4.0, isto é, sujeita a agendamento prévio de intervenções. Dessa forma, sua efetividade depende de um plano de manutenção bem estruturado, baseado em dados confiáveis do histórico de falhas e criticidade dos equipamentos. Por esse motivo, é importante que o planejamento das intervenções seja embasado em dados confiáveis e atualizados, possibilitando ações eficazes na preservação das boas condições do equipamento.

Apesar das várias vantagens como redução da frequência de falhas não planejadas e aumento da disponibilidade operacional, de acordo com [LINO 2019], a manutenção preventiva envolve custos adicionais significativos, pois pode incluir substituições de peças antes do fim de sua vida útil – isto é, se aplicada em excesso, pode gerar intervenções não rentáveis e elevar os custos operacionais. Por esse motivo, é imprescindível que as estratégias preventivas adotadas sejam cuidadosamente definidas e aplicadas somente em situações onde realmente sejam efetivas.

[Kardec e Nascif 2009] enfatizam que a manutenção preventiva deve ser gerida por meio de um sistema estruturado de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). De

forma geral, é importante destacar que o sucesso da manutenção preventiva não se limita somente ao aspecto técnico-operacional, mas exige também uma boa gestão das equipes responsáveis pelas atividades, e isso inclui capacitação técnica adequada, e a incorporação de uma cultura organizacional voltada à antecipação e prevenção de falhas [VIANA 2020].

2.4.3 Manutenção Preditiva

Conforme [Kardec e Nascif 2009, p. 41], a manutenção preditiva “pode ser definida como a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”, e de acordo com [Borlido 2017] tem como objetivo identificar precocemente os sinais de falha, antes mesmo que estas ocorram de fato. É bem consolidado que a utilização dessa técnica dentro das empresas pode trazer uma série de benefícios no que tange ao aumento da vida útil dos ativos, maior disponibilidade operacional, e redução de custos de manutenção, além de maximizar a produtividade industrial, pois minimiza paradas inesperadas nos equipamentos [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013].

Diferentemente da manutenção preventiva tradicional, que se baseia na realização de tarefas de reparo em ciclos ou períodos de operação, a manutenção preditiva está fundamentada na análise da situação atual do equipamento por meio de técnicas de monitoramento e inspeção avançadas, através de inspeções programadas ou medições *online*. Dessa forma, possibilita que intervenções de manutenção ocorram apenas quando realmente forem necessárias, evitando a substituição prematura de componentes que ainda estejam em boas condições operacionais, e com isso traz maior ganho financeiro para as empresas nesse aspecto. [Mahale, Kolhar e More 2025].

Entre as técnicas preditivas mais utilizadas nas indústrias nacionais que adotam esse tipo de manutenção, de acordo com [VIANA 2020], destacam-se a análise de vibrações mecânicas, termografia, ensaio por ultrassom e análise de óleos lubrificantes. A análise de vibração, por exemplo, permite detectar precocemente defeitos como desbalanceamento, desalinhamentos, imperfeições ou danos em rolamentos e engrenagens, e outros, por meio da medição das oscilações das máquinas rotativas [Kardec e Nascif 2009, VIANA 2020]. Já a termografia é empregada para identificar pontos quentes em equipamentos elétricos e

mecânicos, auxiliando na prevenção de falhas relacionadas ao superaquecimento e desgaste anormal [VIANA 2020].

Outro método relevante é a análise de óleos lubrificantes, que consiste na avaliação periódica das condições dos lubrificantes utilizados nas máquinas, buscando identificar a presença de contaminantes, desgaste de componentes internos e degradação química do óleo, fatores que podem indicar falhas iminentes nos equipamentos [Kardec e Nascif 2009]. Quanto aos ensaios por ultrassom, são utilizados na detecção de defeitos ou discontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos. [VIANA 2020].

São várias as vantagens da adoção da manutenção preditiva e bem documentadas na literatura. Em geral, se a técnica for aplicada de forma correta, resulta em redução significativa dos custos operacionais, uma vez que permite intervenções mais pontuais e assertivas, e dessa forma obter estoques de peças sobressalentes mais enxuto e otimizado, e redução de paradas não planejadas [Otani e Machado 2008, Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013]. Somado a tais vantagens, são observadas melhorias expressivas na segurança do trabalho das instalações industriais, pois muitos acidentes e incidentes podem ser evitados com a identificação precoce de falhas potenciais [Moubray 1997]. Conforme recomendado por [Otani e Machado 2008, p. 13], ativos críticos, cuja falha traria grandes problemas de segurança, devem necessariamente ser monitorados por manutenção preditiva.

Apesar das vantagens, também existem desafios para serem superados na implementação da manutenção preditiva. A necessidade de um investimento inicial significativo em instrumentação, software de monitoramento e capacitação técnica das equipes, bem como a dificuldade em criar uma cultura organizacional voltada à análise constante e preventiva dos dados operacionais, pode representar barreiras consideráveis para sua adoção ampla e efetiva [Borlido 2017, VIANA 2020]. Por isso, é fundamental que as empresas que buscam implementar a manutenção preditiva realizem um planejamento bem pensado e estruturado, e não só isso, mas também considerem a integração com outras estratégias, como a manutenção preventiva, a corretiva planejada e a manutenção centrada em confiabilidade (RCM), extraindo o melhor que cada método tem para oferecer, e assim, com um modelo híbrido, alcançar um modelo de manutenção mais eficiente e alinhado às necessidades ope-

racionais específicas de cada planta industrial [Kardec e Nascif 2009, COSTA 2013]. Uma vez que sejam seguidas as orientações de implementação correta, a manutenção preditiva se apresenta totalmente capaz de atender as demandas crescentes por maior confiabilidade, disponibilidade, eficiência e segurança operacional, além da integração estratégica com outras práticas complementares de manutenção [Borlido 2017, VIANA 2020, Mahale, Kolhar e More 2025].

2.4.4 Manutenção Prescritiva

A manutenção prescritiva representa uma evolução natural da manutenção preditiva, sendo viabilizada pelo contexto tecnológico da Indústria 4.0. Enquanto a manutenção preditiva indica o que pode acontecer em determinada situação, prevendo resultados futuros de possíveis falhas, a manutenção prescritiva vai além: ela prescreve formas de combater e prevenir essas falhas, não apenas antecipando eventos prováveis, mas também fornecendo análises hipotéticas de diferentes opções a fim de apresentar cenários que possam mudar o resultado [Machado et al. 2023].

O termo "prescrever", aplicado à manutenção, carrega o mesmo sentido utilizado na medicina: ordenar, estabelecer de modo claro e compreensível um tratamento adequado para determinada condição. Assim, a manutenção prescritiva atua como um "médico dos ativos", prescrevendo formas de combater e prevenir possíveis falhas com base em diagnósticos avançados [Machado et al. 2023].

A implementação da manutenção prescritiva fundamenta-se em pilares tecnológicos interconectados. A fase inicial consiste na sensorização, que se refere ao processo de incorporar sensores específicos nos equipamentos, capazes de detectar e medir grandezas físicas como vibração, temperatura, pressão e umidade em tempo real. Esses sensores servem como "olhos e ouvidos" dos ativos, coletando informações precisas sobre seu estado e desempenho [Machado et al. 2023].

A Internet das Coisas (IoT) é responsável pela interconexão desses sensores à internet e sua comunicação contínua com sistemas de computador, viabilizando a coleta e o compartilhamento de dados em tempo real e tornando possível a monitorização remota. Os dados gerados são processados por meio de técnicas de *Big Data*, que lidam com a interpretação

e extração de *insights* valiosos a partir de conjuntos massivos de dados caracterizados por volume, velocidade e variedade. A infraestrutura de armazenamento em nuvem permite que esses dados sejam consultados e visualizados, oferecendo escalabilidade e flexibilidade sem a necessidade de investimento em *hardware* físico dedicado [Machado et al. 2023].

O diferencial da manutenção prescritiva reside na aplicação de *Machine Learning* e Inteligência Artificial sobre os dados coletados. O aprendizado de máquina permite que sistemas computacionais aprendam e melhorem a partir dos dados históricos, identificando padrões complexos e criando modelos preditivos. A Inteligência Artificial complementa esse processo, desempenhando funções autônomas como detectar, diagnosticar, analisar e solicitar ações de correção, informando a possível causa, quando e onde atuar e como corrigir para a equipe de manutenção [Machado et al. 2023].

Entre as vantagens dessa abordagem, destaca-se a capacidade de modelar múltiplos cenários, proporcionando uma compreensão profunda da economia das ações propostas. A manutenção prescritiva permite simulações de alterações futuras antes de qualquer investimento em despesas de capital, facilitando a tomada de decisões estratégicas. Além disso, essa abordagem se destaca na resolução de problemas complexos, como a identificação de modos de falha múltiplos ou a detecção de deterioração gradual e quase imperceptível dos ativos ao longo do tempo [Machado et al. 2023].

Comparativamente aos demais tipos de manutenção, a manutenção prescritiva apresenta a maior dependência de dados e a menor contribuição humana na tomada de decisão operacional. Enquanto na manutenção corretiva a decisão é fortemente baseada na intervenção humana devido à escassez de dados, e na preditiva a contribuição humana concentra-se na interpretação das informações geradas pelos algoritmos, na manutenção prescritiva os algoritmos não apenas preveem falhas, mas também recomendam ações específicas, cabendo ao profissional a revisão das recomendações e a tomada de decisões estratégicas [Machado et al. 2023].

Entretanto, a implementação da manutenção prescritiva apresenta desafios significativos. Os custos iniciais são elevados, uma vez que envolvem a modernização dos equipamentos com sensores e a implementação dos recursos necessários de inteligência artificial e aprendizado de máquina. Além disso, a eficácia do sistema pode não ser imediata, visto

a necessidade da obtenção de um banco de dados considerável para que a plataforma de aprendizagem automática seja adequadamente treinada. Por se tratar de uma tecnologia emergente, a manutenção prescritiva ainda precisará amadurecer para gerar confiança na gestão não supervisionada de sistemas críticos de segurança [Machado et al. 2023].

A escolha pela implementação da manutenção prescritiva deve considerar diferentes critérios, como a criticidade do ativo para o processo, vida útil, frequência de intervenções, ambiente operacional e orçamento destinado à manutenção. Em uma análise que indique a viabilidade de sua implementação, a manutenção prescritiva emerge como a abordagem mais avançada e proativa, permitindo uma gestão mais eficaz dos ativos e contribuindo para a eficiência operacional em um mercado cada vez mais dinâmico e desafiador [Machado et al. 2023].

