



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE PARA UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO
TIPO PONTE EM UMA MINERADORA**

**MAGSON ARAÚJO DA SILVA
PEDRO DOS SANTOS RIBEIRO NETO**

**Tucuruí – PA
2020**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE PARA UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO
TIPO PONTE EM UMA MINERADORA**

**MAGSON ARAÚJO DA SILVA
PEDRO DOS SANTOS RIBEIRO NETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:
Prof. MSc. Maciel da Costa Furtado**

**Tucuruí – PA
2020**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

R484p Ribeiro Neto, Pedro dos Santos
 Proposta de Aplicação da Metodologia da Manutenção
 Centrada em Confiabilidade para uma Recuperadora de Minério
 Tipo Ponte em uma Mineradora / Pedro dos Santos Ribeiro Neto,
 Magson Araújo da Silva . — 2020.
 xix, 109 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Me. Maciel da Costa Furtado
 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
 Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí,
 Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

 1. Manutenção. 2. Confiabilidade. 3. Falhas. 4.
 Recuperadora de Minério. I. Título.

CDD 620.00452



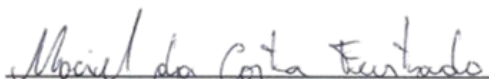
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE PARA UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO
TIPO PONTE EM UMA MINERADORA

MAGSON ARAÚJO DA SILVA
PEDRO DOS SANTOS RIBEIRO NETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenheiro Mecânico.

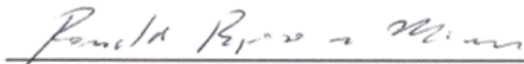
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof^o MSc. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA



Membro Interno: Prof^o MSc. Jessé Luís Padilha
FEM/CAMTUC/UFPA



Membro Interno: Prof^o MSc. Ronaldo Raposo de Moura
FEM/CAMTUC/UFPA

Conceito Excelente

Tucuruí, 18 de Febrero de 2020.

*Dedico este trabalho, a minha filha, Ágatha
Alves Araújo, minha motivação e que me deu
um sentido especial para minha existência.*

Magson Araújo da Silva

*Dedico este trabalho em memória de meu pai,
José Fernando Ribeiro, que compartilhava
comigo o sonho da graduação. À minha mãe,
Silvana Adair, e irmão, Fernando Ribeiro, por
serem a base que me deu forças para chegar
até aqui.*

Pedro dos Santos Ribeiro Neto

AGRADECIMENTOS

Magson Araújo da Silva

A DEUS por minha vida, pela minha família, por ter me guiado nessa jornada, me dado força e coragem para vencer todas as dificuldades enfrentadas durante o curso.

Aos meus pais, pela minha criação, onde me transmitiram todo ensinamento necessário para ser uma pessoa do bem.

À minha esposa, pelo apoio durante essa jornada e principalmente por ser uma mãe extremamente dedicada na criação de nossa filha Ágatha.

Ao professor Maciel da Costa Furtado, meu orientador, por ter acreditado na possibilidade da realização deste trabalho, pela disponibilidade, pelo ensinamento durante o curso, que foram imprescindíveis para a concretização deste trabalho.

Aos meus amigos que fiz durante a faculdade, que me apoiaram durante todo o curso, ajudando a superar as dificuldades, em especial ao meu amigo Thelri que teve uma grande parcela de contribuição na minha graduação e sempre serei muito grato por isso.

Ao meu parceiro de TCC, Pedro Ribeiro, pelo companheirismo, dedicação e suporte nesse trabalho e durante a graduação.

A todo corpo docente da faculdade de engenharia mecânica, que compartilharam seus conhecimentos dentro e fora de sala e foram primordiais para minha formação.

A todos membros da Esquadro – Empresa Júnior, empresa que tive a honra de ser membro, que agregou ao meu crescimento pessoal e profissional.

A todos que de alguma forma contribuí para que pudesse concluir minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Pedro dos Santos Ribeiro Neto

Agradeço, primeiramente, a Deus e à N. Sr.^a. da Conceição, pela vida e por me guiar através das dificuldades enfrentadas.

Ao meu pai José Fernando Ribeiro, que em vida sempre teve o sonho de me ver chegar até aqui e não mediu esforços para me apoiar e dar condições para que eu seguisse em frente. À minha mãe Silvana Adair, meu irmão Fernando Ribeiro e meu sobrinho Riquelme Ribeiro, por não me permitirem desistir, sempre seguirem me incentivando e rezando por mim, todos foram fundamentais nessa longa caminhada.

À minha tia e professora Mariléa Ribeiro, que me proveu ensinamentos que foram essenciais para que eu passasse no vestibular e pudesse cursar o curso dos meus sonhos, ela foi uma grande incentivadora no começo dessa jornada.

Aos amigos de infância de Abaetetuba, com os quais tive a oportunidade de dividir um teto em Tucuruí, além das aflições de se morar longe de casa, Edielson Vilhena (Barelson), Ailton Rodrigues (Gnomo), Jean Dias (Cabeça) e Júnior Rodrigues (Dj Gordo). Muitas histórias de amizade foram formadas durante esses 5 anos morando longe da nossa cidade natal.

Aos meus colegas de turma, pela convivência e por compartilharem as situações da vida acadêmica. Especialmente ao meu amigo e parceiro de TCC, Magson Araújo da Silva (Magshow), pelo companheirismo e dedicação para a realização desse trabalho.

Ao nosso orientador, Maciel da Costa Furtado, por abraçar a ideia e estar sempre disposto a ajudar e dar sugestões para melhora do trabalho. Agradeço, também, a todos os outros professores da faculdade de Engenharia Mecânica, cada um foi essencial para minha formação, levo comigo o conhecimento repassado durante a graduação.

Por fim, fica a gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o alcance desse objetivo.

*“Estar numa busca constante para tentar ser a
melhor versão de si. É isso que essa
mentalidade é sobre. Não é algo finito. É uma
busca constante em tentar ser melhor hoje do
que você foi ontem e melhor amanhã do que
você foi no dia anterior”*

Kobe Bryant

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE PARA UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO TIPO PONTE EM UMA MINERADORA

RESUMO

A busca de qualidade em processos é ponto fundamental para as indústrias no cenário atual do mercado. Isso garante a excelência do produto final e evita desperdícios e perdas econômicas. Nesse sentido, no contexto de manutenção e operação dos ativos físicos de uma empresa, deve-se garantir a confiabilidade das máquinas e equipamentos a fim de se atingir a qualidade do processo. Portanto, essa monografia propõe atividades baseadas na metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) para uma máquina Recuperadora de Minério do Tipo Ponte, a qual opera em uma grande mineradora multinacional. Foram levantados o histórico de produção e de falhas do ativo em um período de 10 meses, em que se percebe a baixa confiabilidade da máquina em cumprir suas funções principais, pois não foram cumpridas as metas de produção orçadas para o período e, também, porque ocorreram diversos eventos de parada não programada para manutenção corretiva. Assim, com envolvimento de profissionais de diversos setores (engenharia, operação, manutenção e inspeção mecânica), foi realizado um estudo detalhado de falhas com a ferramenta FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). Por conseguinte, foram priorizados os modos de falhas mais críticos para, no final, se propor soluções que mitiguem ou amenizem os problemas encontrados, atuando sempre nas causas fundamentais das falhas.

Palavras chave: Manutenção, Confiabilidade, Falhas, Recuperadora de Minério.

APPLICATION PROPOSAL OF THE RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE METHODOLOGY FOR A BRIDGE-TYPE BUCKET WHEEL RECLAIMER IN A MINING

ABSTRACT

The search for process quality is a fundamental point for industries in the current market scenario. This guarantees the final product excellence, avoid waste and economic losses. In this sense, in the context of maintenance and operation of a company's physical assets, the machines and equipment reliability must be guaranteed in order to achieve the process quality. Therefore, this monograph proposes activities based on the Reliability Centered Maintenance (RCM) methodology for a Bridge-type bucket wheel reclaimer machine, which operates in a large multinational mining company. The history of production and failures of the asset is surveyed over a period of 10 months, in which one perceives the low reliability of the machine in fulfilling its main functions, as the production targets budgeted for the period were not met, and also because there were several unscheduled stop events for corrective maintenance. Therefore, with the involvement of professionals from different sectors (engineering, operation, maintenance and mechanical inspection), a detailed failure analysis is carried out with the FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) tool. Therefore, priority was given to the most critical failure modes in order to propose solutions that mitigate or soften the problems found, always acting on the failures fundamental causes.

Key Words: Maintenance, Reliability, Failures, Bucket wheel reclaimer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Condições para aplicação do FMEA.....	30
Figura 2. Visão estrutural das informações do FMEA.....	32
Figura 3. Exemplo de planilha FMEA.	32
Figura 4. Diagrama de Ishikawa e ilustração dos 6M.	41
Figura 5. Exemplo de aplicação do método dos 5 porquês para um problema de lubrificação...43	
Figura 6. Princípios do MCC.....	44
Figura 7. Estrutura típica de um grupo de MCC.	51
Figura 8. Passos do programa MCC.....	52
Figura 9. Diagramas do MCC.....	53
Figura 10. Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada.54	
Figura 11. Recuperadora de Minério de roda de caçamba tipo ponte – RC-3011KN-01.	58
Figura 12. Fluxograma de implantação do MCC na Recuperadora de Minério.....	59
Figura 13. Parte do Plano de Ação utilizado para aplicação das atividades do MCC.....	60
Figura 14. Modelo de uma Recuperadora de Minério tipo Ponte projetada pela empresa <i>ThyssenKrupp Fördertechnik</i>	61
Figura 15. Pilha de minério estocada no pátio de regularização.	62
Figura 16. Desenho 3D da Roda de Caçamba e Caçambas.....	64
Figura 17. Roda de Caçamba e Caçambas.	64
Figura 18. Desenho técnico do Balancim.....	66
Figura 19. Conjunto Balancim com Rodas de apoio.....	66
Figura 20. Desenho do Balancim com Rodas de Apoio instalados.....	67
Figura 21. Desenho técnico das Rodas de Encosto.	67
Figura 22. Chute circular instalado na Roda de Caçamba.....	68
Figura 23. Chute circular confeccionado.....	68
Figura 24. Unidade de acionamento da roda de caçamba.	69
Figura 25. Sistema de transmissão da Roda de Caçamba (pinhão, corrente e cremalheira). ...	70
Figura 26. Carros Trolley das Rodas de Caçamba.	71
Figura 27. Unidade de Acionamento da Translação do Carro Trolley.....	71
Figura 28. Desenho técnico do Conjunto de Roldanas.....	72
Figura 29. Conjunto de Roldanas.	73
Figura 30. Desenho técnico do Rodeiros de Translação.	73
Figura 31. Rodeiros de Translação.	74

Figura 32. Unidade de Lubrificação <i>Eximport LubeSystems</i>	74
Figura 33. Especificações do Sistema de lubrificação centralizado da <i>Eximport LubeSystems</i>	75
Figura 34. Fluxo da Função Manter.	76
Figura 35. Macroprocesso do PCM.....	78
Figura 36. Interface do Sistema de Informações.	80
Figura 37. Parte de um relatório mensal gerado pelo Sistema de Informações.....	80
Figura 38. Interface do software <i>Microsoft Power BI Desktop</i>	82
Figura 39. Comparação entre dados de produção: Programado x Executado no ano de 2019 (fevereiro a novembro).	84
Figura 40. Contagem de falhas por setor durante o período de fevereiro a novembro de 2019...	85
Figura 41. Tempo Médio entre falhas no período de fevereiro a novembro de 2019.	87
Figura 42. Taxa de falhas (λ) no período de fevereiro a novembro de 2019.....	88
Figura 43. Confiabilidade da máquina em um período de 300h de operação.	89
Figura 44. Equipe de trabalho para implementação do MCC.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala para avaliação das ocorrências	34
Tabela 2. Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falhas (severidade)	35
Tabela 3. Escala para avaliação da detecção em processos.....	36
Tabela 4. Planilha ampliada para condução do FMEA e detalhamento das atividades de manutenção.....	55
Tabela 5. Dados do material e da pilha	61
Tabela 6. Dados de projeto da Recuperadora de Minério RC-3011KN-01.....	63
Tabela 7. Componentes e Funções da Roda de Caçamba	65
Tabela 8. Componentes e Funções dos Chutes circular e central.....	69
Tabela 9. Componentes e Funções do Sistema de Acionamento e Transmissão da Roda de Caçamba	70
Tabela 10. Componentes e Funções do Sistema de Acionamento de Translação dos Carros Trolley	72
Tabela 11. Componentes e Funções do Sistema de Lubrificação Centralizada	75
Tabela 12. Dados de Produção da RC no ano de 2019 (fevereiro a novembro)	83
Tabela 13. Dados de Intervenções Mecânicas e horas disponível para operação da máquina– Mensal	86
Tabela 14. FMEA da Recuperadora de Minério Tipo Ponte RC-3011KN-01	93
Tabela 15. Modos de falhas mais críticos, de acordo com linha de corte para o índice de RPN	95
Tabela 16. Teste dos 5 Por quês para análise das causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos	96
Tabela 17. Ações propostas para atuar nas causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos	98
Tabela 18. Proposta de Checklist para verificação de todo o Sistema de Lubrificação Centralizada.....	101
Tabela 19. Atividades recomendadas para serem aplicadas no planejamento de manutenção dos balancins	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AIAG** - Automotive Industry Action Group (Grupo de Ação na Indústria Automotiva)
- CCO** - Centro de Controle de Operação
- D** - Detecção
- DF** - Disponibilidade Física
- FMEA** - Failure Mode and Effects Analysis (Análise dos Modos e Efeitos de Falha)
- FTA** – Failure Tree Analysis (Análise de Árvore de Falhas)
- HC** - Horas Corretiva
- HD** - Horas Disponíveis
- HM** - Horas de manutenção
- KPI** - Key Process Indicator (Indicador Chave de Processo)
- MCC** – Manutenção Centrada em Confiabilidade
- MP** - Manutenção Preventiva
- MTBF** - Mean Time Between Failures (Tempo Médio entre Falhas)
- MTTR** - Mean Time to Repair (Tempo Médio para Reparo)
- NBR** – Norma Brasileira
- NC** - Número de intervenções Corretivas
- O** - Ocorrência
- OM** - Ordem de Manutenção
- PCM** - Planejamento e Controle da Manutenção
- PNR** - Procedimento Normativo
- R** – Reliability (Confiabilidade)
- RC** - Recuperadora de Minério
- RCM** – Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada em Confiabilidade)
- RPN** - Risk Priority Number (Número de Prioridade de Risco)
- S** – Severidade
- SAE** – Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
- TR** - Transportador de correia

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - Taxa de Falhas

t - Tempo (s)

e - Base dos logaritmos neperianos (e=2,718)

Mt - Milhões de toneladas

T - Toneladas

mm - Milímetro

m - Metro

m³ - Metro cúbico

° - grau de angulação

kW - kilowatts

L - Litros

rpm - rotações por minuto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO	22
2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO	23
2.2.1 Manutenção Corretiva	23
2.2.1.1 <i>Manutenção Corretiva Não Planejada.....</i>	24
2.2.1.2 <i>Manutenção Corretiva Planejada</i>	24
2.2.2 Manutenção Preventiva	25
2.2.3 Manutenção Detectiva ou Sensitiva	26
2.2.4 Manutenção Preditiva	26
2.2.5 Engenharia de Manutenção.....	27
2.3 FMEA – ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS	28
2.3.1 Definições.....	28
2.3.2 Tipos de FMEA.....	29
2.3.3 Aplicação do FMEA	30
2.3.4 Formulário para Aplicação.....	31
2.3.4.1 <i>Ocorrência (O).....</i>	33
2.3.4.2 <i>Severidade (S).....</i>	34
2.3.4.3 <i>Detecção (D).....</i>	35
2.3.4.4 <i>Risk Priority Number (RPN)</i>	37
2.4 AS CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS.....	39

2.4.1 Métodos de Análise de Causas Fundamentais	40
2.4.1.1 <i>Diagrama Ishikawa</i>	41
2.4.1.2 <i>Método dos 5 Porquês</i>	42
2.5 MCC - MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE	43
2.5.1 Definições	43
2.5.2 Indicadores de Confiabilidade	44
2.5.2.1 <i>MTBF (Mean Time Between Failures) – Tempo Médio entre Falhas</i>	44
2.5.2.2 <i>MTTR (Mean Time to Repair) – Tempo Médio de Reparo</i>	45
2.5.2.3 <i>DF – Disponibilidade Física</i>	45
2.5.2.4 <i>Taxa de Falhas (λ)</i>	45
2.5.2.5 <i>Confiabilidade (R)</i>	46
2.5.3 Questões Básicas do Programa MCC	47
2.5.3.1 <i>Funções e Padrões de Desempenho</i>	47
2.5.3.2 <i>Existência de Falhas Funcionais</i>	47
2.5.3.3 <i>Modos de Falhas</i>	48
2.5.3.4 <i>Efeitos de Falhas para o Ativo</i>	48
2.5.3.5 <i>Consequências das Falhas para o Ativo</i>	49
2.5.3.6 <i>Ações Proativas</i>	49
2.5.3.7 <i>Ações Convencionais</i>	50
2.5.4 Passos para Implantação do MCC	51
2.5.5 Determinação do Tipo de Atividade: Proativa x Reativa	53
2.5.6 Documentação das Atividades Propostas	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 PASSOS PARA APLICAÇÃO DO MCC NA RECUPERADORA DE MINÉRIO	58
3.2 DESCRIÇÃO DA RECUPERADORA DE MINÉRIO TIPO PONTE – RC-3011KN-01 60	
3.2.1 Informações de Funcionamento da RC	60
3.2.2 Roda de Caçamba	64