2.4.5 Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês *Reliability-Centered Maintenance*) é uma metodologia de gestão desenvolvida para garantir que os ativos físicos continuem a desempenhar as funções para as quais eles existem, sempre consideradas no seu contexto real de operação. Na formulação clássica, o RCM é “um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer ativo físico em seu contexto operacional” [Moubray 1997, p. 7]. Em termos práticos, trata-se de uma filosofia orientada à confiabilidade: para cada sistema ou equipamento, identifica-se quais as ações mais indicadas para a preservação das funções nele existentes, evitando generalizações que tratem ativos diferentes como se fossem iguais [Moubray 1997].

O método avança por etapas: primeiro descrevem-se as funções e padrões de desempenho, levantam-se as falhas funcionais e os modos que as provocam, analisam-se seus efeitos e, a partir daí, selecionam-se políticas de manutenção capazes de prevenir a ocorrência de falha ou mitigar as consequências. Essa seleção costuma apoiar-se em técnicas consolidadas — como a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA, do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*) — e considera explicitamente critérios de segurança, meio ambiente, operação e custos em cada decisão [Fogliatto e Ribeiro 2009]. O FMEA, em sua essência, é um método formal de confiabilidade voltado para reconhecer e avaliar

falhas potenciais em um produto, processo ou sistema, identificar ações que eliminem ou reduzam a probabilidade de essas falhas ocorrerem e documentar todo o estudo para referência futura. É um processo lógico e sistemático que hierarquiza as falhas conforme seu risco e recomenda medidas preventivas para cada uma. Utilizando essa abordagem, a equipe consegue antecipar efeitos indesejados e priorizar intervenções mais eficientes, evitando que falhas relevantes cheguem a se manifestar. Além disso, a análise “da causa para o efeito” aliada ao registro detalhado de cada etapa tornam a FMEA especialmente adequada ao RCM, pois fornecem a base técnica e a rastreabilidade que o processo exige. O objetivo é direto e econômico: maximizar confiabilidade e disponibilidade, de forma a evitar intervenções desnecessárias e concentrar esforço onde o risco é maior. Para quantificar esse risco e orientar a priorização das intervenções, a FMEA recorre ao Número de Prioridade de Risco (RPN, do inglês *Risk Priority Number*), calculado pelo produto de três índices avaliados em escala de 1 a 10: a Severidade (S), que expressa a gravidade do efeito da falha caso ela se manifeste; a Ocorrência (O), que representa a probabilidade ou frequência com que a falha pode acontecer; e a Detecção (D), que indica a dificuldade de identificá-la antes que seus efeitos se concretizem — quanto mais difícil a detecção, maior o valor atribuído. O produto desses três índices resulta em um valor entre 1 e 1.000: modos de falha com RPN mais elevado concentram as ações prioritárias de manutenção, enquanto aqueles com valores menores podem ser tratados de forma reativa ou apenas monitorados. Contudo, o RPN não deve ser interpretado de forma isolada; um modo de falha com Severidade máxima exige atenção criteriosa mesmo que o produto final seja numericamente baixo, razão pela qual boas práticas recomendam analisar os três índices individualmente além do valor combinado. Nesse sentido, o RPN cumpre um papel essencial dentro da lógica do RCM: transforma julgamentos técnicos em dados estruturados e comparáveis, permitindo que a equipe multidisciplinar concentre esforço e recursos exatamente onde o risco operacional é mais significativo.

Para organizar a análise, o RCM trabalha com sete perguntas de referência [Moubray 1997]: quais funções e padrões de desempenho são requeridos? De que forma o item pode deixar de cumpri-los? O que causa cada falha? O que acontece quando a falha ocorre? E o que pode ser feito para preveni-la ou atenuar suas consequências? O que

deve ser feito se não for encontrada nenhuma tarefa proativa adequada? Respondidas de modo sistemático, essas questões fornecem um alicerce técnico para decidir o “o quê”, “quando” e “por quê” da manutenção. Diferentemente de rotinas preventivas definidas apenas por intervalo de tempo ou recomendações genéricas de fabricante, o RCM prioriza ações realmente eficazes para cada modo de falha: pode recomendar manutenção por condição (preditiva), preventiva por tempo, inspeções detectivas ou mesmo alterações de projeto, se se mostrarem a alternativa mais segura e econômica. Importa frisar que o RCM não descarta estratégias clássicas; ao contrário, “através de sua metodologia fornece a possibilidade da aplicação mais adequada de cada tipo”, permitindo selecionar o melhor arranjo de ações para cada máquina e situação [Kardec e Nascif 2009, p. 138]. O resultado de um estudo RCM é um plano de manutenção que combina diferentes tipos de ações (preventivas sistemáticas, preditivas, detectivas, corretivas planejadas etc.) de acordo com a criticidade e o comportamento de falha do equipamento em questão.

A aplicação do RCM é por natureza, multidisciplinar. Costuma envolver uma equipe com engenheiros de manutenção, técnicos experientes e operadores, haja vista que quem convive diariamente com o equipamento, conhece na prática, seus sinais, modos de falha e efeitos [Fogliatto e Ribeiro 2009]. Outra característica é o foco nas consequências: as falhas são classificadas quanto à evidência (evidentes ou ocultas) e priorizadas de acordo com impacto em segurança, meio ambiente e operação, de modo que os recursos sejam aplicados primeiro ao que pode causar dano grave ou interrupção relevante [Moubray 1997, Kardec e Nascif 2009]. O processo deixa ainda um registro documental valioso, como funções, modos de falha, causas, ações e suas justificativas compõem uma memória técnica que facilita revisões e atualizações futuras [Kardec e Nascif 2009].

Os efeitos práticos do RCM tendem a ser expressivos quando a metodologia é seguida com rigor. Do ponto de vista operacional, programas bem-sucedidos relatam cortes de aproximadamente 40% a 70% nas tarefas rotineiras de manutenção preventiva, sem perda de confiabilidade, pois eliminam atividades redundantes ou de baixo valor [Moubray 1997, Kardec e Nascif 2009]. Em paralelo, a ênfase na prevenção das falhas relevantes reduz paradas inesperadas e chamadas de emergência; a literatura aponta reduções na ordem de 10% a 30% nesses trabalhos emergenciais [Kardec e Nascif 2009]. Segundo [Fogliatto

e Ribeiro 2009] programas de RCM promovem melhorias na disponibilidade e segurança dos equipamentos, que são fundamentais em todos os setores, mas em especial aqueles com alta exigência de confiabilidade — como o aeronáutico, nuclear, petroquímico e automotivo, além de que estudos de custos mostram também a redução significativa de gastos associados a reparos e à indisponibilidade das máquinas [Marcorin e Lima 2003]. Em síntese, o RCM desloca a manutenção para um patamar técnico-estratégico: ao alinhar decisões com funções, riscos e consequências, permite maximizar confiabilidade e minimizar o custo total do ciclo de vida, traduzindo-se em processos mais contínuos e seguros e em melhor retorno para a organização [Marcorin e Lima 2003].

2.5 Indicadores de Desempenho da Manutenção

2.5.1 Indicadores Clássicos de Desempenho da Manutenção

A gestão eficaz da manutenção requer métricas claras para acompanhar falhas, reparos e disponibilidade dos ativos. [Kardec e Nascif 2009, p. 153] enfatizam que “quem não mede não gerencia”, ressaltando a necessidade de indicadores como disponibilidade, confiabilidade, qualidade, custo e outros aspectos da manutenção, e que estes são fundamentais para avaliar o desempenho dos ativos e traçar metas [França 2017]. Seguindo o modelo de [Peres e Lima 2008], MTBF (*Mean Time Between Failures*, ou Tempo Médio Entre Falhas – TMEF), MTTR (*Mean Time To Repair*, ou Tempo Médio para Reparo – TMPR), disponibilidade e *Backlog* são destacados como indicadores clássicos. Esses indicadores possuem definições formais, fórmulas reconhecidas e aplicações práticas consolidadas na indústria, servindo de base para avaliar o desempenho da manutenção ao longo do tempo.

MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) é uma medida de confiabilidade que representa o tempo médio de bom funcionamento de um equipamento entre duas falhas consecutivas. Em termos práticos, o MTBF é calculado somando-se os intervalos de operação (tempo em que o equipamento funcionou corretamente) e dividindo pelo número de falhas ocorridas no período analisado. Por exemplo, se uma máquina opera por períodos T_1, T_2, \dots, T_N entre cada falha e N é a quantidade de falhas dentro do período total, segundo [Kardec e Nascif 2009] o MTBF é dado por

$$MTBF = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N}{N}, \quad (2.1)$$

Um MTBF elevado indica que o equipamento tem longos intervalos de funcionamento sem falhas, ou seja, possui alta disponibilidade [Magalhães, Silveira e Gomes 2021]. [Kardec e Nascif 2009] afirmam que aumentar o MTBF – por meio de melhorias de projeto, manutenção preventiva adequada e capacitação técnica – é uma das formas mais eficazes de melhorar a disponibilidade do ativo. Em suma, o MTBF fornece subsídios para entender a frequência de falhas: quanto maior o MTBF, menor a taxa de falhas no equipamento, contribuindo para operações mais contínuas e produtivas.

MTTR (Tempo Médio para Reparo), por sua vez, é um indicador que nos aponta a medida do intervalo de tempo médio para trazer o sistema ou item para a condição de operação após a ocorrência da falha [Raposo 2004]. Seu cálculo envolve somar todos os tempos de reparo (incluindo desde a parada do equipamento até o retorno à operação, englobando diagnóstico, espera por peças e efetiva correção) e dividir pelo número de falhas atendidas [Ribeiro et al. 2019]. Matematicamente, se t_1, t_2, \dots, t_N são os tempos de reparo de cada falha, e N é a quantidade de falhas dentro do período, então para [Kardec e Nascif 2009] o MTTR é dado pela seguinte expressão

$$MTTR = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_N}{N}, \quad (2.2)$$

Um MTTR reduzido significa que há uma maior probabilidade da equipe de manutenção conseguir restaurar o funcionamento rapidamente, minimizando a indisponibilidade. [Kardec e Nascif 2009] destacam que, excluindo o tempo administrativo, o MTTR inclui todo o tempo gasto no reparo e atrasos associados, refletindo não apenas a eficiência técnica da equipe, mas também fatores como disponibilidade de peças sobressalentes e logística interna. Fatores como facilidade de manutenção do projeto, treinamento da equipe e boa organização do planejamento influenciam diretamente a redução do MTTR. Na prática, monitorar o MTTR ajuda a identificar gargalos no processo de manutenção (por exemplo, demora na obtenção de peças ou falhas de procedimento) e orientar ações para melhorar a manutenibilidade dos ativos.

A disponibilidade do equipamento é, classicamente, o resultado combinado da confiabilidade (MTBF) e da manutenibilidade (MTTR). Trata-se da probabilidade de o ativo estar disponível para uso em um dado instante, ou a fração do tempo total em que ele permanece apto a operar. Existe mais de um tipo de disponibilidade, porém se restringido ao conceito apresentado por [Raposo 2004, Kardec e Nascif 2009], disponibilidade (D) é a razão entre o tempo em que o equipamento ficou disponível para produção e o tempo total do período analisado. Supondo que o equipamento tenha um MTBF e um MTTR constantes, de acordo com [Kardec e Nascif 2009, Fogliatto e Ribeiro 2009] essa relação pode ser expressa por

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (2.3)$$

Assim, quanto maior o MTBF e menor o MTTR, maior será a disponibilidade. Esse indicador é considerado o principal objetivo da manutenção: maximizar o tempo produtivo dos equipamentos. Kardec e Nascif (2009, p. 103) reforçam que “a disponibilidade é função da confiabilidade e da manutenibilidade”, de modo que aumentar o MTBF (confiabilidade) e reduzir o MTTR (rapidez de reparo) são estratégias complementares para elevar a disponibilidade global da planta. Xenos (1998) propõe um método padronizado para cálculo da disponibilidade e taxa de falhas, salientando que esses indicadores medem exclusivamente o desempenho da manutenção, isolando-se interferências operacionais. Uma alta disponibilidade (próxima de 100%) indica que o equipamento raramente está indisponível por falhas ou manutenções, o que é essencial em ambientes industriais competitivos.

Outro indicador clássico relevante é o *Backlog* de manutenção, também chamado de carteira de serviços pendentes. O *Backlog* representa o acúmulo de trabalho de manutenção por realizar, englobando ordens de serviço abertas, atividades programadas não executadas e demandas em espera. Em termos práticos, pode ser mensurado em homem-horas de trabalho pendente ou em número de ordens atrasadas, frequentemente segmentado por especialidade (mecânica, elétrica etc.) ou criticidade. Um *Backlog* alto indica que a capacidade da manutenção está aquém da demanda, podendo levar a atrasos e aumento

de riscos de falha. [COSTA 2013] define *Backlog* como a carteira de serviços que “contempla a carga de serviços global e por especialidade, permitindo melhor dimensionamento das equipes de manutenção”. Quanto mais tempo se gasta com reparos, menos tempo sobrar para atividades de prevenção, desta forma o *Backlog* aumenta, elevando assim os gastos com serviços. Além disso, [Peres e Lima 2008] apontam que atrasos nos reparos (MTTR elevado) e elevado número de falhas, podem inflar o *Backlog* e, conseqüentemente, aumentar os custos de manutenção. Dessa forma, acompanhar o *Backlog* permite aos gestores ajustar recursos (mão de obra, terceiros, materiais) para equilibrar o volume de tarefas pendentes com a capacidade disponível. Manter o *Backlog* sob controle é vital para evitar acumulação de atividades que acabem postergando manutenções preventivas e inspeções – uma situação que, a longo prazo, pode elevar o número de falhas corretivas não planejadas. Por isso, muitas empresas utilizam o *Backlog* como indicador de eficiência do planejamento e execução da manutenção: uma redução contínua do *Backlog* sugere melhorias no planejamento (mais tarefas sendo concluídas dentro do prazo) e aumento da produtividade da equipe de manutenção, enquanto um *Backlog* crescente acende um alerta sobre possíveis gargalos ou subdimensionamento da função manutenção.

Complementar ao *Backlog*, tem-se a taxa de retrabalho, que revela uma dimensão distinta, porém igualmente crítica, da eficiência da manutenção: não o volume de serviços pendentes, mas a qualidade dos serviços já executados. Esse indicador mede a proporção de ordens de serviço que precisaram ser reabertas ou reexecutadas dentro de um período de referência — geralmente entre 24 horas e 30 dias após o encerramento — porque a intervenção anterior não solucionou definitivamente o problema. Taxas elevadas de retrabalho apontam para causas sistêmicas como diagnóstico incorreto na origem, uso de peças inadequadas, procedimentos mal definidos ou ausência de verificação funcional ao término do serviço. O impacto sobre o *Backlog* é direto e cumulativo: cada serviço refeito consome horas-homem que deveriam estar alocadas em atividades planejadas, realimentando o acúmulo de pendências e comprometendo o equilíbrio entre demanda e capacidade que o planejamento busca sustentar.

Cabe ressaltar que esses indicadores clássicos não devem ser analisados isoladamente, mas sim em conjunto, fornecendo uma visão abrangente do desempenho da manuten-

ção [Kardec e Nascif 2009]. Por exemplo, ainda para [Kardec e Nascif 2009] a gestão deve ser baseada em indicadores de desempenho – disponibilidade, confiabilidade, qualidade, custos, etc. – avaliados de forma conjunta e crítica, por meio de análise periódica de resultados. [WYREBSK 1997], em um estudo de implantação de TPM (*Total Productive Maintenance*, ou Manutenção Produtiva Total), mostrou a importância de selecionar um conjunto enxuto de métricas para avaliar antes e depois a *performance* de um equipamento piloto, incluindo quantidade de intervenções corretivas por mês, tempo de máquina parada por falha, tempo de manutenção (homem-horas) e velocidade de atendimento às paradas. Esses exemplos ilustram que MTBF, MTTR, disponibilidade e *Backlog* compõem uma base quantitativa sólida para a gestão diária da manutenção industrial, permitindo identificar tendências (melhorias ou deteriorações) e apoiar decisões como necessidade de treinamento, investimentos em peças sobressalentes ou revisões de planos de manutenção.

2.5.2 Indicadores Estratégicos e Modernos de Desempenho da Manutenção

Além dos indicadores clássicos, hoje utilizam-se métricas mais amplas, que englobam custos, planejamento versus execução e efetividade global dos equipamentos, bem como indicadores orientados à confiabilidade e manutenção preditiva. [Kardec e Nascif 2009] já apontavam a necessidade de medir não só disponibilidade e confiabilidade, mas também custo e qualidade dentro de uma visão sistêmica da manutenção. Da mesma forma, indicadores modernos procuram conectar a *performance* da manutenção com a eficiência financeira e produtiva da empresa, evidenciando o valor agregado pelas boas práticas de manutenção.

Um indicador estratégico fundamental é o custo de manutenção por ativo. Esse indicador relaciona o investimento em manutenção com os ativos mantidos, podendo ser expresso de diversas formas: custo total de manutenção por máquina ou linha de produção, percentual do custo de manutenção em relação ao valor de reposição do ativo (conhecido como CPMV – Custo de Manutenção sobre o Valor de Reposição, ou em inglês *Maintenance Cost as % of Replacement Asset Value*), ou ainda custo de manutenção como percentual do faturamento. O objetivo é avaliar se os gastos de manutenção estão

sendo administrados de forma eficiente e sustentável. [ZEN 2008] descreve o custo de manutenção como a somatória de todas as parcelas de custo envolvidas, incluindo materiais, sobressalentes, mão de obra, custos administrativos da equipe de manutenção, treinamentos, além dos custos das perdas de produção durante paradas e do custo de oportunidade pela falta do produto no mercado. Muitas empresas tradicionalmente monitoram apenas os custos diretos de intervenção (peças e mão de obra), mas é recomendado acompanhar também os custos indiretos e perdas produtivas para ter visão real do impacto financeiro da manutenção. Um indicador derivado é o CPMV (%), calculado como $(\text{Custo total anual de manutenção} / \text{Valor de reposição do ativo}) \times 100\%$, que permite comparar a criticidade de gastos entre diferentes equipamentos ou plantas. Valores acima de certos *Benchmarks* (por exemplo, $>5\%$ a 10% do valor do ativo por ano, dependendo do setor) podem indicar ativos com alta criticidade ou ineficiências na manutenção. A análise do custo por ativo subsidia decisões estratégicas, como *retrofit* de máquinas obsoletas (se o custo de mantê-las for muito alto) ou investimento em programas de manutenção preditiva para reduzir falhas caras. Em suma, este indicador traduz o desempenho da manutenção em termos monetários, falando a língua da diretoria e permitindo demonstrar o retorno sobre o investimento em manutenção.

Outro conjunto de indicadores modernos refere-se ao equilíbrio entre manutenção planejada e não planejada. O percentual de manutenção planejada vs. não planejada (preventiva vs corretiva) é uma métrica de maturidade na gestão da manutenção: indica quanta da atividade de manutenção é realizada de forma programada (preventiva ou corretiva planejada) em comparação à manutenção reativa de emergência. Organizações de classe mundial buscam maximizar a parcela de manutenção planejada, pois intervenções planejadas minimizam impactos na produção e custos, enquanto falhas não planejadas geram perdas e gastos elevados. [Kardec e Nascif 2009, p. 26] destacam que, na manutenção planejada, “a perda de produção é reduzida ou mesmo eliminada, além de que o tempo de reparo e custo são minimizados; na manutenção não planejada ocorre justamente o oposto”. Além disso, [Otani e Machado 2008] demonstram que muitas empresas brasileiras ainda possuem elevados níveis de corretiva não planejada e defendem aumentar a participação da manutenção preditiva, reduzindo drasticamente a manutenção preventiva

excessiva, de modo a aproximar-se da excelência em manutenção. Os autores enfatizam diminuir ao máximo as manutenções não-planejadas, elevando a parcela preditiva como forma de obter melhores resultados e atingir a excelência. Assim, o índice de manutenção planejada (ou inversamente, a taxa de emergências) é um indicador estratégico: porcentagens altas de planejado refletem uma manutenção proativa, com domínio sobre o parque fabril, enquanto porcentagens altas de não-planejado sinalizam necessidade de aprimorar planos preventivos, treinamentos ou atualização de equipamentos. Nesse sentido, [Fitch 1992] argumenta que o usuário está em situação muito melhor ao ser proativo, influenciando o curso das falhas, do que permanecendo apenas reativo – ou seja, ao aumentar a proporção de manutenção planejada, exerce-se maior controle sobre os eventos de falha em vez de apenas responder a eles. Empresas frequentemente acompanham mensalmente o percentual de ordens planejadas executadas versus total de ordens; metas típicas em ambientes industriais avançados giram em torno de 85-90% de manutenção planejada (incluindo preventivas, preditivas e corretivas agendadas). Atingir esse patamar requer disciplina de planejamento e confiabilidade dos ativos – um desafio que, quando superado, traz maior estabilidade operacional e redução de custos de manutenção de emergência.