3.2.3 Chutes Circular e Central.....	67
3.2.4 Acionamento e Transmissão da Roda de Caçamba	69
3.2.5 Acionamento de Translação dos Carros Trolley	71
3.2.6 Lubrificação Centralizada	74
3.3 PROCESSO DE MANUTENÇÃO DA EMPRESA	76
3.3.1 A Função Manter	76
3.3.2 PCM - Planejamento e Controle da Manutenção.....	78
3.4 COLETA E MANIPULAÇÃO DOS DADOS DE FALHAS DA RC.....	79
3.4.1 Base de dados	79
3.4.2 Manipulação dos Dados de Falhas	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1 DADOS SOBRE A RC	83
4.1.1 Dados de Produção	83
4.1.2 Dados de Falhas	85
<i>4.1.2.1 Eventos por Setor</i>	<i>85</i>
<i>4.1.2.2 Intervenções Mecânicas por Mês</i>	<i>86</i>
<i>4.1.2.3 Tempo Médio Entre Falhas (MTBF).....</i>	<i>86</i>
<i>4.1.2.4 Taxa de Falhas (λ).....</i>	<i>87</i>
<i>4.1.2.5 Confiabilidade $R(t)$.....</i>	<i>88</i>
4.1.3 Considerações Gerais dos Dados.....	89
4.2 DEFINIÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO	90
4.3 REUNIÃO DE <i>BRAISNTORMING</i> COM OS ENVOLVIDOS.....	91
4.4 APLICAÇÃO DO FMEA	93
4.5 CLASSIFICAÇÃO DOS COMPONENTES POR CRITICIDADE.....	94
4.6 ANÁLISE DAS CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS.....	95
4.7 AÇÕES PROPOSTAS	97
4.8 DOCUMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES PROATIVAS E BOAS PRÁTICAS	100

4.8.1 Manutenção Preditiva para o Sistema de Lubrificação Centralizada	100
<i>4.8.1.1 Checklist de Verificação do Sistema</i>	<i>100</i>
<i>4.8.1.2 Boas Práticas a Seguir</i>	<i>101</i>
4.8.2 Manutenção Preventiva para os Balancins	102
<i>4.8.2.1 Adoção de Preventiva Sistemática</i>	<i>102</i>
<i>4.8.2.2 Boas Práticas a Seguir</i>	<i>103</i>
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
5.1 CONCLUSÕES	104
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

No cenário global atual, as empresas, para se manterem em alta no mercado, que por sua vez está cada vez mais competitivo, é de extrema importância a transmissão de confiabilidade para os clientes, e isso se consegue, entre outros meios, através de qualidade do produto e entrega no prazo. Para que isso seja possível, o processo produtivo deve estar muito bem delineado, desde a operação, passando pela manutenção e logística, até a chegada ao cliente.

Um dos grandes problemas que pode acarretar em perda de qualidade e atraso na produção é a quebra/falha de equipamentos dentro do processo, fazendo com que aconteça a manutenção corretiva não planejada. Devido a isso, a empresa a qual não possua uma política de manutenção bem definida está sujeita a perder espaço no mercado. Quando a empresa não tem um programa de tratamento das causas fundamentais de falhas, há uma alta possibilidade que a falha se torne recorrente, pois estará se tratando o efeito das falhas por meio de ações reativas, ao invés de tratar as causas fundamentais antes da ocorrência do evento de falha com reações proativas.

Diante desse quadro, a aplicação da metodologia de manutenção centrada na confiabilidade torna-se uma ótima alternativa para mitigação destes desvios. Com uso de ferramentas de gestão adequadas é possível aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos ativos e, conseqüentemente, melhorar o processo de produção.

Com a utilização desta metodologia e suas ferramentas é possível a elaboração de planos de manutenção preventiva sistemáticas, que certamente trarão diversos benefícios quanto ao processo em geral. Plano o qual deve ser bem delineado, com foco em prevenção de falhas dos equipamentos/componentes de acordo com seu nível de criticidade dentro da planta.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Recuperadora de Minério (RC) estudada é uma máquina que opera em regime pesado de operação, está projetada para operar durante 24h por dia por todos os dias do ano, exceto nos períodos de paradas programadas para manutenção, no entanto, constantes relatos de profissionais que estão ligado diretamente ao equipamento (como das áreas de engenharia, inspeção, manutenção e operação) expõem vários desvios de programação ocorridos na

máquina, que afetam seu funcionamento, isto também é evidenciado através dos dados de falhas do ativo, o que explica a sua baixa confiabilidade.

Diante deste cenário, um estudo detalhado das falhas, junto com a aplicação de uma metodologia centrada na confiabilidade torna-se imprescindível, buscando soluções que melhorem as condições da máquina, para que ela opere com confiança e garantia de cumprir o que se espera dela em termos de produção e funcionamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Elaborar uma proposta para melhorar a confiabilidade de uma máquina Recuperadora de Minério Tipo Ponte, por meio da aplicação da metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar sistemas e subsistemas da máquina, assim como as funções de cada um;
- Elaborar análise detalhada de falhas, utilizando a ferramenta FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), para fazer o estudo de modos e efeitos de falhas que a máquina apresenta, bem como os índices de severidade, ocorrência e detecção de cada um desses modos de falha;
- Priorização dos componentes mais críticos, de acordo com o estudo FMEA, para fazer análise das causas fundamentais de falhas;
- Elaboração de atividades de manutenção pertinentes para os componentes priorizados por criticidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

Desde o tempo em que a civilização começou a manusear instrumentos de produção, o termo manutenção já era existente, a palavra de origem latim *manus tenere*, tem como significado “manter o que se tem”. No final do século XVIII e com início da Revolução Industrial houve um crescimento da população em relação a sua capacidade de produção. Desse maneira, o surgimento de equipamentos com alta capacidade de produção exigiu sistemas de produção com uma maior disponibilidade o que resultou no aumento significativo dos custos de inatividade ou de subatividade, sendo assim preciso a utilização de técnicas de organização, planejamento e controle para que se pudesse usar os instrumentos de produção de forma racional e produtiva (VIANA, 2002).

A história da manutenção segue o desenvolvimento técnico industrial da humanidade. Com a mecanização das indústrias no final do século XIX, surgiu a necessidade dos primeiros reparos em equipamentos nas fabricas. Até 1914, a manutenção não era tratada como prioridade, sendo tratada de forma secundária e era executada pelo mesmo pessoal da operação (TAVARES, 1998). Por volta de 1950, nos Estados Unidos, o termo “manutenção” começou a ter uma visibilidade efetiva com o conceito de manter um bom funcionamento de qualquer equipamento, ferramenta ou dispositivo. Simultaneamente na Europa, a essência de manutenção começou a ganhar espaço nos meios produtivos (VIANA, 2002).

Ainda na década de 1950, no cenário pós-guerra e com a expansão industrial, surgiram as pressões do setor produtivo com aumento de demanda de todos tipos, e também da redução da disponibilidade de mão-de-obra pela ocasião de baixas na guerra. Além disso, houve o aumento da mecanização e da automação e com isso o setor produtivo fica cada vez dependente do bom funcionamento das máquinas e equipamentos. Diante desse cenário, criou-se o conceito chamado Engenharia de Manutenção que é uma técnica moderna de manutenção que procura estar sempre nivelado com a manutenção de primeiro mundo.

A Engenharia de manutenção é responsável pela identificação de falhas e de suas causas, eliminando o mau desempenho de forma ágil, estratégica e eficiente. A partir de 1966 passou a criar critérios de previsão de falhas com auxílio de computadores e aparelhos de instrumentação mais sofisticados, no intuito de otimizar os equipamentos, os processos, orçamentos e a atuação

das equipes de manutenção com isso buscando cada vez melhores índices de confiabilidade (TAVARES, 1998).

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Os tipos de manutenção existentes são caracterizados pelo modo como é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações. Há uma gama bem grande de denominações para classificar os tipos de manutenção. Neste trabalho, serão abordados seis tipos, considerados como principais por diversos autores, são eles: manutenção corretiva não-planejada e planejada, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

2.2.1 Manutenção Corretiva

De acordo com ABNT-NBR 5462 (1994) Manutenção Corretiva é a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.

Pereira (2011) afirma que a manutenção corretiva tem como principais características a espera de o equipamento falhar para se iniciar o reparo, além do mais, a falta de planejamento desse tipo de manutenção pode ser muito prejudicial em relação a custo para empresa devido a interrupção e perda de produção. Então recomenda-se a aplicação da manutenção corretiva para os ativos nas seguintes situações: ativos que tenham baixo custo operacional; nos ativos que possuem operação mais rápida que as posteriores; naqueles que não são considerados gargalos; nos de fácil manutenção e em ativos que após a evidência de falha ou pane se tem técnico de manutenção bem treinado para pronto reparo.

Esse método de manutenção deve levar em conta fatores como: é mais barato consertar uma falha do que tomar ações preventivas? Normalmente a manutenção corretiva mais barata em relação aos demais tipos de manutenção, quando é levado em consideração somente o custo de manutenção. Outros fatores importantes que devem ser levados em consideração é: por acaso existem ações ou técnicas preventivas e ser tão viáveis e econômica que evite a ocorrência de falhas no ativo? se não existir, a manutenção corretiva pode ser a recomendada. Mesmo que optando pela manutenção corretiva, não se deve conformar com as ocorrências das falhas, buscando identificar a causa raiz e bloqueá-las quando for possível, sendo assim evitando que aconteça novamente (XENOS, 1998).

A manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes: Manutenção Corretiva Não Planejada e Manutenção Corretiva Planejada.

2.2.1.1 Manutenção Corretiva Não Planejada

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva Não Planejada ou Manutenção Corretiva Não Programada tem como característica a atuação da manutenção somente após falha ou queda rendimento do ativo já ter acontecido. Esse tipo de ação ainda é muito praticado atualmente, mais do que deveria ser. Em decorrência de serem quebras aleatórias, pode ocasionar consequências graves para os ativos, estendendo-se os danos para outros equipamentos.

Esse tipo de manutenção pode ter um custo muito elevado, pois devido as quebras não programadas geralmente pode ocasionar em impactos na produção, perda de qualidade do produto ou custos inesperados com a manutenção. Quando uma empresa tem a classe de manutenção corretiva não planejada predominante na sua planta, se diz que a manutenção é comandada pelos equipamentos, pois se tem pouco ou nenhum controle sobre os ativos. (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.2.1.2 Manutenção Corretiva Planejada

A manutenção corretiva planejada é a correção do desempenho menor do que o esperado ou correção da falha por decisão gerencial. Essa decisão é baseada na modificação dos parâmetros de condição observados pela manutenção preditiva, ou seja, ela é realizada em todos os itens nos quais as consequências de falha ou desgaste não são significativas e os custos desta manutenção não é maior do que a manutenção preventiva. (KARDEC; NASCIF, 2009).

Esse método de manutenção ocorre em um período programado, com intervenção no ativo desde que o falha não implique em um evento/falha inesperada. Pode-se optar ainda, por deixar o equipamento funcionando até a ocorrência da quebra, mas normalmente intervêm-se antes da falha. No entanto, mesmo que opte por esperar a quebra, já terá sido feito um planejamento quanto a providenciar equipamento ou componentes sobressalente, aos modos que facilitem e agilizem o processo de manutenção (MARÇAL, 2008).

Todos os serviços de corretiva planejada devem ser muito bem planejados e programados, visando a diminuição de custos e interrupção da linha de produção. Tendo isso

em vista, os planejadores de corretiva devem ser bem treinados e ter uma base de dados viável para se definir os componentes que serão contemplados nesse tipo de manutenção (MOBLEY *et al.*, 2008).

2.2.2 Manutenção Preventiva

Manutenção Preventiva “é manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT- NBR-5462, 1994, p. 7).

De acordo com Smith e Hinchcliffe (2004), existem quatro fatores por trás da definição de se usar uma manutenção preventiva:

- Prevenir (ou mitigar) a ocorrência de falhas;
- Detectar o início da falha;
- Descobrir uma falha oculta;
- Definir periodicidade de manutenção quando há limitações para inspeção.

Todo serviço de manutenção executado em máquinas que estejam dentro de suas condições operacionais, ou seja, ausente de falhas, pode-se considerar manutenção preventiva. Através desse tipo de manutenção, é possível fazer um levantamento para estoque de acordo com planejamento de manutenção e ter uma ideia consistente dos componentes sobressalentes necessários para manter as máquinas em pleno funcionamento, visando a continuidade da produção (VIANA, 2002).

Para Xenos (1998) a manutenção preventiva é o método de manutenção sistemática, pois envolve tarefas como reformas, substituições de componentes e subcomponentes. A manutenção preventiva torna-se de caráter obrigatório após ser estabelecida. Diante da implantação, geralmente há uma diminuição das frequências de ocorrências das falhas, o aumento da disponibilidade física dos ativos, e também redução nos números de interrupções não programadas.

A implantação de um sistema de manutenção preventivo tem suas vantagens, pois através dela é possível equilibrar a utilização de recursos humanos, eliminando tempo ocioso e excesso ou falta de profissionais. Outra vantagem é a eliminação ou redução do tempo de espera para compra de peças, devido ao planejamento sendo possível seguir um cronograma de

compras diante da previsão de consumo. Um fator muito importante é a confiabilidade dos ativos, cumprindo prazos de produção em virtude do planejamento e bom funcionamento das máquinas utilizada no sistema e isso tudo acarreta a satisfação do cliente por causa da qualidade e prazo obedecidos (ALMEIDA, 2014).

2.2.3 Manutenção Detectiva ou Sensitiva

Manutenção Detectiva, “é a atuação efetuada em sistemas de proteção ou comando, buscando detectarem falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção” (KARDEC; NASCIF, 2009, p. 47).

Com o objetivo de garantir uma maior confiabilidade é primordial a identificação de falhas ocultas no sistema. A utilização de equipamentos tecnológico de instrumentação e controle de processo vem aumentando significativamente nas indústrias. A manutenção detectiva incide em verificações no sistema, feitas por especialistas, muita das vezes sem tirá-lo de operação, que são capazes de detectar falhas ocultas, e podem corrigir a situação, mantendo o sistema operando. Uma das características que diferencia a manutenção detectiva da preditiva é o nível de automatização do processo (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.2.4 Manutenção Preditiva

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT-NBR-5462, 1994, p. 7).

Com a manutenção preditiva é possível prever através de análise instrumental quando a peça ou componente irá falhar, e assim permitindo otimizar a trocas das peças ou reforma dos componentes somente quando for necessário, ou seja, esse acompanhamento vai determinar o tempo correto da necessidade da intervenção mantenedora, trazendo o benefício de não precisar fazer a desmontagem para inspeção, com isso estendendo o intervalo de manutenção e obtendo o máximo aproveitamento da vida útil das peças e/ou componentes. (XENOS, 1998).

Da mesma forma, na concepção de Vaz (1997) a adoção da manutenção preditiva, leva a supor que seja a solução ideal para as falhas e defeitos nas máquinas e equipamentos, pois ela consiste em interferir na máquina para providenciar manutenção eficaz, no momento adequado. Tal momento é estabelecido mediante estudo e monitoramento cuidadosos dos vários elementos que intervêm no processo de operação, visando detectar a iminência de uma falha.

De acordo com Kardec e Nascif (2009), existem algumas condições básicas para se adotar a manutenção preditiva, que são elas: Deve ser possível fazer algum tipo de monitoramento/medição nos ativos e tem que verificar a sua viabilidade em relação ao custo envolvido, além disso, as falhas devem ter como origem as causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada. Outra condição é adoção de um programa sistematizado de acompanhamento, análise e diagnóstico.

Dentre os seus maiores benefícios, pode-se citar: previsão de falhas com antecedência suficiente para que os equipamentos sejam desativados em segurança, reduzindo os riscos de acidentes e interrupções do sistema produtivo; redução dos prazos e custos de manutenção pelo conhecimento antecipado das falhas a serem reparadas; melhoria nas condições de operação dos equipamentos no sentido de obter menor desgaste, maior rendimento e produtividade (MIRSHAWKA, 1991).

2.2.5 Engenharia de Manutenção

Engenharia de Manutenção é “um conjunto de atividades que permite que a confiabilidade seja aumentada e a disponibilidade garantida”. Ou seja, é deixar de ficar consertando — convivendo com problemas crônicos —, mas melhorar padrões e sistemáticas, desenvolvendo a manutenibilidade, dar feedback ao projeto e interferir tecnicamente nas compras. Quem só faz a manutenção corretiva continua “apagando incêndio”, e alcançando péssimos resultados. Desta forma, a organização que utilizar a manutenção corretiva, mas incorporando a preventiva e a preditiva, rapidamente estará executando a engenharia de manutenção (XAVIER, 2003).

A implantação da Engenharia de Manutenção faz com que ocorra uma mudança cultural dentro da empresa, pois com ela se tem um suporte técnico direcionado a consolidação de rotina visando a padronização e implantação de melhorias contínuas com o objetivo de estar sempre melhorando seus processos, através de coleta e armazenamento de dados gerado da manutenção preditiva. Quando implementada busca o aumento da confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança dos ativos. Outro foco é extinguir problemas recorrentes e solucionar problemas tecnológicos, além de melhorar a capacitação pessoal e gerir materiais e sobressalentes, dando também suporte à execução e fazendo análise de falhas. Tem por atribuição elaborar planos de manutenção, acompanhar indicadores e zelar pela documentação técnica (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.3 FMEA – ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHAS

2.3.1 Definições

Para Lafraia (2001), FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) é “uma técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar e/ou antecipar a(s) causa(s) e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto”.