Diretamente relacionado a isso está o índice de conformidade do plano de manutenção, ou cumprimento da programação de manutenção. Esse indicador mede o quanto das atividades planejadas foram de fato executadas no período previsto, evidenciando a aderência ao planejamento. [Xenos 1998, p. 179] enfatiza que para a manutenção obter resultados, “um plano de manutenção precisa ser rigorosamente cumprido”, sendo inaceitável não executá-lo. O não cumprimento do plano preventivo significa deixar de realizar inspeções, lubrificações ou substituições programadas, abrindo espaço para falhas ocorram e causem prejuízos. Portanto, o desvio do plano (atividades não executadas conforme programado) deve ser minimizado. Quando falhas emergenciais consomem tanto tempo que, como mencionado por [Xenos 1998, p. 179] “impedem que o plano de manutenção seja totalmente cumprido”, torna-se necessário tratar essas falhas de forma prioritária (por meio de análise de causa raiz e ações corretivas) para gradualmente recuperar a confiabilidade e liberar tempo para a manutenção planejada. Em resumo, plano de manutenção e tratamento de falhas interagem e se complementam: conforme as falhas vão diminuindo, sobra mais

tempo para cumprir o plano; e cumprir o plano, por sua vez, previne novas falhas. Empresas monitoram mensalmente o índice de cumprimento do plano (%), calculado como (número de ordens preventivas executadas / número de ordens preventivas programadas no período) x 100. Índices próximos a 100% são o ideal, enquanto valores baixos indicam necessidade de ajustes – seja de sobrecarga de programação (planejar menos atividades do que a capacidade real permite) ou de aumento de recursos. Ferramentas de PCM frequentemente incluem relatórios de *Backlog* e cumprimento de programação, permitindo analisar onde ocorreram desvios (por exemplo, área X cumpriu apenas 70% das atividades devido a falta de mão de obra ou atrasos de peças). Conseguir alta conformidade ao plano é sinal de uma manutenção organizada e resiliente, capaz de evitar que imprevistos comprometam as rotinas preventivas.

No âmbito de eficiência operacional dos equipamentos, o indicador-chave OEE (do inglês: *Overall Equipment Effectiveness*). Segundo [Slack et al. 2009] o OEE é um índice originado do TPM (*Total Productive Maintenance*) que combina três fatores – Fator grau de utilização, *performance* (desempenho) e qualidade – para expressar, em percentual, quão efetivamente um equipamento é utilizado durante o tempo disponível. Em português também é chamado de Eficácia Global dos Equipamentos ou Índice de eficiência global. Para [Slack et al. 2009] OEE é definido da seguinte forma

$$OEE = Disponibilidade \times Performance \times Qualidade, \quad (2.4)$$

Onde:

- Disponibilidade é a medida da proporção de tempo em que o equipamento realmente produz, em relação ao tempo total programado para produção. Subtrai paradas planejadas (*setup*, manutenção) e não planejadas (quebras, falta de material), resultando no tempo de funcionamento efetivo;
- *performance* é a relação da produção real do sistema, com aquilo que o mesmo seria capaz de produzir, em condições consideradas ideais, em um mesmo intervalo de tempo;
- Qualidade é uma comparação entre o número ou quantidade de produtos fabricados,

com o número ou quantidade de produtos fabricados dentro das especificações;

Ainda de acordo com [Slack et al. 2009], o OEE é um indicador poderoso no gerenciamento de sistemas produtivos, pois permite identificar as maiores oportunidades de melhorias através da quantificação das perdas. [WYREBSK 1997, p. 27] observa que o TPM busca “atingir a máxima eficiência do sistema de produção (eficiência global)”, eliminando perdas que reduzam essa eficiência. Ou seja, $OEE = 100\%$ significa produção sem nenhuma perda: a máquina sempre disponível, operando na máxima velocidade e produzindo 100% de itens perfeitos – uma situação ideal raramente atingida, mas que serve de norte. Segundo [NAKAJIMA 1989], um valor ideal de OEE deve girar em torno de 85%. A utilidade do OEE está em quantificar o impacto da manutenção junto com produção e qualidade: por exemplo, uma baixa disponibilidade (por muitas quebras) ou muitas paradas breves (*setups*, pequenos ajustes) reduzirão o OEE. Se o índice de qualidade é baixo (sucatas/retrabalhos), isso também indica problemas possivelmente relacionados à manutenção (ajustes imprecisos, calibração, etc.). Assim, o OEE é multidisciplinar; porém, do ponto de vista da manutenção, e para [Netto e Abrahão 2008] focar na melhoria do componente de disponibilidade – via aumento de MTBF e redução de MTTR – é uma contribuição direta para elevar o OEE. Muitas empresas estabelecem OEE mínimo para equipamentos críticos e rastreiam as perdas segundo as seis grandes perdas do TPM (falhas, ajustes, paradas breves, velocidade reduzida, defeitos e *ramp-up*), o que está alinhado aos propósitos da TPM, pois de acordo com [Netto e Abrahão 2008] o objetivo principal da TPM é eliminação contínua de perdas. Em um trabalho aplicado, Wyrebsk (1997) agrupou indicadores “corporativos”, estabelecidos a partir das políticas de qualidade da empresa, incluindo a quantidade de acidentes de trabalho (acidentes/mês), o afastamento por acidente de trabalho (horas/mês) e o treinamento de pessoal (horas de treinamento por homem/ano), todos visando, em última análise, apoiar o aumento da eficiência global dos equipamentos após a implementação do TPM. Em suma, o OEE se consolidou como um indicador estratégico de produção e manutenção, guiando esforços de melhoria contínua para reduzir desperdícios e aumentar a produtividade dos ativos.

Por fim, ganham destaque os indicadores voltados à manutenção preditiva e à confiabilidade. Conforme a manutenção evolui para práticas preditivas e proativas, mede-se não

apenas o que já ocorreu (falhas passadas), mas também a capacidade de prever e evitar falhas futuras. Um indicador de confiabilidade simples já citado é o MTBF, mas há outros enfoques. Pode-se acompanhar, por exemplo, o número de falhas previstas (detectadas via monitoração) vs. falhas ocorridas – esperando aumentar a detecção precoce. Também é relevante o percentual de ativos cobertos por manutenção preditiva (por exemplo, percentual de máquinas monitoradas por análise de vibração, termografia, ultrassom, etc.). Esse índice reflete o grau de adoção de técnicas modernas de monitoração contínua ou periódica. [Otani e Machado 2008, p. 7] apontam que a manutenção preditiva (manutenção baseada em condição) privilegia a disponibilidade, pois busca intervir apenas quando necessário, ou seja, “predizer (prever) as falhas nos equipamentos através do acompanhamento de parâmetros, permitindo a operação contínua pelo maior tempo possível”. A confiabilidade em si pode ser tratada como indicador: é definida como “a probabilidade de um item operar corretamente nas condições esperadas por um determinado período de tempo”. Na prática, muitas vezes expressa-se a confiabilidade de um equipamento através da curva da banheira ou pela probabilidade de sobrevivência em análises de Weibull; contudo, para gestão diária, métricas como índice de confiabilidade (percentual de ativos que não falharam no período, por exemplo) ou taxa de falhas (falhas por mês ou por 1000 horas de operação) são utilizadas. Outro indicador relacionado é a manutenibilidade (manutenibilidade), definida como “Manutenibilidade é a probabilidade de um item ou sistema em falha ser restaurado para o seu estado operacional satisfatório em um certo intervalo de tempo.” [Raposo 2004, p. 11]. Essa definição probabilística complementa a confiabilidade: enquanto a confiabilidade cuida de evitar falhas, a manutenibilidade cuida de restaurar rapidamente caso a falha ocorra. Em manutenção preditiva, costuma-se também medir o tempo médio para detecção de uma condição degradante e o tempo de reação preditiva (entre identificar um indício de falha e programar a intervenção antes da pane). Tais métricas avaliam a eficácia dos sistemas de monitoramento e diagnóstico.

Em síntese, os indicadores estratégicos modernos ampliam a visão do gestor de manutenção. [ZEN 2008] cita indicadores como: hora parada (hora indisponível) – que está ligada à disponibilidade do equipamento; hora de espera – medindo o tempo desde a comunicação da falha até início do reparo (indicador de capacidade de reação da equipe); hora

de impedimento – tempo perdido devido a bloqueios externos à manutenção (aguardo de peças, autorização, etc., refletindo comprometimento de equipes de suporte); além de disponibilidade e custo de manutenção já discutidos. Esses indicadores, alinhados com os objetivos empresariais, permitem uma visão balanceada: técnica (confiabilidade, disponibilidade), operacional (tempo de resposta, cumprimento de plano) e econômica (custos). O desafio para implementações industriais é escolher um conjunto equilibrado de indicadores, evitando tanto a miopia (usar um único indicador, que pode levar a decisões subótimas) quanto o excesso de métricas (que dilui foco e gera confusão). [ZEN 2008] sugere que os indicadores de manutenção devem derivar dos objetivos empresariais e focar no que traz maior retorno, mantendo a simplicidade e descartando o desnecessário. Portanto, indicadores clássicos como MTBF, MTTR, disponibilidade e *Backlog* continuam essenciais pelo rigor conceitual que fornecem, enquanto indicadores estratégicos como custo por ativo, percentual de manutenções planejadas, conformidade do plano, OEE e métricas de preditiva/confiabilidade conferem profundidade estratégica, conectando a manutenção à produtividade e competitividade da organização. Juntos, esses indicadores embasam um sistema de gestão da manutenção completo, orientando tanto melhorias de curto prazo no chão de fábrica quanto decisões de longo prazo em nível gerencial, sempre com embasamento documental e mensurável, conforme recomendado pela literatura técnica.

Capítulo 3

Estudo de Caso: Empresa

Mineradora no Estado do Pará

3.1 Caracterização da Empresa

A empresa em questão é uma das principais mineradoras de caulim em operação no Brasil, com unidades de lavra e beneficiamento localizadas no estado do Pará. É referência mundial em soluções minerais, e possui relevante participação no setor mineral brasileiro. Sua estrutura contempla um porto e uma planta de beneficiamento final em Barcarena – PA, além de duas minas na região de Ipixuna do Pará – PA: a Mina PPSA, atualmente em estado de hibernação, e a Mina RCC, onde foi desenvolvido o presente estudo, distante cerca de 127 km em linha reta de Belém, capital do Estado do Pará.

Na Mina RCC, o caulim é extraído das lavras (figura 3.1) e passa por um processo inicial de pré-beneficiamento realizado em uma planta simplificada (figuras 3.2 e 3.3) instalada dentro da própria unidade. Nessa etapa, o minério é diluído em água em equipamentos denominados *Blungers* — tanques de aço dotados de rotores dentados que transformam o minério sólido em polpa. A seguir, a polpa é conduzida para classificadores espirais e centrífugas de grande porte, que realizam a separação do caulim em relação à areia e demais contaminantes. Há também a adição de reagentes para melhorar a eficiência da separação e a qualidade final do produto. Após essa etapa, a polpa resultante é armazenada em tanques até ser enviada para a planta principal de Barcarena.

O transporte é feito por meio de bombas de pistão de grande porte, que impulsionam a polpa ao longo de dutos interligando a mina à planta industrial. É nesse local que ocorre o beneficiamento final, garantindo ao produto as propriedades físicas e químicas exigidas pelo mercado internacional, uma vez que o caulim é uma matéria-prima essencial para indústrias como a de papel, cerâmica, tintas e plásticos.

Um aspecto relevante do contexto da Mina RCC é sua localização remota (figura 3.4). A cidade mais próxima, Tomé-Açú – PA, fica a dezenas de quilômetros de distância, o que faz com que grande parte dos trabalhadores resida em alojamentos internos à mina (figura 3.5). Essa característica cria a necessidade de uma ampla infraestrutura de apoio, destacando-se o grande número de equipamentos de refrigeração instalados em dormitórios e áreas comuns. Tais equipamentos são considerados de alta prioridade, pois falhas nos mesmos podem comprometer o descanso adequado dos trabalhadores — em especial aqueles que atuam em turnos noturnos. A falta de repouso impacta diretamente a segurança operacional, já que parte dos colaboradores conduz máquinas pesadas e opera equipamentos críticos para a continuidade do processo produtivo, elevando o risco de acidentes em caso de fadiga.

Além de sua relevância operacional, a RCC desempenha papel importante no desenvolvimento socioeconômico da região, gerando empregos diretos e indiretos, movimentando a economia local e contribuindo com tributos que fortalecem os municípios em seu entorno. A presença da mineradora impulsiona também serviços de apoio e infraestrutura, e se destaca como um dos principais agentes de dinamização econômica na área de influência da mina.



Figura 3.1: Mina de extração do Caulim.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).



Figura 3.2: Setor de centrifugação da mina.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).



Figura 3.3: Setor de bombeamento da polpa tratada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).



Figura 3.4: Mapa de localização da mina RCC e outros projetos da empresa.

Fonte: Adaptado pelo autor (2026).



Figura 3.5: Alojamento da mina RCC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 Situação Prévia da Manutenção

Na planta estudada, observou-se que a manutenção dos ativos de refrigeração era predominantemente corretiva, realizada principalmente quando ocorria a falha de um equipamento. A equipe de Planejamento e Controle da Manutenção, composta por apenas três profissionais, era responsável por acompanhar ativos diversos, como bombas, centrífugas, *Blungers* e geradores. Essa limitação estrutural, somada a fatores gerenciais, resultava em sobrecarga da equipe, aumento nos custos e redução da confiabilidade dos ativos.

O modelo reativo apresentava impactos diretos e significativos, não somente ao setor de refrigeração, mas por vezes, em outros setores de manutenção também. Os custos mensais de manutenção, ocasionalmente ultrapassavam o valor planejado, principalmente em decorrência de alto consumo de peças e insumos para reparos emergenciais. Além disso, ocorrências de indisponibilidade de ativos críticos de forma prolongada, prejudicava a estabilidade das operações, como exemplo está o gráfico de disponibilidade física do principal gerador da mina na figura 3.6, retirado do relatório elaborado pela equipe de PCM, onde é ilustrado a indisponibilidade total do ativo durante 7 meses no ano de 2024, gerando custos adicionais não somente de manutenção, mas também com locação de ativos, a preços elevados, para suprir a falta do equipamento. Em parte, esses efeitos eram atenuados pela existência de equipamentos sobressalentes, que garantia a continuidade da produção. No entanto, essa prática representava altos custos adicionais, gerava ociosidade de máquinas que poderiam estar produzindo e criava uma falsa sensação de segurança, dificultando a adoção de estratégias mais estruturadas, como a preventiva ou a preditiva, em larga escala.

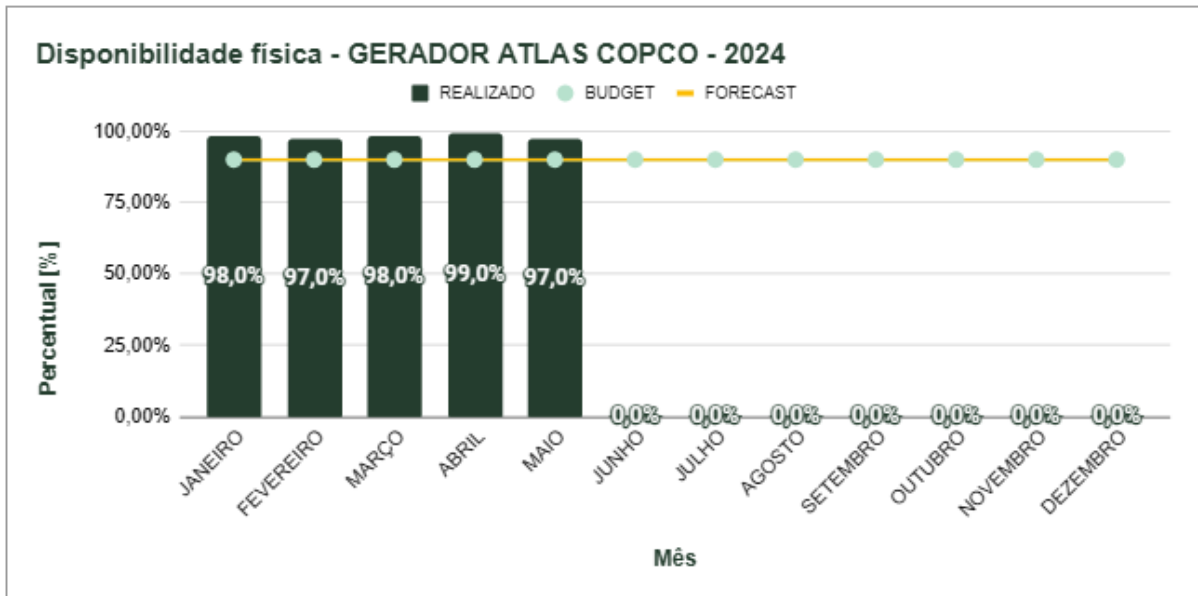


Figura 3.6: Gráfico de disponibilidade física do gerador principal da mina.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No caso dos equipamentos de refrigeração, a situação era delicada. Por serem instalados em alojamentos e áreas administrativas, a presença de unidades reservas em número suficiente era inviável. Grande parte desses aparelhos precisava operar simultaneamente, e qualquer falha comprometia diretamente o conforto e o descanso dos colaboradores. Esse aspecto era especialmente crítico para trabalhadores em turnos noturnos, cujo repouso adequado está diretamente ligado à segurança. A ausência de planejamento adequado e a dificuldade de reposição imediata justificaram a necessidade de rever a forma como a manutenção vinha sendo conduzida nesse setor.

O fluxo de solicitações de manutenção era gerido por um banco de dados desenvolvido no Google Planilhas e ilustrado na figura 3.7, exclusivo para controle pela equipe de refrigeração e PCM. Esse sistema era alimentado por um formulário *online* desenvolvido no Google formulários, ao qual todos os colaboradores tinham acesso, permitindo registrar chamados sempre que identificavam falhas. Apesar de útil para centralizar informações, o método gerava uma quantidade de solicitações que crescia mais rápido do que a capacidade de atendimento da equipe. Embora houvesse priorização dos chamados com base no impacto ou na urgência, a equipe de apenas um técnico de refrigeração e dois auxiliares não conseguia atender à demanda em tempo hábil, resultando em períodos de indisponi-

bilidade prolongada de alguns equipamentos. Na figura 3.8 é apresentado um gráfico com a quantidade de chamados (ocorrências de falhas) registrados durante o ano de 2024, que apresentou valores na faixa de 40 a 60 mensalmente, além de evidenciar uma tendência de aumento, dada a incapacidade de atendimento ao total das demandas. Nesse cenário era observado disponibilidade diária média de 80%, e mais de 25 máquinas pendentes de manutenção, como apresentado na figura 3.9, em um consolidado de informações diárias referente ao mês de fevereiro.

MANUTENÇÃO INDUSTRIAL						
Carimbo de data/hora	MÊS	ANO	Nome do solicitante	Local do Ar condicionado	Condição	
24/01/2025 08:24:58	jan./2025	2025	Jolison Ribeiro Valadares	Subestação 03	Compressor sem funcionamento	
24/01/2025 15:33:49	jan./2025	2025	rodrigo trindade	GUAMÁ	BAIXA EFICIÊNCIA	
24/01/2025 15:34:08	jan./2025	2025	rodrigo trindade	GUAMÁ	BAIXA EFICIÊNCIA	
25/01/2025 07:58:32	jan./2025	2025	diogo silva	frota	risco de queda condensadora	
29/01/2025 14:09:04	jan./2025	2025	Adson Patrik Nogueira Barbosa	SALA DE T.I	BAIXA EFICIÊNCIA	
28/01/2025 07:24:12	jan./2025	2025	DIOGO SILVA	SUBESTAÇÃO	NÃO ESTÁ FUNCIONANDO	
01/02/2025 11:49:12	fev./2025	2025	FABIANA SILVEIRA DE OLIVEIRA	REFEITÓRIO LAVRA	NÃO ESTÁ FUNCIONANDO	
03/02/2025 13:20:11	fev./2025	2025	DIEGO DE LIMA RIBEIRO	GUAMÁ	NÃO ESTÁ FUNCIONANDO	
03/02/2025 13:34:58	fev./2025	2025	DIEGO DE LIMA RIBEIRO	BLOCO C	NÃO ESTÁ FUNCIONANDO	
03/02/2025 16:48:03	fev./2025	2025	rosivaldo	PARÁ	BAIXA EFICIÊNCIA	
03/02/2025 16:50:30	fev./2025	2025	rosivaldo	SE-03	NÃO ESTÁ FUNCIONANDO	

Figura 3.7: Trecho do banco de dados gerado a partir das solicitações via Google formulários.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).