Assim, sabe-se que o FMEA é uma ferramenta para a elevação da confiabilidade de produtos, processos e projetos, tendo como objetivo prevenir possíveis falhas antes que aconteçam (SANT’ANNA; JUNIOR, 2010). Nesse sentido, a análise FMEA tem por objetivo definir e identificar falhas potenciais de um sistema ainda em estágios iniciais. Para isso, a análise deve ser realizada por uma equipe com profissionais de diversas áreas, ligadas ao produto ou processo em estudo, para então coletar informações quanto às funções, modos, causas e efeitos de falhas (GUZZON, 2009).

A falha é o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. É a diminuição total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função durante um período de tempo, quando o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o item a um estado de indisponibilidade (NBR 5462, 1994).

Smith e Hinchcliffe (2004) consideram o FMEA como uma ferramenta fundamental na Engenharia de Confiabilidade, pois é um método prático, com abordagem qualitativa e, também, de fácil entendimento e aplicação para a análise de confiabilidade encontrada em indústrias. O FMEA, ainda, permite organizar e avaliar, sistematicamente, as fraquezas de um equipamento ou processo, e o quanto isso acarreta no decréscimo de confiabilidade do produto.

Em conformidade com isso, Fogliatto e Ribeiro (2011) explicitam que a garantia de qualidade do produto exige excelência em projeto e excelência em processos, o primeiro implicando em potencial para a qualidade, já o segundo transforma o potencial em qualidade real. Sendo assim, para garantir essa excelência, o FMEA busca: identificar e avaliar falhas potenciais de um produto ou processo, propor ações para eliminar ou amenizar a chance de ocorrência dessas falhas e, também, documentar o estudo, com um referencial técnico que possa auxiliar futuros estudos.

Os benefícios do FMEA para uma empresa, de acordo com Sant’Anna e Junior (2010), são:

- Catalogação sistemática de informações sobre falhas dos produtos ou processos;
- Melhor conhecimento dos problemas nos produtos ou processos;

- Ações de melhoria no projeto do produto ou processo, baseadas em dados e com o devido monitoramento (melhoria contínua);
- Diminuição de custos, visto a prevenção de acontecimentos de falhas;
- Incorporação de um “pensamento” de prevenção de falhas dentro da empresa, engajamento para realizar trabalho em equipe e preocupação com a satisfação dos clientes.

2.3.2 Tipos de FMEA

Rozenfeld *et al.* (2006) explicita que, embora o FMEA tenha sido desenvolvido para o projeto de novos produtos, sua aplicabilidade é bastante abrangente. Com isso, Fogliatto e Ribeiro (2011), além de Kardec e Nascif (2009), apontam a existência de três níveis de FMEA: projeto, processo e sistema, como se vê a seguir:

- **FMEA de Projeto:** Esse método visa garantir que a fase de manufatura e montagem de um equipamento tenham qualidade para atender os requisitos do projeto final. Porém, aqui não devem ser incluídos os modos de falha, os quais serão identificados e controlados com a aplicação do FMEA de processo. Nesse sentido, a FMEA de projeto tem foco na melhoria contínua do projeto, considerando limites tecnológicos e características físicas dos materiais como: resistência, dureza, dimensões e capacidade de manufatura. Dessa forma, o estudo deve se iniciar listando características que o projeto deve satisfazer, sendo que quanto melhor a definição, há mais possibilidades de se identificar os modos potenciais de falhas e as ações necessárias para correção.
- **FMEA de Processo:** A aplicação do FMEA de processo é feita em equipamentos já em operação e se baseia em uma técnica analítica para que a equipe de desenvolvimento do processo possa expor os modos potenciais de falhas e seus respectivos efeitos e causas, para assim discuti-los. Um ponto importante a ser considerado, nesse caso, é a necessidade do entendimento das falhas do processo por parte do time que estará aplicando e o quanto isso compromete a qualidade do produto. Assim, a formação de uma equipe experiente torna-se primordial para realizar a análise e, posterior a isso, documentar todo o estudo ao longo das etapas de aplicação. Por esses motivos, é o tipo de FMEA mais utilizado por especialistas de manutenção. Smith e Hinchcliffe (2004) complementam que o FMEA de processo tem a intenção de identificar os modos de falhas, suas causas e, finalmente, os efeitos ocasionados por essas falhas durante o funcionamento de um equipamento. Tradicionalmente, uma característica essencial

dessa modalidade de FMEA é a de obter o entendimento das falhas inerentes ao processo, buscando garantir a qualidade de funcionamento do equipamento, bem como do produto final que deve ser entregue.

- **FMEA de Sistema:** Essa modalidade é a menos comum do FMEA. Busca identificar as falhas potenciais e gargalos em um processo global, como uma linha de produção inteira.

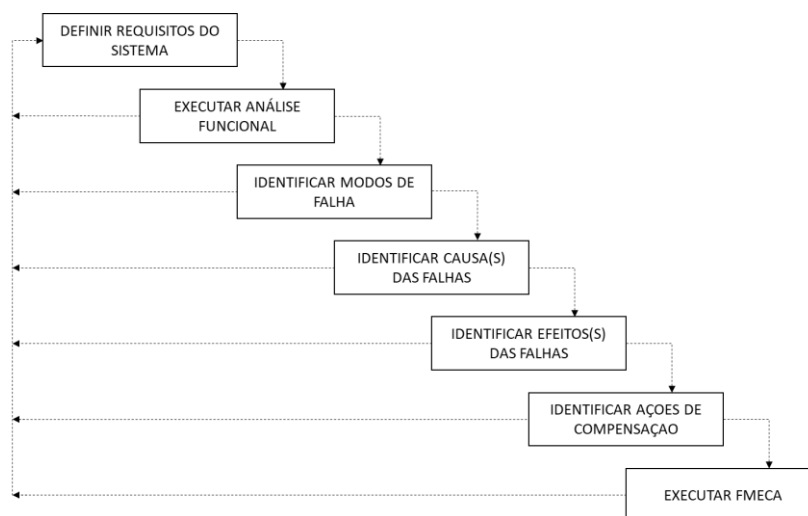
A avaliação de risco, seja do projeto, processo ou sistema, é importante para a discussão do propósito de aplicação do FMEA. Desse modo, cada tipo de FMEA deve garantir que seja prestado atenção em todos os componentes do produto ou conjunto em estudo, dando prioridade aos aspectos de segurança de cada um dos componentes. Assim, um aspecto importante para a boa execução da metodologia é a pontualidade, ou seja, a aplicabilidade dessa análise deve ser realizada “antes do evento”, não depois que ocorrem os problemas, para então ser possível eliminar ou amenizar riscos (AIAG, 2008).

Nesse trabalho será aplicado o FMEA de processo, pois estará sob análise uma máquina que está em operação e já tem um histórico considerável de falhas, por isso a análise de processo será melhor detalhada a seguir.

2.3.3 Aplicação do FMEA

Para se aplicar a ferramenta de análise dos modos e efeitos de falhas corretamente, Lafraia (2001) estabelece algumas condições que devem ser contempladas na elaboração do estudo, para então sim realizar o FMEA, como observa-se na Figura 1:

Figura 1. Condições para aplicação do FMEA.



Fonte: Adaptado de Lafraia (2001).

A aplicação do FMEA é dividida em quatro etapas, como aponta Rozenfeld *et al.* (2006) e, também, Sant'Anna e Junior (2010):

Etapa 1: Planejamento

A fase de planejamento é realizada pelos responsáveis pela aplicação da metodologia e compreende a descrição de objetivos, contemplando o produto ou processo que será analisado. Para isso, é formado o grupo de aplicação, o qual recomenda-se que seja pequeno e multidisciplinar, com pessoas de várias áreas. Por conseguinte, são agendadas reuniões com antecedência para se iniciar a análise, sendo essencial a participação de todos os envolvidos

Etapa 2: Análise de Falhas em Potencial

Nessa fase, a equipe de aplicação do FMEA põe em prática a metodologia, definindo as funções e características do objeto em estudo, os tipos de falhas potenciais para cada componente, assim como os efeitos e as possíveis causas dessas falhas, para assim realizar o controle dessas ocorrências.

Etapa 3: Avaliação dos Riscos

Após a análise das falhas e definição das causas fundamentais, ocorre a avaliação de riscos de cada uma, a partir de critérios que devem ser definidos previamente, de acordo com os índices que servem para mensurar os riscos, os quais são: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) de falha. Cada um desses critérios responde a escalas de pontuação que vão de 1 a 10 e, após isso, pode-se calcular um coeficiente de Prioridade de Risco (RPN), para cada um dos componentes estudados de forma individual (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011)

Etapa 4: Melhoria

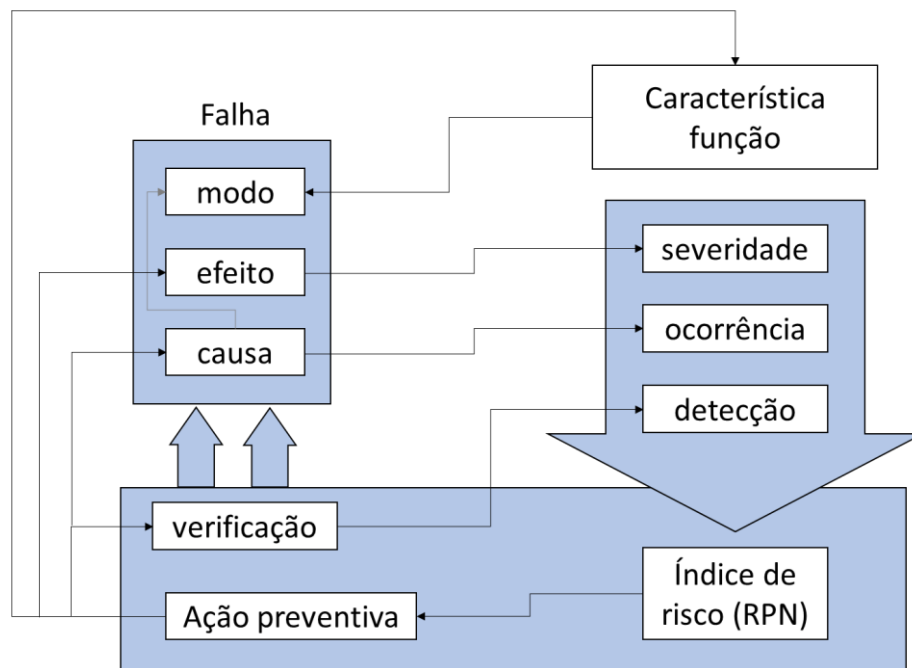
As ações para diminuir os riscos são listadas nesta etapa, a partir do estudo gerado e o conhecimento e criatividade dos envolvidos. Tais medidas podem ser de prevenção total da falha ou, ainda, englobar medidas que dificultam a ocorrência de falhas, limitem os efeitos e aumentem a probabilidade de detecção da causa de falha. Todas essas ações devem ser viáveis, para, então, serem implantadas.

2.3.4 Formulário para Aplicação

O formulário ou planilha do FMEA é um documento no qual se realiza a análise das falhas, tendo uma característica dinâmica, ou seja, que pode mudar sempre que necessário a partir de revisões feitas sempre que ocorrerem alterações no processo em estudo. Ainda assim,

mesmo que não ocorram alterações, deve-se revisar a análise regularmente, colocando em comparação as falhas potenciais levantadas na planilha com as falhas que, realmente, ocorrem no equipamento no dia a dia do processo. Nesse sentido, o produto/processo em questão, suas funções, tipos de falhas, efeitos e causas são estudados pelo grupo de desenvolvimento formado e, em seguida, são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio de índices e, com base nisso, são tomadas as ações necessárias para diminuí-los (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Figura 2. Visão estrutural das informações do FMEA.



Fonte: Adaptado de Rozenfeld *et al.* (2006)

Engeteles (2017a) separa a estrutura da planilha do FMEA em 5 partes: cabeçalho, ponto da falha, análise da falha, avaliação do risco e ação preventiva recomendada.

Figura 3. Exemplo de planilha FMEA.

Ponto da Falha		Análise da Falha			Avaliação de Risco				Ação Preventiva Recomendada	
Equipamento	Função do Equipamento	Componente	Modos de Falha	Efeitos de Falha	Causa da Falha	Ocorrência	Severidade	Detecção		RPN
Redutor de Velocidades Flender TAG.FEDU-63021	Reduzir a velocidade de acionamento do Elevador de Canecas - TAG.ELEV-62145	Engrenamento	Choque de Flancos (Vibração Excessiva)	Desarme do Motor Elétrico (Para o Processo)	Falta de Ajuste de Backlash	8	9	3	216	Inspeccionar folga das engrenagens a cada 6 meses.
			Elevação nos níveis de bronze no laudo de análise de óleo	Diâmetros ou rolamentos e demais componentes	Desalinhamento do eixo principal	7	5	8	280	Fazer análise de óleo a cada 3 meses.
		Rolamentos	Vibração/Temperatura Excessivas	Desarme do Motor Elétrico (Para o Processo)	Desalinhamento do conjunto motor/reductor	9	8	4	288	Fazer análise de vibração mensalmente.
			Elevação nos níveis de bronze no laudo de análise de óleo	Desarme do Motor Elétrico (Para o Processo)	Falta de lubrificação nos rolamentos	8	8	5	320	Lubrificar rolamentos a cada 320 horas. Fazer análise de vibração mensalmente.
Redutor de Velocidades Flender TAG.FEDU-63021	Reduzir a velocidade de acionamento do Elevador de Canecas - TAG.ELEV-62145	Retentor de Entrada	Vazamento	Contaminação / Perda de Lubrifi	Falha na montagem	9	6	5	270	Treinamento Técnico sobre montagem e manutenção de redutores Flender.
						9	5	4	180	Treinamento Técnico sobre alinhamento de conjuntos rotativos.

Fonte: Engeteles (2017a).

Cabeçalho

Primeiramente, **o cabeçalho** deve identificar claramente o foco do FMEA, assim como as informações relacionadas ao processo, como um número FMEA, para documentar o estudo, identificação dos responsáveis, data de conclusão, sendo essas informações de caráter particular de cada empresa (AIAG, 2008).

Ponto de Falha

Após o cabeçalho, há as colunas da planilha, nas quais, em primeiro lugar, desdobra-se **os itens** em estudo e suas respectivas **funções**, talvez sendo necessárias três colunas para se encaixar essas informações. Essas informações devem ser concisas e objetivas, para rápido entendimento, sendo muito importante que todas as lacunas sejam preenchidas antes de dar sequência ao estudo. Assim, a visualização das etapas se torna dinâmica, permitindo à equipe de desenvolvimento enxergar as possíveis interfaces (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Análise da Falha

Para Engeteles (2017a), o processo de análise da falha pode subdividir-se em três pontos: modo, efeito e causa da falha. Aqui, as informações são preenchidas com bastante análise, destrinchando ponto a ponto da falha.

Avaliação do Risco

Aqui, Engeteles (2017a) explicita que acontece a quantificação dos riscos, de acordo com os índices de avaliação: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detecção (D) de falha, os quais são melhor explicados por Fogliatto e Ribeiro (2011) a seguir:

2.3.4.1 Ocorrência (O)

Medição da probabilidade de ocorrência de que uma causa específica de falha ocorra. O número de classificação de ocorrência é relativo e pode não refletir a real probabilidade de ocorrência da falha, dessa forma, se for possível, é recomendado utilizar dados estatísticos do processo em questão ou de algum semelhante, para ser assertivo na definição da escala de ocorrência. De outra forma, a avaliação subjetiva pode ser realizada a partir dos conhecimentos da equipe de trabalho referente ao processo (AIAG, 2008). Na Tabela 1, pode-se ver uma escala para determinação do nível de ocorrências.

Tabela 1. Escala para avaliação das ocorrências

Probabilidade de Falha	Taxas de falha possíveis	Índice de Ocorrência
Remota: Falha é improvável	Chance Remota de Falha	1
Baixa: Relativamente poucas falhas	Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos	2
	Pouco Frequente: 1 vez a cada 2 anos	3
Moderada: Falhas ocasionais	Frequência baixa: 1 vez por ano	4
	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5
	Frequência moderada: 1 vez por mês	6
Alta: Falhas frequentes	Frequente: 1 vez por semana	7
	Frequência elevada: algumas vezes por semana	8
Muito Alta: Falhas Persistentes	Frequência muito elevada: 1 vez ao dia	9
	Frequência máxima: várias vezes ao dia	10

Fonte: Adaptado de Engeteles (2017a).

2.3.4.2 Severidade (S)

A severidade pode ser explicada quanto ao impacto que o efeito do modo potencial de falha tem sobre a operação do equipamento, considerando o cenário mais crítico de consequência da falha. A equipe de FMEA estabelece critérios de avaliação para mensurar esse índice, os quais devem estar classificados de acordo com o nível de criticidade. A escala de níveis de severidade vai de 1 a 10, sendo recomendado que itens com severidade nível 1 não sejam analisados mais profundamente, por não impactarem significativamente (AIAG, 2008).

Em outras palavras, a severidade determina a gravidade do efeito da falha em um componente do equipamento, sendo atribuído um valor considerando o efeito para o cliente final, como o não cumprimento do orçado de produção no setor em que a máquina está instalada (PEREIRA, 2011). A Tabela 2 apresenta uma escala do índice de severidade:

Tabela 2. Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falhas (severidade)

Severidade	Efeito da Severidade	Índice de Severidade
Nenhum	Sem efeito identificado.	1
Muito menor	Itens de Ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não-conformes. Defeito evidenciado por clientes acurados (menos que 25%).	2
Menor	Itens de ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não-conformes. Defeito evidenciado por 50% dos clientes.	3
Muito baixo	Itens de Ajuste, Acabamento/Chiado e Barulho não-conformes. Defeito notado pela maioria dos clientes (mais que 75%).	4
Baixo	Equipamento operável, mas item(s) de Conforto/Conveniência operável(is) com níveis de desempenho reduzidos.	5
Moderado	Equipamento operável, mas item(s) de Conforto/Conveniência inoperável(is). Cliente insatisfeito.	6
Alto	Equipamento inoperável, mas com níveis de desempenho reduzido. Cliente muito insatisfeito.	7
Muito alto	Equipamento inoperável (perda das funções primárias).	8
Perigoso com aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento com aviso prévio.	9
Perigoso sem aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento sem aviso prévio.	10

Fonte: Adaptado de Engeteles (2017a).

2.3.4.3 Detecção (D)

Esse índice se caracteriza por detectar causas ou modos potenciais de falhas, utilizando ferramentas de controle (vida útil do equipamento, projeção de falhas, entre outros), assumindo que o modo de falha analisado já tenha acontecido, pelo menos uma vez, anteriormente. Então, alguma amostragem ou histórico do evento deve haver para aumentar a capacidade de detecção (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Não necessariamente o índice de detecção será baixo caso o número de ocorrências seja baixo, por isso é essencial avaliar os métodos de controle de detecção regularmente utilizados quanto a sua capacidade em detectar os modos de falha de baixa frequência (AIAG, 2008).

Engeteles (2017a) define, ainda, três tipos de inspeção para detecção de falhas, sendo:

- A – Prova de erro;
- B – Medição;
- C – Inspeção Manual/Visual.

Um exemplo de escala para determinação do índice de detecção é visto na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3. Escala para avaliação da detecção em processos

Detecção	Critério	Tipos de Inspeção			Faixas Sugeridas dos Métodos de Detecção	Índice de Detecção
		A	B	C		
Quase impossível	Certeza absoluta da não detecção.			x	Não pode detectar ou não é verificado.	10
Muito remota	Controles provavelmente não irão detectar.			x	Controle é alcançado somente com verificação aleatória ou indireta.	9
Remota	Controles têm pouca chance de detecção.			x	Controle é alcançado somente com inspeção visual.	8
Muito Baixa	Controles têm pouca chance de detecção.			x	Controle é alcançado somente com dupla inspeção visual.	7
Baixa	Controles podem detectar.		x	x	Controle é alcançado com métodos gráficos, tais como CEP (Controle Estatístico do Processo).	6
Moderada	Controles podem detectar.		x		Controle é baseado em medições por variáveis depois que as peças deixam a estação, ou em medições do tipo passa/não-passa feitas em 100% das peças depois que deixam a estação.	5

Tabela 3. Escala para avaliação da detecção em processos

Moderadamente alta	Controles têm boas chances para detectar.	x	x	Detecção de erros em operações subseqüentes, OU medições feitas na preparação de máquina e na verificação da primeira peça (somente para casos de preparação de máquina).	4
Alta	Controles têm boas chances para detectar.	x	x	Detecção de erros na estação, ou em operações subseqüentes por múltiplos níveis de aceitação: fornecer, selecionar, instalar, verificar. Não pode aceitar peça discrepante.	3
Muito alta	Controles quase certamente detectarão.	x	x	Detecção de erros na estação (medição automática com dispositivo de parada automática). Não pode passar peça discrepante.	2
Quase certamente	Controles certamente detectarão.	x		Peças discrepantes não podem ser feitas porque o item foi feito a prova de erros pelo projeto do processo/produto.	1

Fonte: Adaptado de Engeteles (2017a).

2.3.4.4 Risk Priority Number (RPN)

Pereira (2011) e Fogliatto e Ribeiro (2011) definem o *Risk Priority Number*, ou Número de Prioridade de Risco, como um fator obtido através da multiplicação dos outros índices explicitados:

$$RPN = \text{Índice de Severidade (S)} \times \text{Índice de Ocorrência (O)} \times \text{Índice de Detecção (D)}$$

O resultado do RPN serve para hierarquizar as falhas, fazendo uma escala de criticidade, na qual tem-se duas formas de análise, segundo Pereira (2011):

- 1 – Uma falha pode ocorrer frequentemente, mas ter pequeno impacto e ser facilmente detectável, sendo assim considerada de “**baixo risco**” (**menor RPN**); ou
- 2 – Uma falha que tenha baixíssima probabilidade de ocorrência, mas pode ser extremamente grave, merecendo grande atenção e sendo considerada de “**alto risco**” (**maior RPN**).

Ademais, Engeteles (2017a) recomenda que, em caso de valores iguais de RPN para dois componentes diferentes, o primeiro critério para determinação da prioridade é escolher o índice de severidade mais alto.

2.3.4.5 Ações Preventivas Recomendadas

De modo mais geral, é preferível recorrer às ações preventivas ao invés de detectivas, com o objetivo de reduzir os índices listados na seguinte ordem de prioridade: severidade, ocorrência e detecção. Assim, para se cumprir esse objetivo, algumas abordagens são recomendadas abaixo por AIAG (2008):

- **Para reduzir Severidade (S):** Uma revisão completa do projeto ou processo é necessária para se reduzir a severidade, sendo necessário, talvez, até um *redesign* do estudo. Se feito isso, a equipe de trabalho deve analisar a funcionalidade da aplicação, para obter maior eficácia possível da abordagem realizada.
- **Para reduzir Ocorrência (O):** Pode ser efetuado removendo ou controlando uma ou mais das causas dos modos de falha, através de revisão do projeto/processo. Além disso, estudos estatísticos para analisar as fontes de variação no processo também podem ser eficazes, assim como o controle adequado das falhas a partir do estudo FMEA realizado, com aplicação de *feedback* de informações e aplicação de melhorias contínuas.
- **Para melhorar Detecção (D):** A prática mais comum é a de melhorar os controles de detecção, o que requer conhecimento profundo das causas dominantes das variações ocorridas no processo. Simplesmente aumentar a frequência de inspeções não é uma abordagem eficaz, mas pode ser utilizada como solução temporária para coletar informações adicionais sobre o processo, para então se propor ações preventivas ou corretivas adequadas e que sejam permanentes.

Os tipos de ações e estratégias de manutenção serão melhor explicados no tópico 3.5, sobre a metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade.

2.4 AS CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS

São apresentadas por Xenos (1998) algumas causas de falhas - de máquinas e sistemas - mais comuns em um grande número de empresas, das quais pode-se citar: lubrificação inadequada, operação incorreta, condições desfavoráveis de operação e folgas.

- **Lubrificação Inadequada**

A lubrificação consiste na redução de atrito entre duas superfícies em contato e movendo-se entre si, diminuindo os esforços necessários e, conseqüentemente, o desgaste prematuro de peças e componentes mecânicos. Dentro do contexto industrial, a atividade de lubrificação tem característica preventiva, ou seja, é prejudicial que se tenha um sistema no qual o maquinário opere sujeito a falha ou defeito relacionados ao sistema de lubrificação (PEREIRA, 2011).

Assim, percebe-se que lubrificação é uma das atividades mais importantes da manutenção preventiva. Portanto, é essencial que se tenha um controle adequado dessa atividade no dia-a-dia, para evitar falhas nesse sistema. A ocorrência de falhas no sistema de lubrificação (como quebra de eixos e rolamentos) é uma situação inadmissível, sendo responsabilidade dos operadores e executantes da manutenção o cumprimento de uma rotina de lubrificação, para checar se o lubrificante está chegando nos vários pontos do equipamento (XENOS, 1998).

Por isso, Mobley *et al.* (2008) indica que um programa de lubrificação adequado é aquele que é projetado para colocar a **quantidade certa** do **lubrificante certo** no **lugar certo** e na **hora certa**, o que reduz o tempo de inatividade do equipamento – visto paradas não programadas para correção -, custos de manutenção e de energia de trabalho gasta. Então, um programa de lubrificação deve ser implantado, sendo a gerência responsável por organizar a pesquisa em cada peça do equipamento no qual se quer implantar o plano, levantando informações de projeto com o fabricante, como: condições da máquina, velocidade, carga operacional, condições operacionais (contaminantes e temperatura de trabalho). Todo esse levantamento definirá a estratégia de manutenção do sistema de lubrificação e condições de análise.

- **Operação Incorreta**

Existem procedimentos operacionais padrão descritos nos manuais de operação dos equipamentos, manuais as quais os operadores devem estar bem familiarizados, aos modos que garanta a correta operação dos equipamentos no dia-a-dia. Apesar dos operadores certamente

já ter passado por todos treinamentos necessários para entender o mecanismo e funções dos equipamentos, os supervisores têm a obrigação de verificar periodicamente se os procedimentos estão em conformidade. É normal encontrar erro em operação, como procedimentos de acionamento e desligamento, além de equipamentos operados em velocidade ou sequência incorreta. Neste caso o supervisor tem por dever de instruí-los a forma correta e a importância de seguir o procedimento padrão e deixando claro a importância do relato de falha para se possa buscar as causas fundamentais e através disso evitar a reincidência das falhas.

- **Sujeira e Condições Ambientais Desfavoráveis**

Quando se há presença de poeira, lixo ou resíduos nos equipamentos pode acarretar prejudicar o funcionamento e provocar falhas, além de afetar a qualidade do produto. Devido a presença de sujeira no ambiente podem surgir atrito entre partes móveis dos sistemas. Uma importante medida cautelar é a vedação de salas elétricas, almoxarifados e centrais hidráulicas aos modos que inibe o acúmulo de poeira nesses locais onde se encontra equipamentos e peças de reposição, o fato é que normalmente essas medidas de prevenção não são executadas. O grande problema é que a sujeira/poeiras pode esconder os sinais de falha, tornando mais difícil sua detecção. O fator importante a ser mencionado que aceleram a degradação dos materiais é o excesso de temperatura, umidade e/ou radiação, sendo primordial o controle das condições ambientais nos compartimentos destinado a estocagem desses materiais.

- **Folgas**

Com objetivo de evitar falhas, as folgas devem permanecer dentro dos limites aceitáveis entre as partes dos equipamentos, tais parte pode estar ligadas por elementos de fixação como soldas, rebites ou parafusos. Em decorrência do excesso de vibração, torque insuficiente ou impacto estas partes podem ser soltar. Para que isso não ocorram existem algumas medidas preventivas para sanar esses problemas, como o monitoramento das vibrações ou oscilações entre outras. Além de falha em sistema mecânico, podem existir falhas em circuito elétrico, onde por sua vez causa sobreaquecimento e degradação dos materiais isolantes, tornando um perigo para todo ativo.

2.4.1 Métodos de Análise de Causas Fundamentais

Todas os profissionais de manutenção de equipamentos devem ter capacidade de investigar as causas fundamentais de falhas em várias dimensões. Essa capacidade é adquirida por meio da observação no local da ocorrência de falha e do conhecimento dos mecanismos

atrelados ao equipamento (XENOS, 1998). Com isso, existem algumas técnicas para ajudar nessa análise, as quais serão explicitadas a seguir.

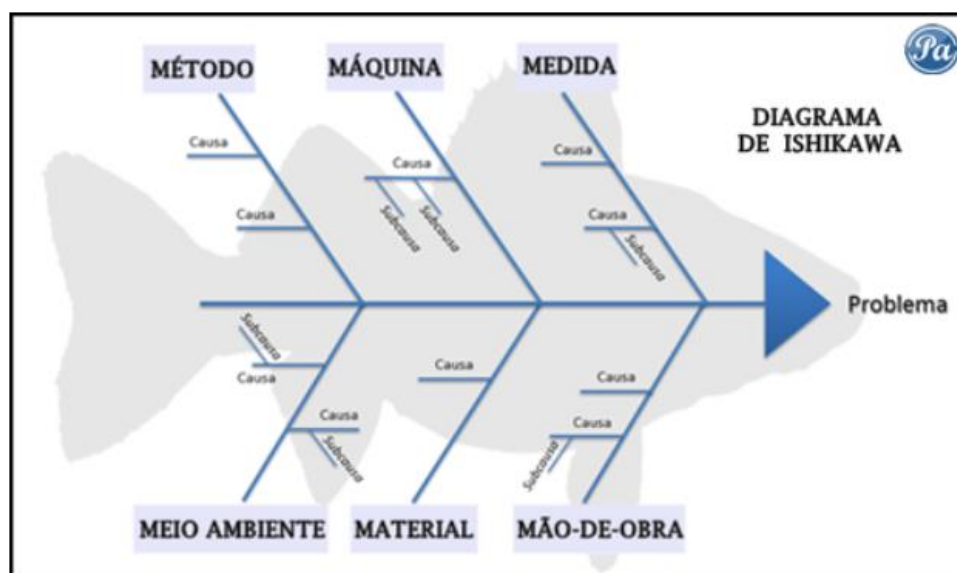
2.4.1.1 Diagrama Ishikawa

O diagrama de causa e efeito também é conhecido como diagrama de Ishikawa ou diagrama "espinha de peixe". O diagrama de causa e efeito subdivide as causas de um problema em seis grupos, também conhecidos como "6M": mão de obra, máquinas ou equipamentos, meio-ambiente (poluição, calor, poeira, entre outros), métodos de trabalho, medidas (instrumentos de medição e sua calibração) e material (SHIBA *et al.*, 1997).

“A análise de processo é a análise que esclarece a relação entre os fatores de causa no processo e os efeitos como qualidade, custo, produtividade, etc., quando se está engajado no controle de processo. O controle de processo tenta descobrir os fatores de causa que impedem o funcionamento suave dos processos. Ele procura assim a tecnologia que possa efetuar o controle preventivo. Qualidade, custo e produtividade são efeitos ou resultados deste controle de processo”. (ISHIKAWA, 1993).

De acordo com Almeida (2014) apud Juran e Godfrey (1999), o diagrama de causa e efeito ajuda a identificar a correlação entre as causas potenciais de um problema e pode ser aplicado na identificação de problemas de manufatura, sendo que sua utilização se estende praticamente a todo e qualquer processo.

Figura 4. Diagrama de Ishikawa e ilustração dos 6M.



Fonte: Bezerra (2014).

O diagrama de causa e efeito se configura como sendo uma ferramenta utilizada para apresentar a relação entre os efeitos de falha e todas as suas causas dentro de um processo (COSTA E MENDES, 2018). Para a execução do diagrama, devem ser seguidas as seguintes etapas:

1. O primeiro passo é definir o problema a ser estudado e o que se deseja obter.
2. Estudar e conhecer o processo envolvido através de observação, documentação, troca de ideias com pessoas envolvidas.
3. Fazer uma reunião com as pessoas envolvidas no processo e discutir o problema, é importante incentivar todos a exporem suas ideias, fazer um brainstorming.
4. Após coletar todas as informações, organizá-las em: causas principais, secundárias, terciárias, eliminando informações sem importância.
5. Montar o diagrama, e conferir com todos a representação da situação atual.
6. Marcar aquilo que é mais importante para obter o objetivo que se pretende alcançar.

2.4.1.2 Método dos 5 Porquês

Segundo Ohno (1997) O método dos “5 Porquês” teve sua origem na Toyota no Japão e foi proposto para apoiar a identificação da causa raiz de um problema por meio de cinco questionamentos consecutivos de sobre o porquê ocorrem determinados eventos.

De acordo com Costa e Mendes (2018) apud Weiss (2011), para análise dos 5 por quês, embora seja denominada assim, pode-se utilizar menos por quês (3 por exemplo), ou mais por quês, de acordo com a necessidade para que se encontre a causa raiz. Ele usa um conjunto específico de etapas, com instrumentos associados, para encontrar a causa primária do problema, de modo que é possível:

- Determinar o que aconteceu;
- Determinar por que isso aconteceu.
- Descobrir o que fazer para reduzir a probabilidade de que isso vai acontecer novamente

Costa e Mendes (2018) apud Weiss (2011), ainda descreve de forma simplificada os 5 passos que devem ser dados para aplicar o método:

1. Inicie a análise com a afirmação da situação que se deseja entender – ou seja, deve-se iniciar com o problema;
2. Pergunte por que a afirmação anterior é verdadeira.
3. Para a razão descrita que explica por que a afirmação anterior é verdadeira, pergunte por quê novamente;

4. Continue perguntando por quê até que não se possa mais perguntar mais por quês;
5. Ao cessar as respostas dos por quês significa que a causa raiz foi identificada

Figura 5. Exemplo de aplicação do método dos 5 porquês para um problema de lubrificação.

		1	2	3	4	5
Efeito	Problema	Por que?	Por que?	Por que?	Por que?	Por que?
PEÇA SENDO PRODUZIDA COM COTA DIVERGENTE DO DESENHO TÉCNICO	A PINÇA DO TORNO CNC NÃO ESTÁ PUXANDO A BARRA CORRETAMENTE	A PINÇA NÃO ESTÁ FECHANDO CORRETAMENTE	FALTA DE OLEO NO SISTEMA HIDRAULICO	O NÍVEL DE OLEO DO SISTEMA BAIXOU	NEM O OPERADOR NEM SETOR DE MANUTENÇÃO NÃO VERIFICARAM O NÍVEL DE OLEO DA MAQUINA	FALTA DE ROTINA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA MAQUINA
						CAUSA-RAIZ

Fonte: Engeteles (2017b).