Figura 3.8: Solicitações de serviços de refrigeração registrados no ano de 2024.

Fonte: Adaptado pelo autor (2024).

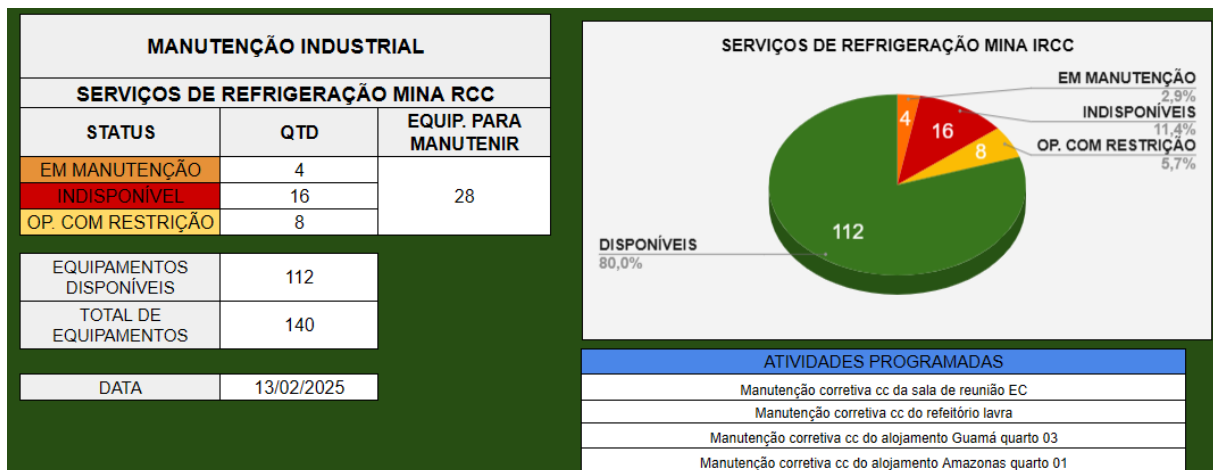


Figura 3.9: Consolidado de informações diárias do setor de refrigeração.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

A pressão constante por respostas rápidas levava a soluções algumas vezes improvisadas, que não eliminavam a raiz dos problemas. Conversas informais realizadas com os próprios colaboradores durante o estágio indicaram que a sobrecarga de trabalho reduzia a qualidade dos serviços e aumentava a sensação de exaustão da equipe, reforçando o

caráter insustentável do modelo de manutenção até então empregado.

Capítulo 4

Proposta de Implantação do PCM

4.1 Escopo da Proposta

Conforme já mencionado em seções anteriores deste trabalho, em virtude da complexidade da planta industrial e da limitação da equipe de manutenção disponível, definiu-se como foco deste estudo a gestão da manutenção dos equipamentos de refrigeração, especificamente os sistemas de ar-condicionado do tipo *split*. Esses equipamentos estão distribuídos em diferentes áreas da mina, incluindo alojamentos, prédios administrativos, subestações, refeitórios e oficinas.

A escolha desse escopo se justifica pelo elevado número de unidades instaladas — aproximadamente 140 equipamentos — e pelo grande índice de falhas registrado. Tais falhas decorriam, em grande parte, da ausência de manutenções sistemáticas e da dificuldade de acompanhar de forma organizada a demanda de serviços. A concentração do estudo nesse conjunto específico de ativos possibilitou estruturar uma proposta viável e compatível com os recursos humanos disponíveis, ao mesmo tempo em que representou uma oportunidade de impacto imediato sobre um setor crítico para as operações.

Além disso, o projeto foi concebido como uma fase piloto. A partir dos resultados obtidos na gestão dos sistemas de refrigeração, a proposta pode ser expandida futuramente para outros equipamentos da planta, de forma gradual e estruturada.

4.2 Elaboração do Plano de Manutenção

Antes da elaboração do plano, foi realizada uma análise crítica dos métodos de manutenção descritos no referencial teórico, considerando suas especificidades, custos de implantação e compatibilidade com as políticas da empresa. Após discussões com os líderes de manutenção industrial da mina, definiu-se pela adoção de um modelo baseado em manutenções preventivas sistemáticas, executadas em intervalos de tempo pré-definidos. Essa escolha se mostrou a mais adequada devido ao baixo custo de implantação em comparação a sistemas preditivos, além da facilidade de execução, uma vez que a equipe de refrigeração já possuía conhecimento técnico e experiência suficientes para realizar as intervenções preventivas. As principais lacunas observadas estavam relacionadas à ausência de um plano periódico estruturado e de um sistema centralizado para acompanhamento dos dados e execução das rotinas.

O primeiro passo consistiu no levantamento em campo de todos os equipamentos de ar-condicionado *split* em operação na mina. Com o apoio do técnico de refrigeração, foram identificados os *tags* já existentes e criados novos para os que não possuíam, registrando-se também informações como marca, potência e localização exata de cada unidade. Esse trabalho resultou na identificação de 140 equipamentos em uso, posteriormente agrupados por área de instalação.

Com esse inventário em mãos, iniciou-se a elaboração do plano de manutenção. Para assegurar a coerência técnica, foram considerados não apenas os manuais dos fabricantes, mas também a experiência prática dos técnicos e a orientação dos engenheiros mecânicos e eletricitistas da empresa. Assim, o plano combinou recomendações formais com adaptações necessárias à realidade local.

As tarefas foram organizadas em dois ciclos principais:

- Trimestrais: atividades preventivas de rotina simples, como limpezas rápidas, inspeções visuais e pequenos ajustes. A figura 4.1 evidencia as atividades com mais detalhes.
- Semestrais: atividades de rotina complexa, incluindo limpezas completas, verifica-

ções mecânicas e elétricas, diagnósticos frigorígenos e substituição de componentes em fim de vida útil. A figura 4.2 evidencia as atividades com mais detalhes.

A partir dessa divisão, elaborou-se um mapa de 52 semanas figura 4.3 , no qual foram distribuídas as tarefas de manutenção ao longo do ano, indicando para cada semana quais equipamentos deveriam receber intervenção e qual o tipo de manutenção a ser realizado. Essa ferramenta foi inicialmente estruturada em planilhas simples e teve papel fundamental na organização do fluxo de trabalho, permitindo a distribuição equilibrada das atividades para evitar sobrecarga em determinados períodos e ociosidade em outros.

Com base no mapa semanal, eram geradas as ordens de manutenção para a equipe de refrigeração. Num primeiro momento, essas ordens eram emitidas manualmente, mas posteriormente passaram a ser geradas automaticamente pelo sistema ERP de manutenção da empresa, o Totvs Proteus, ampliando a confiabilidade e reduzindo falhas no processo de programação. Esse aspecto será abordado em seção específica do trabalho.

Embora o escopo deste plano esteja restrito a dois ciclos de manutenção (trimestral e semestral), sua aplicação abre caminho para evoluções futuras, como a incorporação gradual de práticas preditivas ou a ampliação do modelo para outros equipamentos da planta. Ainda que essa perspectiva esteja além do objetivo imediato deste estudo, ela representa uma possibilidade real de amadurecimento do sistema de manutenção da empresa.

Descrição dos serviços Trimestrais ((limpezas rápidas, checgens visuais e funcionais, ajustes mais simples))	Periodicidade	Responsavel Técnico
<ul style="list-style-type: none"> • Filtros de ar: limpar; substituir se rasgado/deformado. • Bandeja e linha de dreno: limpar, remover lodo/biofilme; teste de escoamento. • Evaporador (serpentina interna): limpeza superficial (spray apropriado), inspeção de fungos e checagem de aletas amassadas. • Condensador (serpentina externa): lavagem leve para remoção de pó/insetos. • Gabinete/unidade interna: limpeza externa; checar tampas, fixações, vedação de painéis, ruído e vibração anormal; mecanismo de renovação de ar/aberturas (se houver). • Elétrica (inspeção visual): conferir disjuntor/plugs/cabos/borneiras e aterramento; reaperto pontual apenas se houver evidência clara de afrouxamento. • Medições operacionais básicas: tensão e corrente (comparar com nominal), ΔT entre retorno e insuflamento, observação de ruídos/cheiros anormais; registro no relatório. • Circuito frigorígeno – triagem: inspeção não intrusiva de possível vazamento (sinais de óleo em conexões) e do isolamento térmico das linhas; pequenos reparos no revestimento. • Higienização preventiva: desinfecção leve de bandeja/evaporador com produto compatível; aplicação de pastilha anti-biofilme (se adotado no seu procedimento). 	Trimestral	Técnico de Refrigeração

Figura 4.1: Descrição das atividades trimestrais do plano de manutenção.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

Assim, foram mantidos dois indicadores já empregados no modelo anterior de manutenção, escolhidos por sua simplicidade de coleta e aplicabilidade prática:

- Número de ocorrências de falhas: contabilizado mensalmente, com base na planilha que consolida os chamados abertos pelos colaboradores via formulário *online* sempre que um equipamento apresentava defeito. Esse indicador permitiu identificar a frequência de falhas e comparar a evolução ao longo dos meses.
- Disponibilidade dos equipamentos de refrigeração: medida de forma global, considerando todos os aparelhos em operação. O cálculo foi realizado a partir da proporção de equipamentos indisponíveis em relação ao total, resultando no indicador conhecido como Disponibilidade D-1, que reflete a condição do parque de máquinas no dia anterior, além da disponibilidade média mensal, que considera a disponibilidade de todos os dias dentro de cada mês.
- Tipos de manutenção: contabilizado mensalmente, a partir da quantidade de ações de manutenção preventiva e corretiva, em relação ao total de intervenções mantenedoras. Reflete se a equipe de manutenção está trabalhando de forma mais preventiva ou reativa.

Apesar de se tratar de indicadores básicos, sua aplicação foi suficiente para mensurar os efeitos imediatos da mudança de abordagem e estabelecer uma base de comparação entre os dois modelos de manutenção. Além disso, a escolha desses indicadores foi estratégica: garantiu viabilidade prática no curto prazo e criou as condições necessárias para, em um estágio futuro, ampliar o sistema de monitoramento, incorporando métricas mais robustas que permitam uma análise aprofundada da *performance* da manutenção.