2.5 MCC - MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

2.5.1 Definições

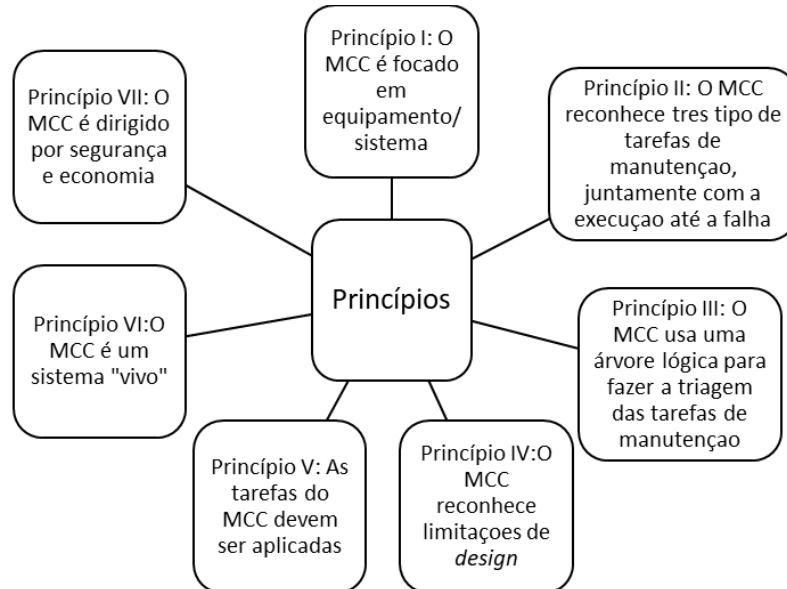
A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) ou *Reliability Centered Maintenance* (RCM), é uma metodologia que visa garantir que um equipamento, dentro de seu contexto operacional, se mantenha funcionando, com segurança qualidade, economia e desempenhando de forma a assegurar a produção esperada (PEREIRA, 2011). Em outras palavras, o MCC estabelece o que precisa ser feito para garantir que um ativo físico continue funcionando em sua capacidade normal dentro do contexto em que está inserido (MOUBRAY, 1997).

Nesse sentido, Fogliatto e Ribeiro (2011) definem o MCC como um método que garante a funcionalidade dos equipamentos na produção de uma planta fabril, com advento de diversas técnicas de engenharia de manutenção, das quais pode-se citar algumas demonstradas por Kardec e Nascif (2009) como: suporte técnico para padronização de ações, elaboração de estratégias de manutenção eficazes e implantação de melhorias contínuas. Além disso, reconhecem o programa MCC como a forma mais eficaz de elaborar planos de manutenção para as empresas, pois possibilitam que essas indústrias alcancem excelência na realização da manutenção, melhorando o tempo de operação dos equipamentos, e por conseguinte sua disponibilidade, além de reduzir os problemas com defeitos e reparos indesejados nas máquinas.

Pereira (2011) afirma que o MCC não substitui os métodos convencionais de manutenção (preventiva, preditiva, sensível, etc.), mas sim reduz a utilização desses métodos e faz a gestão deles, pois foca nos pontos mais críticos do equipamento, para, assim, reduzir a ocorrência de falhas e gerar planos para substituição de componentes. Assim, diminui-se a

necessidade de paradas para realização de manutenção preventiva, garantindo que o equipamento opere a custos mínimos.

Figura 6. Princípios do MCC.



Fonte: Adaptado de Dhillon (2006).

2.5.2 Indicadores de Confiabilidade

Os Indicadores são Ferramentas Básicas para o Gerenciamento do Sistema Organizacional e as informações que fornecem são essenciais para o processo de Tomada de Decisão.

2.5.2.1 MTBF (*Mean Time Between Failures*) – Tempo Médio entre Falhas

De acordo com Viana (2002) o MTBF, que em português significa Tempo Médio Entre Falhas, “é definido como a divisão da soma das horas disponíveis do equipamento para operação (HD), pelo número de intervenções corretivas neste equipamento no período.

$$MTBF = \frac{HD}{NC} \quad (1)$$

Viana (2002) esclarece que esse indicador consiste basicamente em medir o tempo entre uma falha e outra. Através do MTBF pode-se observar o comportamento dos ativos, perante das atuações mantenedoras. Se com o passar do tempo o valor do índice aumentou, isso indica que o número de intervenções corretivas vem diminuindo e, conseqüentemente, o total de horas disponíveis para a operação, aumentando.

2.5.2.2 MTTR (*Mean Time to Repair*) – *Tempo Médio de Reparo*

O Tempo Médio de Reparo é a divisão entre a soma das horas de manutenção pelo número de intervenções corretivas no período (VIANA, 2002).

$$MTTR = \frac{HM}{NC} \quad (2)$$

O MTTR é um indicador ao qual é muito usado para verificar a eficiência de trabalho de equipes de manutenção corretiva. Pode-se observar que quanto menor esse valor no passar do tempo, melhor o andamento da manutenção, pois evidenciam que os reparos corretivos, seja planejada e/ou não planejada estão causando menor impacto na produção e a manutenção sendo cada vez mais eficaz. (VIANA, 2002).

2.5.2.3 DF – *Disponibilidade Física*

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (ABNT-NBR-5462, 1994, p. 2).

A Disponibilidade Física pode ser compreendida de forma mais simples, como o quanto o ativo estava em condições de operação durante um intervalo de tempo determinado. Isto é, o tempo em que o item não estava em manutenção e podendo ser operado. A fórmula do cálculo da disponibilidade pode variar de acordo com a empresa e o setor produtivo. Uma das maneiras possível de calcular a disponibilidade é através da divisão do MTBF pela soma do MTTR mais o MTBF (VIANA, 2002).

$$DF = \frac{HC - HM}{HC} \quad DF = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

A DF para Viana (2002) é de suma importância, por se tratar do principal produto da manutenção. Além disso a Disponibilidade pode ser utilizada para identificar os equipamentos mais problemáticos, ou seja, aqueles que diminuem a DF da planta.

2.5.2.4 *Taxa de Falhas* (λ)

Segundo Kardec e Nascif (2009), a taxa de Falhas representa o número de falhas em um determinado período de tempo:

$$\lambda = \frac{\text{Número de falhas}}{\text{Horas de operação}} \rightarrow \lambda = \frac{Ni}{t} \rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (4)$$

Kardec e Nascif (2009) ainda demonstra outra forma de calcular a Taxa de Falhas, usado normalmente por fabricantes de componentes, considerando o número de unidades testadas e sendo multiplicado pelo número total de horas de teste. A equação (5) é a seguinte:

$$\lambda = \frac{\text{Número de falhas}}{(\text{unidades testadas}) \cdot (\text{número de horas de teste})} \quad (5)$$

2.5.2.5 Confiabilidade (R)

Confiabilidade “é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (ABNT- NBR-5462, 1994, p. 3).

De acordo com Filho (2000), confiabilidade representa a probabilidade de que um equipamento, célula de produção, planta ou qualquer sistema funcionar normalmente em condições de projeto dentro de um tempo predeterminado ou de que ainda esteja em condições de operações após um determinado período de funcionamento. É a capacidade de realizar o emprego específico nas condições e performances esperados em um determinado período de tempo.

A confiabilidade não é um número definido, ela é uma função do tempo. De acordo com Kardec e Nascif (2009), a confiabilidade de um equipamento ou produto pode ser expressa pela seguinte eq. (6), segundo a distribuição exponencial (taxas de falhas constante):

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (6)$$

Onde:

R = Reliability (Confiabilidade);

e = Base dos logaritmos neperianos ($e = 2,718$);

λ = Taxa de falhas;

t = Tempo para projeção.

2.5.3 Questões Básicas do Programa MCC

A norma SAE JA1011 (1999) aponta 7 questionamentos básicos para que o método MCC tenha garantia de sucesso na sua aplicação em um ativo, os quais são:

1. Quais as funções e padrões de desempenho esperados para o equipamento no contexto operacional?
2. De que maneira o equipamento falha em cumprir suas funções?
3. Qual a causa de cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. De que modo cada falha interessa?
6. O que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha?
7. O que deve ser feito quando não é possível realizar uma atividade proativa adequada?

O motivo para essas indagações será detalhado nos tópicos a seguir:

2.5.3.1 Funções e Padrões de Desempenho

Kardec e Nascif (2009) destacam que cada equipamento ou sistema apresenta uma função definida dentro do processo em que está inserido, sendo primordial que a performasse desse equipamento esteja de acordo com o que foi projetado. Então, para que se tenha garantia dessas características, os dados de desempenho do ativo precisam ser quantificados e gerados padrões em relação às variáveis de produção e/ou desempenho operacional, qualidade do produto, segurança e aspectos ligados ao meio ambiente.

Desse modo, definir as **funções e padrões de desempenho** é base primordial para a implantação do MCC. Devem ser mensurados, durante a vida útil do ativo, as funções que ele deve cumprir e o padrão de desempenho, com o conhecimento de suas funções primárias, que são àquilo que o equipamento deve realizar primordialmente, e secundárias, as quais são funções paralelas que devem ser mantidas para o cumprimento eficaz das primeiras. Geralmente, gerentes de produção e operadores são os maiores conhecedores do desempenho esperado de um ativo, incluindo suas funções primárias e secundárias (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

2.5.3.2 Existência de Falhas Funcionais

A norma SAE JA1011 (1999) determina que “todos os estados de falhas associados a cada função devem ser identificados”. Em conformação com isso, Mobley *et al.* (2008) questionam de que maneira o equipamento pode deixar de cumprir suas funções, para tal

questionamento existe um critério primordial: a identificação das falhas; se as funções forem bem definidas, identificar as falhas funcionais torna-se um processo, relativamente, fácil.

Como apontam Fogliatto e Ribeiro (2011), o MCC irá identificar como os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções e padrões de desempenho, com o apontamento dos eventos, ocorridos ou passíveis de ocorrer. Ademais, Kardec e Nascif (2009) esclarecem que, somente com a compreensão exata das falhas, pode-se estabelecer ações de manutenção - seja preventiva, preditiva ou detectiva, por exemplo - de acordo com a criticidade de cada tipo de evento.

2.5.3.3 *Modos de Falhas*

Mobley *et al.* (2008) explica que, na metodologia MCC, o termo modo de falha se refere à ocorrência que causa uma falha funcional, sendo que:

- Todos os modos de falha necessitam serem identificados;
- O método para determinar os modos de falha devem ser aceitos pelos proprietários ou operadores da máquina;
- É recomendado que se aplique uma gestão apropriada para esses modos de falha;
- Devem ser gerados históricos dos modos de falha antigos, registro dos quais estão sendo prevenidos pelo programa de manutenção em curso e dos quais ainda não ocorreram, mas tem potencial para ocorrer;
- O levantamento de todos esses modos de falhas deve apontar informações do evento como: o processo em que pode ocorrer falhas, deterioração do sistema, erro humano ou defeitos de projeto.

Ainda, o levantamento desses modos de falhas é feito em listas, obtendo as informações como apontadas nos tópicos acima. Essas listas visam chegar às causas que geraram os modos de falhas, com detalhamento que permita o tratamento das causas, evitando o desperdício de tempo e esforço ao tratar os sintomas (MOUBRAY, 1997).

2.5.3.4 *Efeitos de Falhas para o Ativo*

Os efeitos de falhas explanam o que pode acontecer caso não seja aplicada uma ação para antecipar, prevenir ou detectar a falha. Algumas informações devem ser incluídas para avaliar as consequências das falhas, como: as evidências do acontecimento da falha, se elas geram riscos de acidente ou degradação do meio ambiente, se afetam a produção ou operação,

qual o dano físico causado e o que deve ser feito para restaurar a função do equipamento após a falha (SAE JA1011, 1999).

Para reconhecer esses efeitos, os responsáveis pelo ativo podem sinalizar o que acontece quando a falha ocorre. Por exemplo, os operadores tem a visão em tempo real do ocorrido, o supervisor responsável tem a informação do tempo que o equipamento fica parado sem operar devido a falha e o engenheiro possui expertise para prever os danos que podem ser gerados a partir dessa falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

2.5.3.5 Consequências das Falhas para o Ativo

A análise das consequências das falhas permite nortear que tipos de ações tomar para prevenir cada falha, ou seja, se a consequência for muito significativa, será necessário um plano igualmente grande para resolvê-la, as quais demandam tempo e custos maiores, além de plano de manutenção mais elaborado; por outro lado, se forem consequências mínimas, as ações de rotina, como limpeza e lubrificação, já são o suficiente. Nesse sentido, as consequências são classificadas em quatro tipos diferentes (MOUBRAY, 1997):

- Consequências ocultas: são as que não tem impacto direto, pois são geralmente associadas a dispositivos de proteção, os quais são projetados para falhar antes do componente o qual protegem;
- Consequências de Segurança e Meio Ambiente: quando a falha gera risco de causar um acidente que possa machucar ou causar eventual morte de alguém. As consequências ambientais podem ser de qualquer caráter de violação ambiental;
- Consequências Operacionais: casos em que a produção ou desempenho da máquina é afetado, prejudicando desde o serviço prestado até a qualidade do produto;
- Consequências Não Operacionais: são as falhas que impactam somente no custo e tempo de reparo da máquina.

2.5.3.6 Ações Proativas

Existem dois grupos de critérios básicos para se propor as tarefas proativas que permitam prever ou impedir falhas: o primeiro é a seleção de políticas de gerenciamento das falhas e, o segundo, a criação de tarefas e intervalos agendados que incluem ações padrão.

No primeiro grupo, um dos critérios é realizar políticas de gerenciamento dos planos de manutenção. Nesse caso é assumido que, antes da ação proposta, nenhuma tarefa estava sendo executada, regularmente, para tratar as falhas, além de levar em conta se a probabilidade

condicional dos modos de falhas poderá, ou não, ser alterada conforme o tempo. Além disso, todas as tarefas propostas, que sejam tecnicamente viáveis para aplicação, devem ser documentadas, para que sejam padronizadas e aplicadas com regularidade (MOBLEY *et al.*, 2008).

De outro modo, há o segundo grupo de critérios, referente ao agendamento de tarefas. Aqui, busca-se a diminuição dos modos de falha à níveis toleráveis de risco (para meio ambiente, saúde e segurança), sendo que, em casos de que a falha não gere riscos, prioriza-se as tarefas a serem realizadas em relação aos custos diretos e indiretos de execução, os quais devem ser menores do que os custos gerados pelo modo de falha (MOBLEY *et al.*, 2008).

Nesse contexto, as ações proativas podem ser de caráter preventivo (atividade programada) ou de inspeção preditiva/sensitiva (realização de atividade de acordo com o estado do ativo). Para se propor que as atividades sejam preventivas ou detectivas, é muito importante que se tenha o envolvimento de profissionais de manutenção e operação do ativo, pois são quem possuem o conhecimento sobre as falhas e tempo de uso do equipamento (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

2.5.3.7 Ações Convencionais

Moubrey (1997) apresenta três categorias de ações convencionais:

- Detecção de falhas: verificação periódica do ativo para expor as falhas já ocorridas;
- *Redesign*: significa realizar alterações no sistema do ativo, como modificações de projeto e alterações de procedimento;
- Não programar manutenções: não realização de nenhuma ação para prevenir as falhas, podendo elas acontecerem e serem reparadas com manutenção corretiva.

Essas ações são de caráter reativo, as quais, como define Dhillon (2006), atuam em condições de degradação ou mesmo quebra de um item, que leva a uma falha funcional. A abordagem de 100% de manutenção reativa em um equipamento não é recomendada, pois isso acarreta em impactos no tempo de reparo, alto esforço para execução e custos elevados com peças e componentes para reposição. Porém, se for aplicada baseada em análises eficientes pelo programa MCC, comparando riscos de custos e falhas com os de manutenção, a proposta de manutenção reativa em alguns componentes será eficaz.

2.5.4 Passos para Implantação do MCC

As bibliografias que abordam o programa MCC apresentam as mais diversas formas para realizar a aplicação do método, porém todas tem o mesmo princípio no fim das contas, que é responder as sete questões básicas do programa, demonstradas na norma SAE JA1011 (1999). Aqui serão apresentados alguns fluxos estudados para se fundamentar o trabalho.

As sete questões básicas do programa MCC precisam ser respondidas com informações colhidas de algum lugar. Nesse caso, “algum lugar” pode ser, também, “alguém” que tenha conhecimento e experiência sobre o ativo físico no qual se quer implantar a metodologia. Porém, é impossível, ainda, que apenas uma pessoa, ou até mesmo um grupo, de apenas um departamento, consiga aplicar o MCC por si só, pois há uma gama de informações necessárias que precisam ser colhidas em vários setores, como operação, manutenção, engenharia, entre outros (MOUBRAY, 1997).

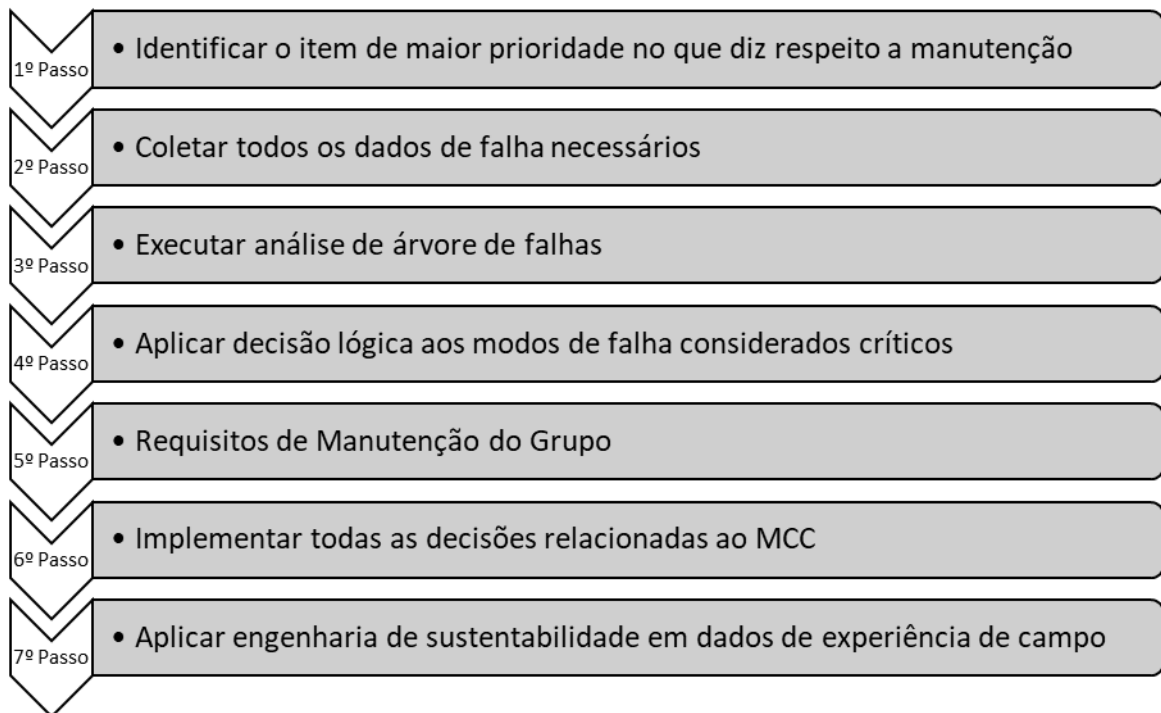
Figura 7. Estrutura típica de um grupo de MCC.



Fonte: Adaptado de Moubray (1997).

Em conformidade com isso, Dhillon (2006) elabora 7 passos para aplicação do MCC que podem garantir as respostas das questões básicas do programa, como observa-se na figura abaixo:

Figura 8. Passos do programa MCC.

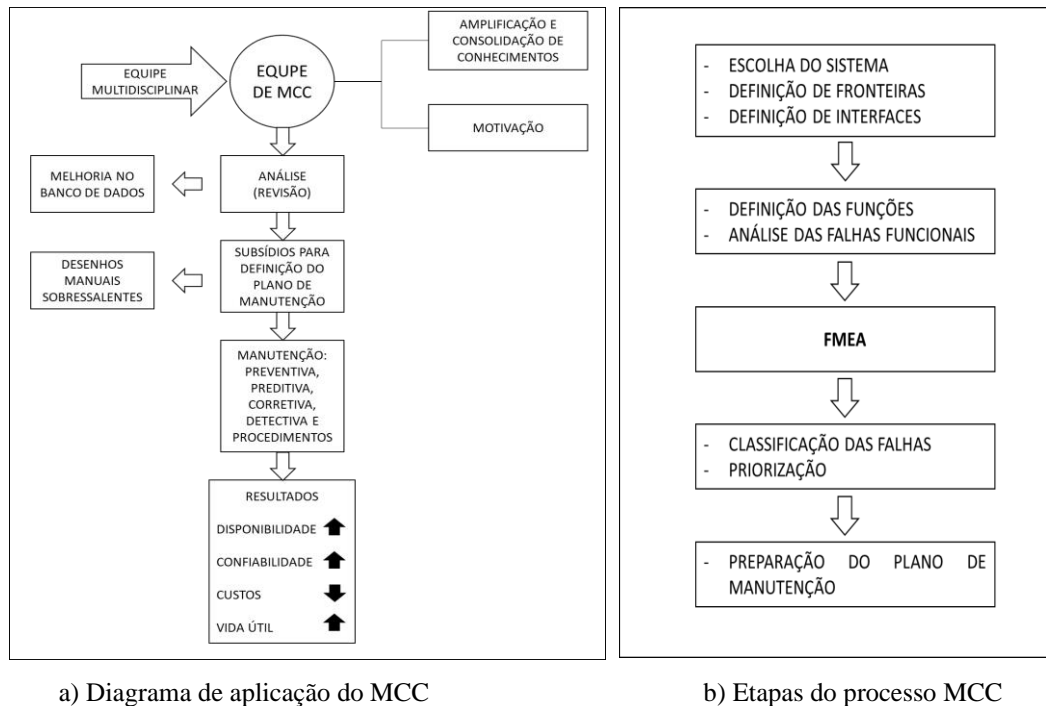


Fonte: Adaptado de Dhillon (2006).

- 1º Passo: Identificação dos itens de maior prioridade usando métodos como análise de modos e efeitos de falhas (FMEA) e Análise das causas raízes;
- 2º Passo: Coleta dos dados de falhas dos itens como taxa de falhas, probabilidade de erro do operador e eficiência da inspeção de fontes;
- 3º Passo: Cálculo de probabilidade de falhas dos itens, para definir eventos básicos, intermediários e principais;
- 4º Passo: Definir lógica de decisão das tarefas, a partir do envolvimento da equipe de trabalho, coletando informações acerca das atividades de manutenção preventiva desejáveis e a criticidade de cada modo de falha significativo;
- 5º Passo: Classificação dos requisitos de manutenção em 3 grupos: itens a serem monitorados (manutenção programada), manutenção após falha e manutenção sob condição;
- 6º Passo: Aprovação de frequências e intervalos de tarefas, como parte do plano de manutenção;
- 7º Passo: Reavaliação e monitoramento do plano de manutenção aplicado.

Semelhante a esse fluxo, Kardec e Nascif (2009) propõem alguns diagramas para ajudar nesse processo, como mostra a Figura 9:

Figura 9. Diagramas do MCC.



a) Diagrama de aplicação do MCC

b) Etapas do processo MCC

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

2.5.5 Determinação do Tipo de Atividade: Proativa x Reativa

É importante que o plano de manutenção proposto seja enxuto, com as tarefas mais importantes, ou seja, ações de revisão em pontos fundamentais para o bom funcionamento da máquina, deixando para segundo plano as tarefas em componentes de menor criticidade. Para isso, necessário que se tenham muitas informações do equipamento, que podem ser buscadas no histórico de manutenção, relatórios, banco de dados e conversas diretas com os responsáveis, das quais pode-se obter informações exclusivas e precisas sobre a condição de operação do ativo, bem como a necessidade de ações preventivas (PEREIRA, 2011).

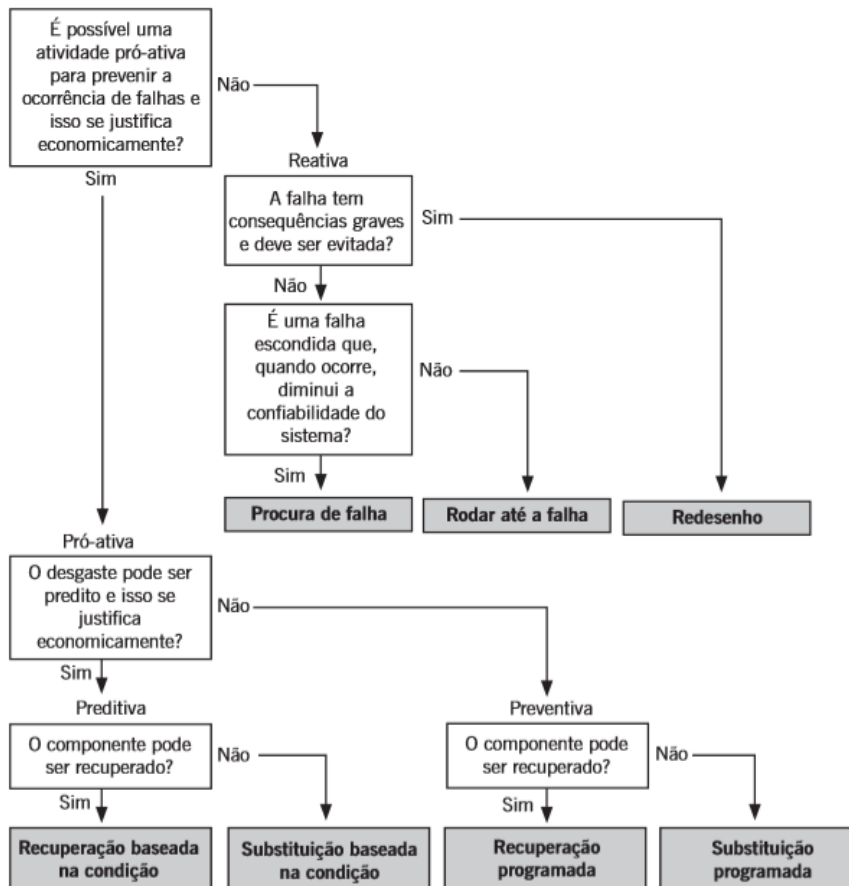
Dessa forma, Lafraia (2011) demonstra que, após a conclusão da Análise de Modos e Efeitos de Falhas, pode-se estabelecer um plano de manutenção baseado nos efeitos de falhas, com tarefas que sejam possíveis de aplicar e bom custo benefício, tarefas essas que podem ser:

- Detecção;
- Monitoramento;
- Restauração;
- Substituição;
- Inspeção;
- Reprojetos;

As ferramentas de gerência e controle, técnicas de planejamento, perfil dos empregados, índices de qualidade, entre outros, são alguns fatores essenciais para escolha da estratégia de manutenção. Além disso, aspectos como recomendações do fabricante do equipamento, segurança do trabalho e meio ambiente, as características de falha do equipamento e fatores econômicos, são levantados antes de se definir o plano de manutenção ideal para tratar as falhas (VIANA, 2002).

Nesse contexto, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que o programa MCC prioriza atividades proativas. Portanto a primeira abordagem deve ser a análise da possibilidade de antecipar falhas e, caso pertinente, elaborar atividades preditivas ou preventivas. Dessa forma, a prioridade seria a escolha de atividades preditivas, pois são as quais se baseiam nas condições do item, tendo a necessidade de conserto ou troca do componente apenas quando realmente necessário. Por outro lado, se a preditiva não for viável devido a alto custo ou impossibilidade de aplicação (em itens não inspecionáveis, por exemplo), deve-se utilizar a manutenção preventiva, com intervalos de reparo ou substituição de itens definidos por tempo de vida útil, os quais podem ser definidos pela distribuição de falhas do sistema em questão.

Figura 10. Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada.



Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011).

Fogliatto e Ribeiro (2011) deixam claro que é frequente que não se tenham dados para realizar uma distribuição de probabilidade dos tempos de falha, ou ainda que a medição do MTBF possa ser pouco precisa, o que são dois fatores levados em conta para determinação dos intervalos de atividades preventivas para recuperação ou substituição programada. Quando isso ocorre, pode ser mais eficiente propor técnicas preditivas, ao invés das preventivas, baseando a atividade nas condições do equipamento. Por outro lado, caso ações proativas (preventiva ou preditiva) não sejam viáveis, parte-se para a avaliação da consequência da falha e, caso não se tenha um índice alto de severidade, pode-se optar por tentar procurar a falha ou continuar operando até falhar. Se a consequência for severa e não seja possível prever a falha, então a única alternativa é refazer o projeto do sistema.

2.5.6 Documentação das Atividades Propostas

As atividades de manutenção propostas, sejam de caráter preditivo ou preventivo, devem ser dispostas em planilha, contendo informações sobre o sistema, subsistema, conjunto, componente, descrição da atividade detalhada, materiais necessários, ferramentas, periodicidade e responsáveis pelo planejamento e por aplicar a tarefa. Com essas informações, o profissional que executará a manutenção terá o discernimento das melhores ações a se tomar, para garantir a qualidade – e, conseqüentemente, a confiabilidade - do serviço (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011; VIANA, 2002)

Devido a isso, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que a implantação do MCC vai além da análise FMEA, pois estabelece atividades de manutenção pertinentes para o equipamento. Assim, é proposto um modelo de planilha para descrição da implantação do programa de Manutenção Centrada em Confiabilidade, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Planilha ampliada para condução do FMEA e detalhamento das atividades de manutenção

Núm.	Campo da Planilha	Pessoas em melhores condições para contribuir no preenchimento
1	Sistema	Engenheiros
2	Subsistema	Engenheiros
3	Conjunto	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
4	Componente	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
5	Função	Engenheiros

Tabela 4. Planilha ampliada para condução do FMEA e detalhamento das atividades de manutenção

6	Padrão de desempenho	Operadores, supervisores e gerentes de produção
7	Modo de falha	Operadores e técnicos de manutenção
8	Efeito: o que é observado	Operadores e técnicos de manutenção
9	Tempo médio de parada	Supervisor de produção
10	Danos pessoais/materiais/ambientais	Operadores, engenheiros e especialistas
11	Causa da falha	Operadores e técnicos de manutenção
12	O que pode ser feito para evitar a falha	Operadores e técnicos de manutenção
13	Classificação da consequência da falha: - Escondida (potencialmente crítica) - Segurança (crítica) - Ambiental (crítica) - Operacional (crítica) - Outra (não crítica)	Operadores, engenheiros e especialistas
14	Probabilidade de ocorrência	Operadores e técnicos de manutenção
15	Severidade	Operadores, engenheiros e especialistas
16	Probabilidade de detecção	Operadores e técnicos de manutenção
17	Risco	Engenheiros
18	Tarefa indicada: - Preditiva: recuperação baseada na condição - Preditiva: substituição baseada na condição - Preventiva: recuperação programada - Preventiva: substituição programada - Reativa: rodar até a falha - Reativa: procura de falha - Redesenho	Técnicos de manutenção
19	Detalhe da tarefa	Técnicos de manutenção
20	Responsável pela tarefa	Operadores e técnicos de manutenção

Tabela 4. Planilha ampliada para condução do FMEA e detalhamento das atividades de manutenção

21	Intervalo entre tarefas	Engenheiros e técnicos de manutenção
22	Probabilidade de ocorrência	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
23	Severidade	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
24	Probabilidade de detecção	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção
25	Risco	Engenheiros, operadores e técnicos de manutenção

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011).

A planilha acima apresenta duas condições de risco. No primeiro (campos 14 a 17), o preenchimento é baseado nas condições de manutenção geral em vigor, levantados na análise FMEA. O segundo preenchimento (campos 22 a 25) é realizado após a proposta de tarefa de manutenção baseada no estudo MCC, o qual busca a melhora dos índices de ocorrência e probabilidade de detecção com tarefas preditivas e preventivas, além da possível diminuição no índice severidade, o que só pode ser alcançado com o redesenho do projeto. Dessa forma, buscase conduzir o estudo para se alcançar um nível de risco considerado aceitável, dentro das condições possíveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PASSOS PARA APLICAÇÃO DO MCC NA RECUPERADORA DE MINÉRIO

A instigação para a realização desse trabalho foi a de propor tratativas para os recorrentes problemas ocorridos em uma recuperadora de minério tipo ponte, com base em relatos dos profissionais responsáveis pelo equipamento. O trabalho terá foco na melhoria da confiabilidade de operação da máquina, a qual está em funcionamento em uma indústria mineradora de ferro multinacional, com plantas em vários países, sendo o trabalho feito na planta de Carajás, no estado do Pará.

Figura 11. Recuperadora de Minério de roda de caçamba tipo ponte – RC-3011KN-01.

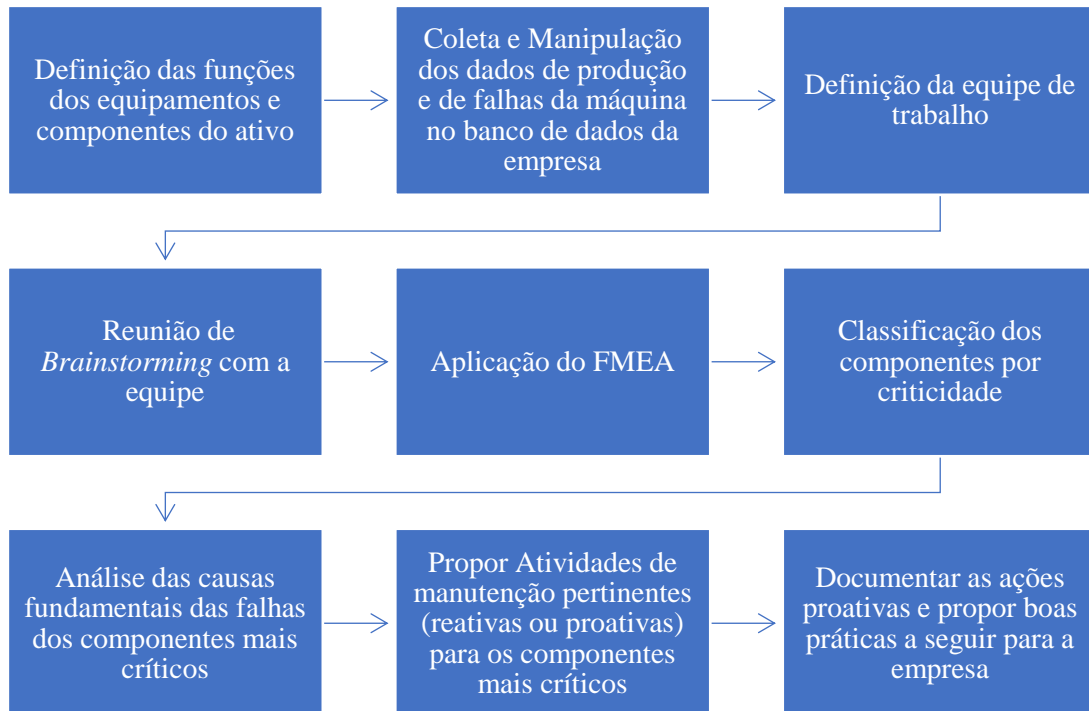


Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizados materiais de consulta, como relatórios e banco de dados, da própria empresa, realização de entrevistas e reuniões com responsáveis pelas etapas do processo de manutenção e operação do ativo, além do referencial teórico de livros, artigos e dissertações para auxiliar na análise e desenvolvimento do trabalho.