4.4 Implementação no *software* ERP TOTVS Protheus

O *software* ERP TOTVS Protheus já era amplamente utilizado na planta de Barcarena, especialmente na integração de processos administrativos e de manutenção. Na mina, porém, seu uso restringia-se quase exclusivamente ao setor de compras, sendo a aplicação pela manutenção industrial bastante limitada. Essa situação era agravada pela ausência

de profissionais com conhecimento aprofundado no sistema e pela falta de treinamentos internos ou manuais fornecidos pela empresa, o que dificultava a exploração de todo o potencial da ferramenta.

Diante desse cenário, a implementação do módulo de manutenção no Protheus foi conduzida diretamente pelo autor deste trabalho, utilizando como base materiais de apoio disponíveis na internet. O processo iniciou-se com o cadastro dos equipamentos de ar-condicionado *split*, contemplando a criação e atualização de *tags*, inserção de dados técnicos relevantes (como marca e potência) e definição das respectivas localizações.

Na sequência, foram registradas no sistema as tarefas de manutenção preventiva definidas no plano elaborado, respeitando integralmente os ciclos estabelecidos (trimestral e semestral) e suas periodicidades. A partir desse cadastro, o *software* passou a gerar automaticamente as ordens de manutenção (OMs) de acordo com o planejamento estabelecido. Essas ordens eram posteriormente emitidas em formato impresso e entregues à equipe de manutenção, garantindo maior regularidade e organização no fluxo de trabalho.

Apesar do avanço representado pela automatização na geração das OMs, algumas limitações permaneceram. O registro de execução e a baixa das ordens continuavam a ser realizados manualmente pela equipe, exigindo disciplina no preenchimento das informações para manter a confiabilidade dos dados. Ainda assim, o objetivo principal foi alcançado: a emissão estruturada e regular de ordens de manutenção preventivas, complementando os controles manuais em planilhas.

Capítulo 5

Resultados

A nova metodologia de Plano de Manutenção passou a ser adotada em março de 2025, em um cenário no qual, nos meses anteriores, o número de chamados (ocorrências de falhas) oscilava na faixa de 40 a 60 registros mensais. A disponibilidade geral dos equipamentos de refrigeração, mantinha-se em torno de 85%, com cerca de 20 unidades indisponíveis ou operando com limitações, diariamente. Dado o volume de equipamentos e sua criticidade para o conforto e segurança dos colaboradores, esse índice era considerado insatisfatório.

Após a adoção do plano, observou-se uma redução progressiva e consistente no número de chamados. Saindo de 63 ocorrências de falhas em março, para o total de 44 registros em abril, e reduzindo para 18 ocorrências em julho de 2025 (figura 5.1), último mês em que acompanharam-se formalmente os resultados para os fins deste trabalho. Essa queda foi registrada em todas as áreas atendidas — alojamentos, refeitórios, oficinas, prédios administrativos e subestações — indicando que o impacto foi generalizado.

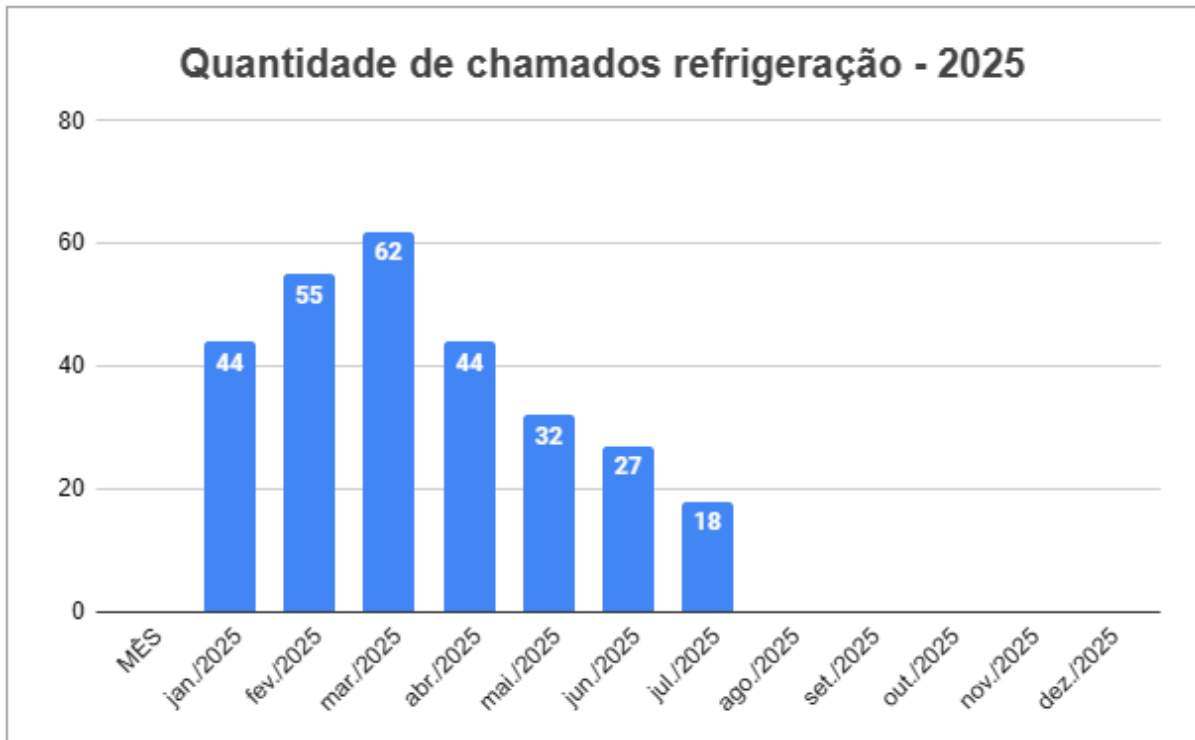


Figura 5.1: Gráfico de ocorrências de falhas de janeiro à julho de 2025.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

A disponibilidade operacional também apresentou avanço significativo. Enquanto no modelo anterior a disponibilidade média variava em torno de 85% e cerca de 20 equipamentos indisponíveis diariamente, após a implementação o índice alcançou 95% de disponibilidade em julho de 2025 (5.2), o que corresponde a apenas 5 a 7 unidades fora de operação por dia (figura 5.3). Em boa parte dos casos, a indisponibilidade estava associada à espera por peças de reposição, mas também ainda à falhas inesperadas, visto que nem todos os equipamentos já haviam sido atendidos pelo cronograma definido no mapa de 52 semanas para o ano de 2025, no entanto, é projetado que a medida que todos os ativos sejam contemplados pelas ações preventivas ao menos uma vez, a ocorrência de falhas inesperadas aproxime-se de zero.

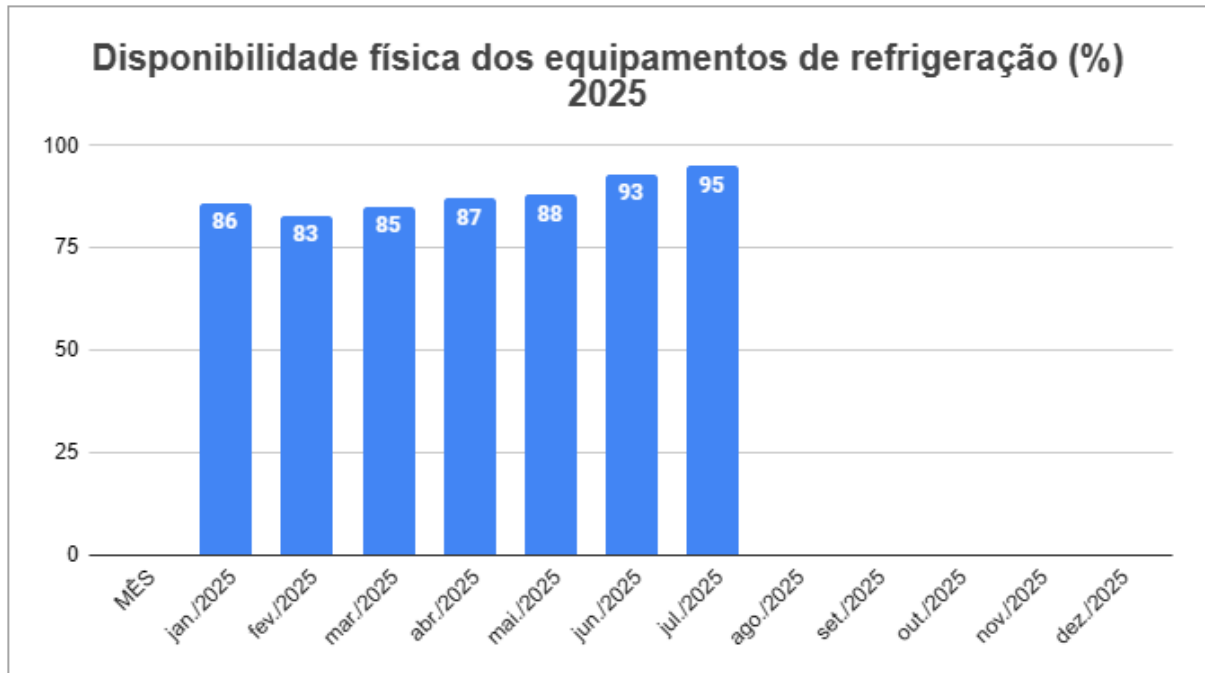


Figura 5.2: Gráfico de disponibilidade física dos equipamentos de refrigeração de janeiro à julho de 2025.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

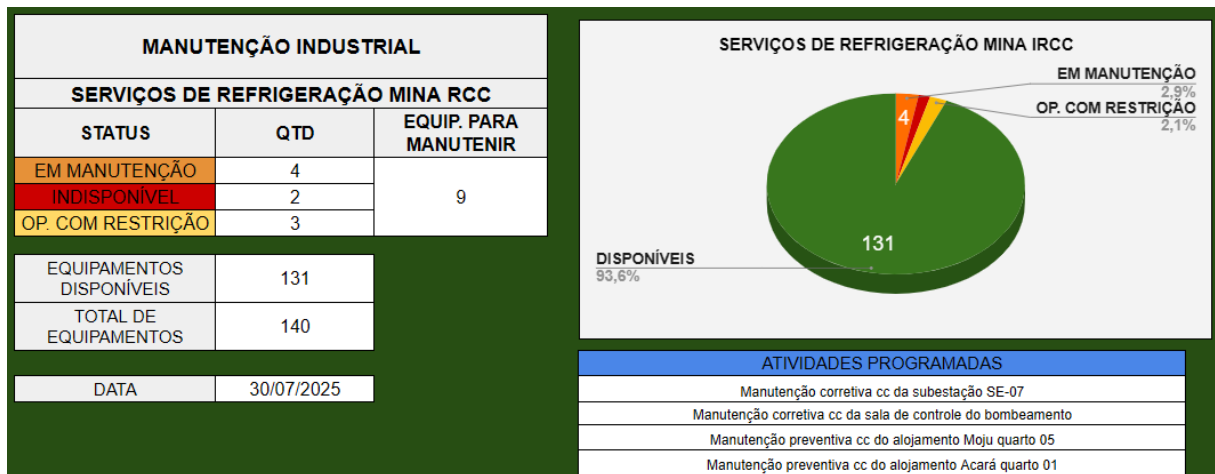


Figura 5.3: Consolidado de informações diárias referente ao mês de julho de 2025.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

O processo de transição não ocorreu sem desafios. No início, a equipe de refrigeração enfrentou sobrecarga de demandas, já que precisava conciliar o atendimento dos chamados ainda elevados com a execução das novas atividades preventivas. Com a continuidade do plano, porém, o número de falhas diminuiu gradualmente, permitindo que os técnicos passassem a dedicar a maior parte do tempo às ações preventivas. Esse movimento

resultou em uma mudança de cultura dentro da equipe, que deixou de atuar de forma integralmente reativa, marcada por improvisos e pressa, para adotar uma postura mais preventiva, planejada e eficiente, como ilustrado na figura 5.4, onde é apresentado um gráfico dos tipos de manutenção registradas mensalmente, contabilizando ações corretivas e preventivas.