Sendo assim, a metodologia do MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) foi selecionada para cumprir os objetivos propostos. Baseando-se na bibliografia norteadora do trabalho, foram definidas as etapas mostradas no fluxograma abaixo para execução desse método:

Figura 12. Fluxograma de implantação do MCC na Recuperadora de Minério.



Fonte: Autoria Própria.

A abordagem realizada seguiu os passos acima para implantação eficaz do programa MCC, sempre buscando responder as 7 questões fundamentais previstas na norma SAE JA1011 (1999). Primeiro, foi fundamental definir as **funções e padrões de desempenho** dos componentes estudados, com isso pôde-se apontar as **falhas funcionais** de cada um. Logo após, com advento dos dados fornecidos pela empresa e com *braisntormings* e entrevistas com a equipe de trabalho definida, buscou-se a aplicação da ferramenta FMEA, **para análise dos modos e efeitos das falhas**. Por conseguinte, foram separados os componentes mais críticos para se buscar as causas raízes das quebras e propor ações, sejam **proativas ou reativas**, para então criar planos de manutenção que garantam a confiabilidade do ativo.

Para nortear o trabalho e ajudar na realização das etapas do programa MCC dentro de prazos e com agendamento das tarefas, foi criado um plano de ação no *software* Excel (Versão 2019), no qual inseriu-se todas as atividades realizadas e datas para cumpri-las. Na Figura 13, abaixo, é mostrada uma parte da planilha de plano de ação:

Figura 13. Parte do Plano de Ação utilizado para aplicação das atividades do MCC.

ID	Data	Responsável	Ação	Data Limite	Reprogramação	Data Realização	Status
1	09/12/2019	Pedro	Fazer reunião/brainstorming com envolvidos (manutenção, operação, inspeção e engenharia)	13/12/2019		17/12/2019	Executado
2	18/12/2019	Magson	Cobrar da Inspeção o envio dos relatórios referentes a máquina no ano de 2019	07/01/2020	14/01/2020	13/01/2020	Executado
3	06/01/2020	Pedro	Procurar documentos normativos da Empresa sobre PCM	07/01/2020		07/01/2020	Executado
13	07/01/2020	Pedro e Magson	Iniciar a aplicação do FMEA	14/01/2020		13/01/2020	Executado
16	13/01/2020	Pedro	Tirar dúvidas com Operação sobre os dados de produção da máquina	14/01/2020		13/01/2020	Executado
17	13/01/2020	Magson	Verificar na engenharia mais detalhes sobre as falhas da máquina	14/01/2020		13/01/2020	Executado
19	14/01/2020	Pedro e Magson	Realizar reunião de FMEA, envolvendo todo o time	24/01/2020		24/01/2020	Executado

Fonte: Autoria Própria

A empresa não terá o nome citado, mas disponibilizou todos os documentos necessários para realização do trabalho em cima do equipamento. A recuperadora de minério (RC) foco do estudo em questão localiza-se na Usina de beneficiamento de minério, no pátio de regularização do material, o qual funciona como um “pulmão” no processo. Ou seja, todo o material estocado nesse pátio começa a ser recuperado quando há paradas nas outras alimentações da linha de produção da Usina 2, fazendo com que não se perca muito em produção da planta.

3.2 DESCRIÇÃO DA RECUPERADORA DE MINÉRIO TIPO PONTE – RC-3011KN-01

3.2.1 Informações de Funcionamento da RC

A Recuperadora de minério em estudo (que possui a TAG RC-3011KN-01) é do tipo Ponte, com duas Rodas de Caçamba, projetada pelo grupo industrial alemão *ThyssenKrupp Fördertechnik*. Contém componentes projetados para serviço pesado, em regime de operação contínua durante 24 horas por dias, todos os dias do ano. A máquina opera a partir de qualquer uma das extremidades das pilhas do material a ser recuperado, avançando em passos pré determinados, em movimento longitudinal ao longo do caminho de rolamento, combinado com o movimento das rodas de caçambas, no sentido transversal à pilha.

Figura 14. Modelo de uma Recuperadora de Minério tipo Ponte projetada pela empresa ThyssenKrupp Fördertechnik.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

No processo de recuperação, duas rodas de caçamba, suportadas pelos carros Trolley, fazem movimentos giratórios de retomada do material, processo suportado pelos sistemas desmancha pilha, que são montados e articulados na parte inferior dos carros, em ambos os lados frontais da retomadora, assim fazendo com que o material da pilha se desagregue e escoe, de maneira controlada, para dentro das caçambas, direcionando o minério para o transportador transversal instalado ao longo da viga principal da máquina.

Tabela 5. Dados do material e da pilha

Parâmetro	Valor
Material	Minério de Ferro
Granulometria	<90 mm
Altura máxima da pilha	14,6 m
Capacidade máxima da pilha	435.000 T
Densidade	2.4 T/m ³
Ângulo de repouso	33° ~ 38°
Ângulo de acomodação	15° ~ 20°

Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 15. Pilha de minério estocada no pátio de regularização.



Fonte: Autoria Própria.

A máquina permite a operação em Modo Automático, Modo Manutenção, Modo Central (Cabine do Centro de Controle Operacional – CCO) e Operação Local, possuindo os seguintes movimentos:

- Acionamento do transportador da ponte;
- Acionamento das rodas de caçambas em operação;
- Acionamento das rodas de caçambas para reversão das caçambas;
- Translação da máquina para a frente a favor da pilha;
- Translação da máquina para a ré afastando da pilha;
- Translação do carro para a direita;
- Translação do carro para a esquerda;
- Acionamento do sistema de elevação/abaixamento dos ancinhos.

Tabela 6. Dados de projeto da Recuperadora de Minério RC-3011KN-01

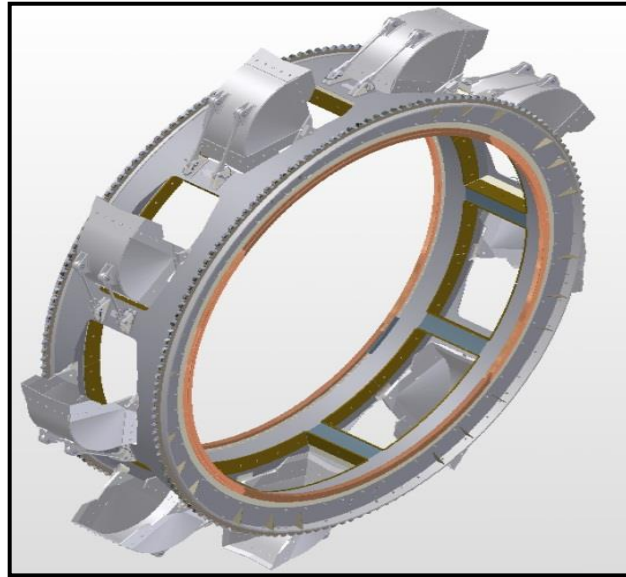
Recuperadora	
Parâmetro	Valor
Capacidade nominal	4.800 t/h
Capacidade de projeto	6.200 t/h
Passo de avanço máximo	115 mm
<u>Transportador de Correia da Ponte</u>	
Largura da correia	1.800 mm
Inclinação dos rolos laterais	45°
Velocidade da correia	3,3 m/s
Potência do acionamento	1 x 90 kW
<u>Rodas de Caçambas</u>	
Diâmetro da roda	10.500 mm
Número de rodas	2
Número de caçambas por roda	9
Volume das caçambas	1.600 L
Número de descargas / min	30
Rotação da roda de caçambas	3,33 rpm
Grau de enchimento da caçamba	70%
Potência do acionamento de cada roda	2 x 132 kW
Trilho de apoio da roda de caçambas	ACF-633 conf. desenho n°: DF-3011KN-M-532-M-377 / n° TKFLA 201.02_05.14.279_07
<u>Sistema de Translação</u>	
Velocidade em operação	6,5 m/min
Velocidade de posicionamento	6,5 à 24m/min
Número de rodas	26
Número de rodas acionadas	22
Potência do acionamento	22 x 7,5 kW
Trilho recomendado	CR-175
<u>Carros das Rodas</u>	
Curso de translação	19 m
Velocidade de translação	6 a 19 m/min
Potência do acionamento	1 x 55 kW
Trilho recomendado	A-120 DIN 536-ST60

Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

3.2.2 Roda de Caçamba

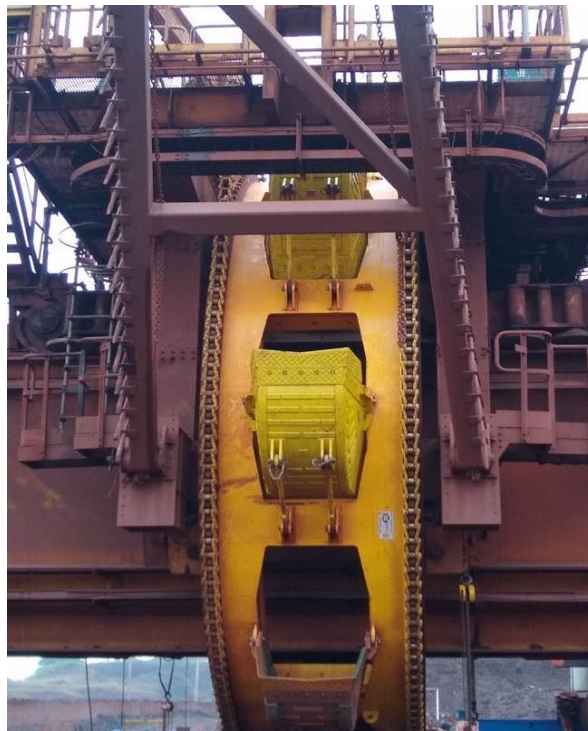
O conjunto da roda de caçamba através de movimento circular contínuo, é responsável pela recuperação do material, devido ser a parte do sistema (caçamba) que entra em contato com pilha estocada no pátio, e sendo guiado para o transportador de correia do equipamento.

Figura 16. Desenho 3D da Roda de Caçamba e Caçambas.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 17. Roda de Caçamba e Caçambas.



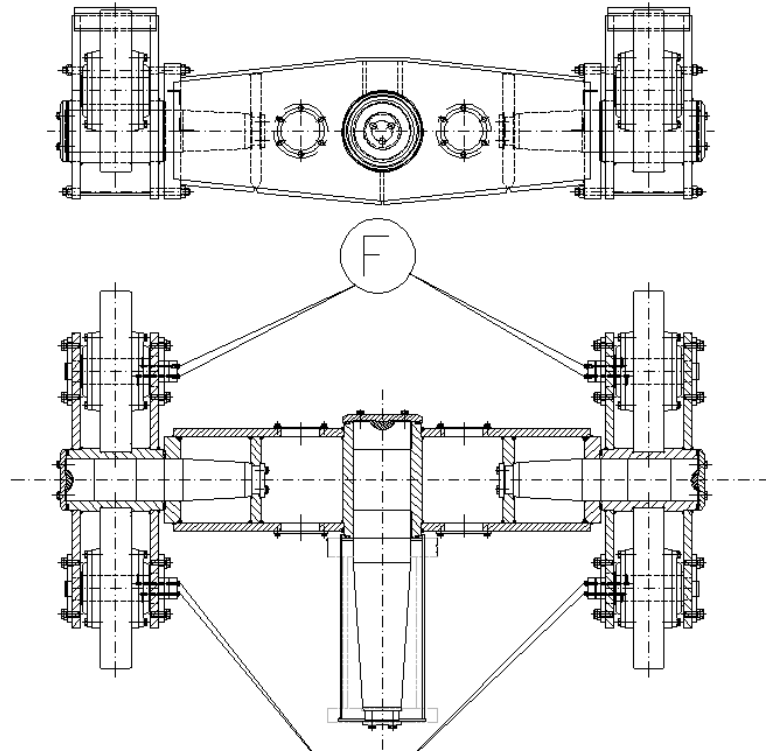
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7. Componentes e Funções da Roda de Caçamba

RODA DE CAÇAMBA	
COMPONENTE/SUBSISTEMA	FUNÇÃO
Roda de apoio	Apoiar a roda de caçamba e manter o contato alinhado com o trilho circular com o objetivo de facilitar o movimento de giro.
Roda de encosto	Mantem em contato com o trilho circular a fim de equalizar a roda de caçamba, ou seja, manter alinhada.
Estrutura radial interna	Acomodar a roda de apoio para que se possa fazer o movimento circular.
Trilho circular	Manter o contato com a roda de encosto, auxiliando no alinhamento da roda de caçamba e evitando o contato direto com a estrutura.
Caçamba	Acoplado a roda de caçamba é responsável pela recuperação do minério estocado.
Balancim	O balancim juntamente com o conjunto de rodas de apoio é responsável pela sustentação de toda estrutura da roda de caçamba

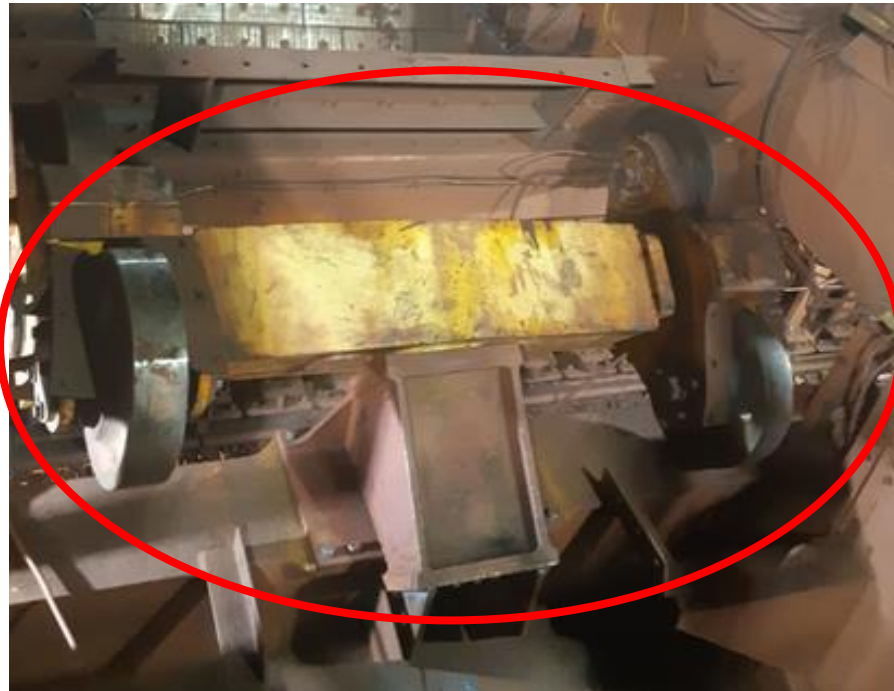
Fonte: Autoria Própria

Figura 18. Desenho técnico do Balancim.



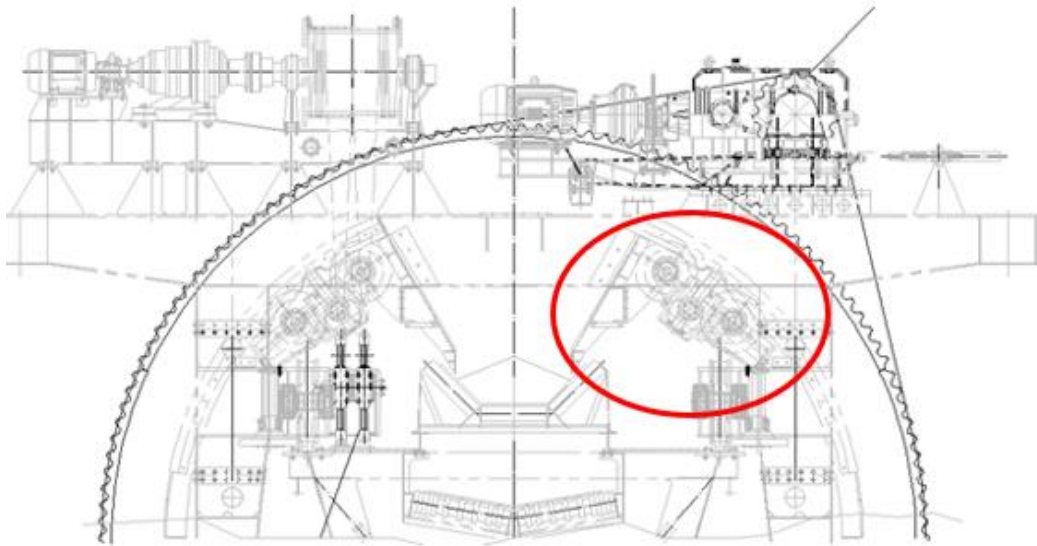
Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 19. Conjunto Balancim com Rodas de apoio.