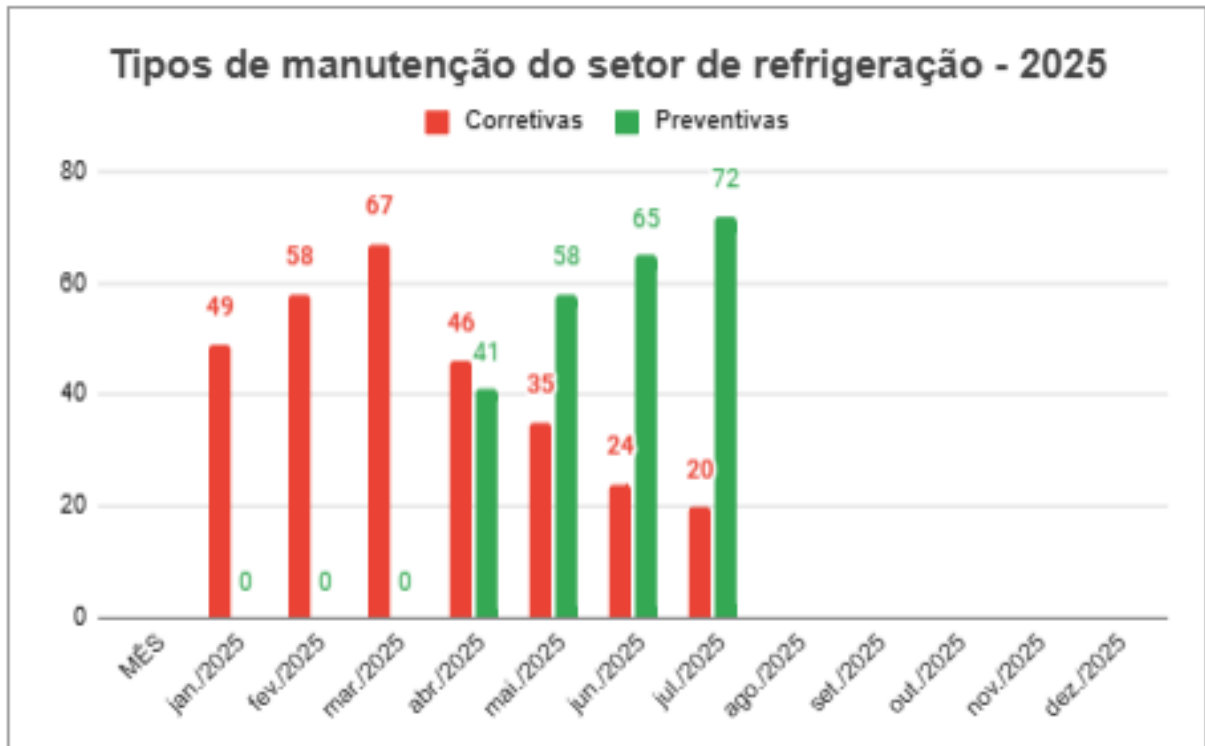


Figura 5.4: Gráfico dos tipos de manutenção de janeiro à julho de 2025.

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

Além dos resultados quantitativos, foi possível identificar melhorias qualitativas relatadas pelos próprios colaboradores em conversas informais. Eles destacaram a redução da pressão diária por atendimentos emergenciais, a melhora na organização das rotinas de trabalho e o aumento da qualidade dos serviços realizados, já que as manutenções passaram a ser feitas com planejamento adequado e tempo suficiente para execução correta das tarefas.

De forma geral, os resultados confirmaram a eficácia do plano de manutenção preventiva proposto. Mesmo em um escopo limitado e com recursos restritos, a aplicação do método proporcionou ganhos expressivos em confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, além de contribuir para um ambiente de trabalho mais equilibrado e sustentável.

para a equipe de manutenção.

Capítulo 6

Considerações Finais

O objetivo central deste trabalho foi alcançado, comprovando que a aplicação de uma metodologia de manutenção preventiva, mesmo em um escopo restrito, pode gerar melhorias significativas em curto prazo. A expressiva redução da ocorrência de falhas e o aumento consistente da disponibilidade dos equipamentos de refrigeração demonstraram a efetividade da proposta, validando sua aplicabilidade em ambientes industriais que enfrentam limitações de recursos.

Além dos resultados imediatos, a experiência obtida neste estudo mostra que a implementação de rotinas preventivas pode servir como etapa inicial para a adoção de práticas mais estruturadas em outros setores da planta, envolvendo equipamentos de maior porte e criticidade. Assim, este trabalho pode ser entendido como um projeto piloto, capaz de fornecer aprendizados e referências para futuras expansões.

Como recomendações de melhoria no método, sugere-se a inclusão do acompanhamento dos custos de manutenção, permitindo avaliar não apenas a eficiência operacional, mas também os impactos econômicos da metodologia. Destaca-se ainda a necessidade de evolução no uso de indicadores, incorporando métricas como MTTR (*Mean Time To Repair*), MTBF (*Mean Time Between Failures*) e confiabilidade, que segundo a literatura especializada representam parâmetros essenciais para medir com maior precisão o desempenho da manutenção.

Ainda com relação a melhorias, também é proposto que a equipe de manutenção considere, ao comprar novos equipamentos de refrigeração, optar por modelos que possuam

tecnologia integrada que permita acesso a internet, dessa forma, surge um leque de possibilidades e facilidades no que tange ao monitoramento das condições de operação dos ativos de forma remota e mais frequente.

Embora a proposta aqui apresentada tenha se limitado a manutenções preventivas sistemáticas, sua aplicação bem-sucedida estabelece bases sólidas para a futura adoção de metodologias mais avançadas, como a manutenção preditiva, que pode ampliar ainda mais a confiabilidade e otimização dos ativos industriais.

Em síntese, este estudo evidenciou que, mesmo em cenários de restrição de mão de obra e recursos, a implantação de um modelo simplificado e bem estruturado de manutenção preventiva é capaz de aumentar a disponibilidade dos equipamentos, reduzir falhas e criar fundamentos técnicos para a maturidade da gestão da manutenção em diferentes contextos industriais.

Referências Bibliográficas

- ABNT NBR 5462. *Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994. Norma.
- BORLIDO, D. J. A. *Indústria 4.0: aplicação a sistemas de manutenção*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto (Portugal), 2017.
- COSTA, M. d. A. Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)*. Juiz de Fora: UFJF, 2013.
- FITCH, E. C. *Proactive maintenance for mechanical systems*. [S.l.]: Elsevier, 1992.
- FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e manutenção industrial*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2009.
- FRANÇA, L. G. d. O. *Desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva para um sistema eletrônico de extinção de faíscas em uma indústria de beneficiamento de madeira*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- ISO 55000. *Asset management — Overview, principles and terminology*. Geneva, 2014. Standard.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção-função estratégica*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- LINO, A. D. S. *Gestão da manutenção*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Anhanguera, 2019.
- MACHADO, C. O. et al. Manutenção prescritiva: A evolução da manutenção na indústria 4.0. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 9, p. 4444–4458, 2023.
- MAGALHÃES, C. de S.; SILVEIRA, L. P.; GOMES, R. R. M. Gestão da manutenção no setor alimentício: Estratégia baseada em confiabilidade. *Revista FSA*, v. 18, n. 3, 2021.
- MAHALE, Y.; KOLHAR, S.; MORE, A. S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *Discover Applied Sciences*, Springer, v. 7, n. 4, p. 243, 2025.
- MARCORIN, W. R.; LIMA, C. R. C. Análise dos custos de manutenção e de não-manutenção de equipamentos produtivos. *Revista de ciência & tecnologia*, v. 11, n. 22, p. 35–42, 2003.

- MORAD, A. M.; POURGOL-MOHAMMAD, M.; SATTARVAND, J. Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of sungun copper mine. *Journal of Central South University*, Springer, v. 21, n. 6, p. 2372–2382, 2014.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. [S.l.]: Industrial Press Inc., 1997.
- NAKAJIMA, S. Introdução ao tpm. *São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos*, 1989.
- NETTO, W. A. C.; ABRAHÃO, W. A importância e a aplicabilidade da manutenção produtiva total (tpm) nas indústrias. *Juiz de Fora*, 2008.
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Revista Gestão Industrial*, v. 4, n. 2, 2008.
- PERES, C. R. C.; LIMA, G. B. A. Proposta de modelo para controle de custos de manutenção com enfoque na aplicação de indicadores balanceados. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, v. 15, p. 149–158, 2008.
- RAPOSO, J. L. O. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão. *Universidade Federal da Bahia*, 2004.
- RIBEIRO, I. et al. Implementing tpm supported by 5s to improve the availability of an automotive production line. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 38, p. 1574–1581, 2019.
- SLACK, N. et al. *Administração da produção*. [S.l.]: Atlas São Paulo, 2009. v. 2.
- VIANA, H. R. G. Manual de gestão da manutenção. *Brasília: ENGETELES Editora*, 2020.
- WYREBSK, J. Manutenção produtiva total. *Um Modelo Adaptado. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 1997.
- XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. *Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial*, v. 171, 1998.
- ZEN, M. A. G. *Indicadores de manutenção*. 2008. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/indicadoresBR.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2025.