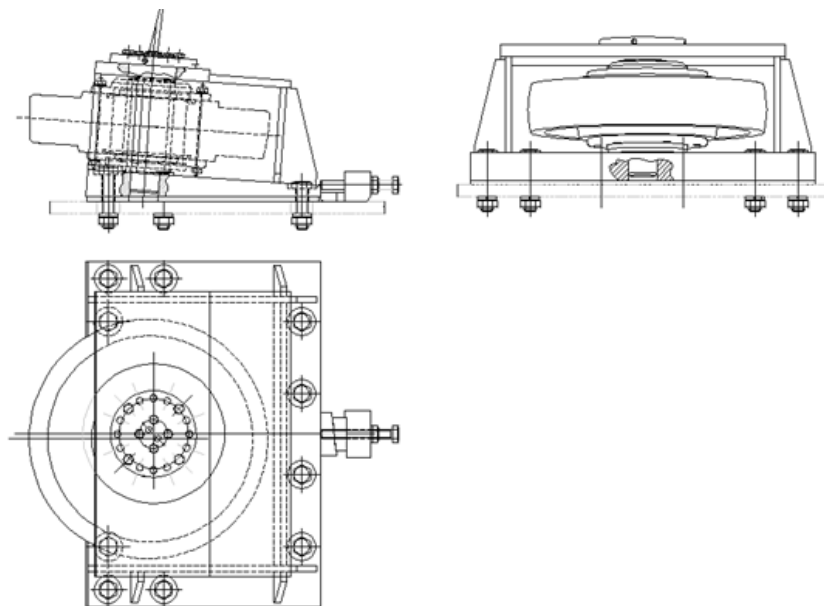
Fonte: Autoria Própria

Figura 20. Desenho do Balancim com Rodas de Apoio instalados.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 21. Desenho técnico das Rodas de Encosto.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

3.2.3 Chutes Circular e Central

O chute circular serve de apoio ao material recolhido pelas caçambas até que estas alcancem a elevação correta para, com a interrupção do chute circular, serem então descarregadas sobre o chute central da roda de caçambas, que transfere o material para o transportador de correia da ponte.

Figura 22. Chute circular instalado na Roda de Caçamba.



Fonte: Autorial Própria.

Figura 23. Chute circular confeccionado.



Fonte: Autorial Própria.

Tabela 8. Componentes e Funções dos Chutes circular e central

CHUTES CIRCULAR E CENTRAL	
COMPONENTE/SUBSISTEMA	FUNÇÃO
Estrutura	Fixado junto a estrutura carro trolley na região interna da roda de caçamba, com objetivo de guiar o material até a TR aos modos que evite a fuga de minério.
Revestimento	Chapas de desgastes que proteger a estrutura do chute, além atenuar o impacto e atrito com o minério.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.4 Acionamento e Transmissão da Roda de Caçamba

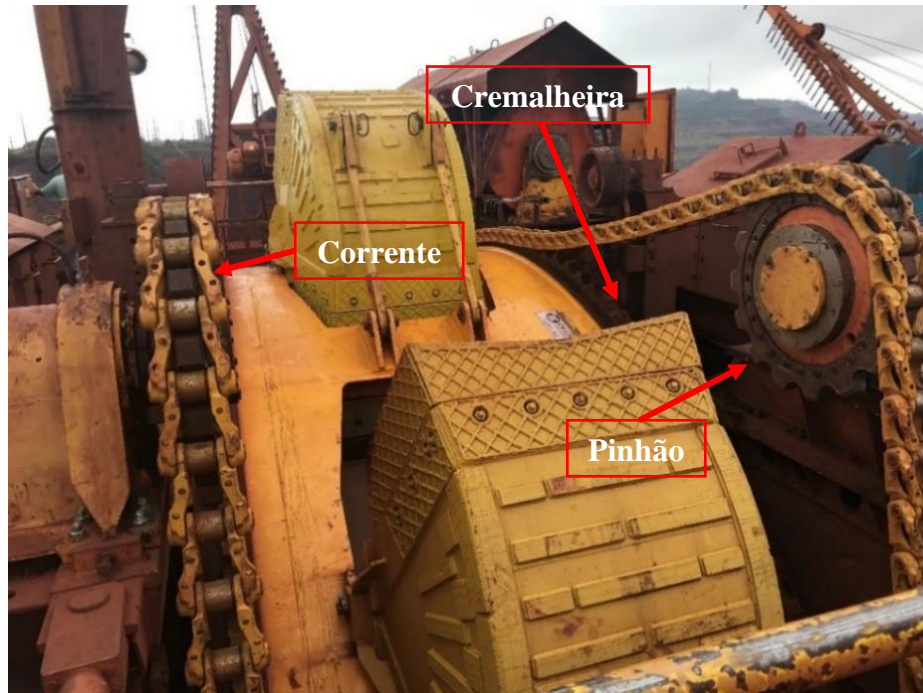
Sistema responsável pela força de tração e giro da roda de caçamba. Tal sistema de transmissão está formado por vários componentes, como motoredutor, acoplamento, corrente, pinhão motriz, entres outros.

Figura 24. Unidade de acionamento da roda de caçamba.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 25. Sistema de transmissão da Roda de Caçamba (pinhão, corrente e cremalheira).



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9. Componentes e Funções do Sistema de Acionamento e Transmissão da Roda de Caçamba

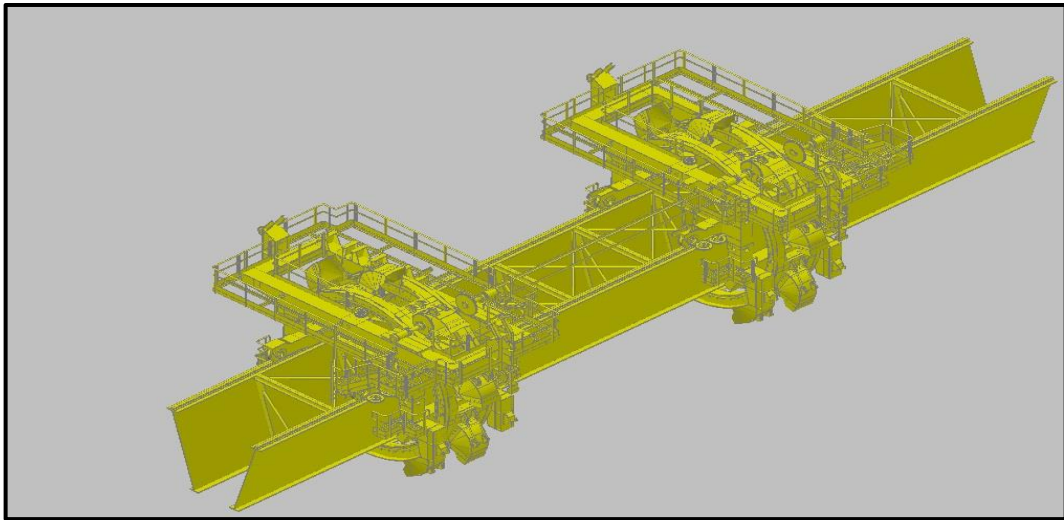
ACIONAMENTO E TRANSMISSÃO DA RODA DE CAÇAMBA	
COMPONENTE/SUBSISTEMA	FUNÇÃO
Motoredutor	Conjunto composto por motor elétrico e redutor de engrenagens que tem a função de fornecer movimento rotativo com um elevado torque.
Pinhão motriz	Componente de engrenagem do eixo menor do sistema de transmissão, tem a função juntamente com os demais componentes de transmitir movimento de um dispositivo para outro.
Corrente	Componente que tem a função de transmitir potência entre o pinhão e a cremalheira da roda de caçamba.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.5 Acionamento de Translação dos Carros Trolley

Os carros Trolley sustentam as rodas de caçambas, transladam sobre a viga principal, através dos conjuntos (mecanismos) de translação. O acionamento para translação consiste basicamente em um motor elétrico, um redutor planetário, acoplamentos flexíveis, tambor enrolador de cabo e dois cabos de aço fixados em ambas extremidades da ponte.

Figura 26. Carros Trolley das Rodas de Caçamba.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 27. Unidade de Acionamento da Translação do Carro Trolley.



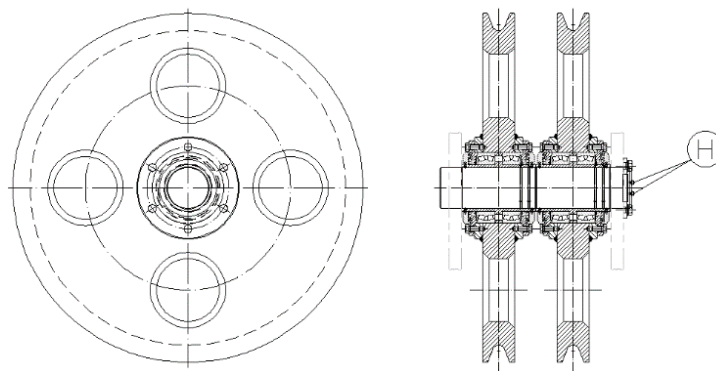
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10. Componentes e Funções do Sistema de Acionamento de Translação dos Carros Trolley

ACIONAMENTO DE TRANSLAÇÃO DOS CARROS TROLLEY	
COMPONENTES/SUBSISTEMA	FUNÇÃO
Redutor Planetário	Dispositivo mecânico utilizado para reduzir a velocidade rotacional do sistema de acionamento do equipamento.
Roda/rodeiro de translação	Componentes tem a função de transladar sobre trilho da viga principal, fazendo com que o carro se deslocar lateralmente.
Roldana do cabo	Elemento do sistema de mecânico de transmissão ligado ao tambor por um cabo de aço com a função de transmitir a força e energia cinética. (Força de tração).
Tambor enrolador de cabo	Construído em chapa de aço soldada, com canais (ranhuras helicoidais), com a função de giro deste tambor faz com que o mesmo, juntamente à estrutura do carro, se desloque ao longo do cabo, realizando assim a translação.
Tensor do cabo	Dispositivos de tensionamento de cabo em uma das extremidades de cada cabo de aço.

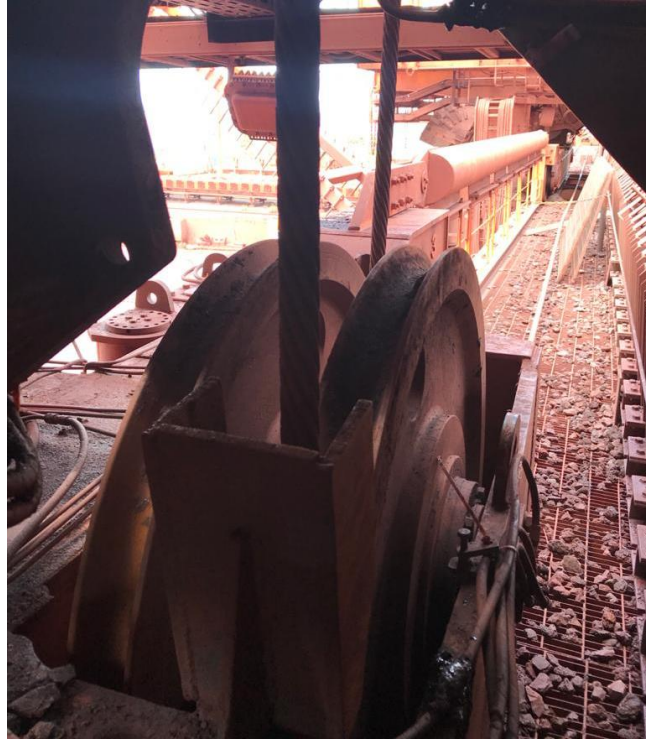
Fonte: Autoria Própria

Figura 28. Desenho técnico do Conjunto de Roldanas.



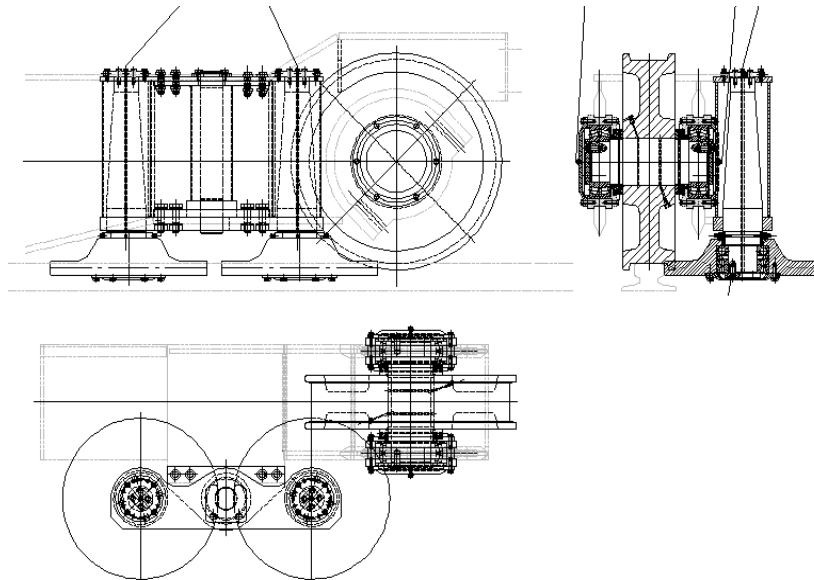
Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 29. Conjunto de Roldanas.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 30. Desenho técnico do Rodeiros de Translação.



Fonte: ThyssenKrupp Fördertechnik (2011).

Figura 31. Rodeiros de Translação.



Fonte: Autoria Própria.

3.2.6 Lubrificação Centralizada

Afim de atender os vários pontos de lubrificação da Recuperadora tipo Ponte foram previstos sistemas de lubrificação centralizada automática, progressivo, linha simples, de funcionamento inteiramente hidráulico.

A Recuperadora RC-3011KN-01 é dotada de três sistemas de lubrificação centralizada à graxa e independentes, fornecidos pela empresa *Eximport LubeSystems*, sendo 1 (um) para os trucks da translação e TR da Ponte, 1 (um) para a lubrificação das correntes de acionamento das Rodas de Caçambas e 1 (um) para o carro das rodas.

Figura 32. Unidade de Lubrificação *Eximport LubeSystems*.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 33. Especificações do Sistema de lubrificação centralizado da *Eximport LubeSystems*.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11. Componentes e Funções do Sistema de Lubrificação Centralizada

LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	
COMPONENTES/SUBSISTEMA	FUNÇÃO
Reservatório	Compartimento destinado ao armazenamento do fluido lubrificante, que posteriormente será succionado através da bomba hidráulica quando necessário.
Bomba Hidráulica	A bomba hidráulica tem a função de transformar a energia mecânica proveniente do motor de acionamento em energia hidráulica, provocando assim a pressurização do fluido lubrificante.
Tubulação	Conjunto de dutos e conexão interligada para proporcionar o transporte do fluido até os pontos de lubrificação.

Fonte: Autoria Própria

3.3 PROCESSO DE MANUTENÇÃO DA EMPRESA

A mineradora, na qual está inserido a recuperadora de minério em estudo, baseia-se em documentos e diretrizes para padronizar suas atividades, papéis e responsabilidades nos processos, chamados de PNR's (Procedimentos Normativos). Um desses documentos estabelece como deve se seguir o fluxo de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) na área de manutenção da indústria, o qual será explicitado aqui.

3.3.1 A Função Manter

Dentro da empresa, o PCM dos ativos equipara-se a uma das ferramentas essenciais para atingir o propósito da chamada **Função Manter**, que é uma metodologia própria da mineradora para direcionar o fluxo do processo de manutenção. Essa metodologia tem por base: sustentar os ativos (equipamentos e instalações) dentro de padrões, parâmetros, normas e requisitos legais pré-estabelecidos, com foco na segurança de pessoas e ativos, com confiabilidade e trabalhando para eliminar ou reduzir riscos através dos empregados.

Dentro do modelo de gestão implantado pela empresa, existe um fluxo muito claro de como é organizada a função manter, como se vê a seguir:

Figura 34. Fluxo da Função Manter.



Fonte: Documentos fornecidos pela empresa.

O fluxo da função manter separa-se por essas etapas, nas quais cada uma deve ser seguida dentro de prazos estabelecidos, com papéis e responsabilidades de cada área envolvida, essenciais para que o processo tenha assertividade no seu andamento. Abaixo, explicita-se cada uma das fases:

- **Inspeccionar:** Os inspetores cumprem rotas de inspeção diariamente, de acordo com os equipamentos os quais são responsáveis. Com isso, realizam a manutenção detectiva e geram as OM's de acordo com o estado dos equipamento, inserindo o máximo de informações na descrição, como: sinalização da atividade a ser realizada, informações técnicas, necessidades de equipamento e material para realizar a manutenção. Além disso, devem gerenciar a evolução do problema, com gestão visual do ativo, monitorar pontos e parâmetros de inspeção e os impactos das restrições da atividade.
- **Planejar:** Os planejadores devem incluir nas OM's o passo-a-passo da atividade a ser executada, apropriar recursos, incluir a mão-de-obra necessária com a quantidade de

horas de trabalho de cada executante (mecânico, soldador, lubrificador, etc.), materiais e recursos auxiliares. Ademais, são incumbidos de priorizar as atividades de acordo com a criticidade ou com foco em enxugar a carteira de ordens mais antigas abertas, além de cumprir os laudos estruturais e preditivos. Por fim, fornecem ao provisionador informações técnicas para aquisição dos materiais necessários.

- **Aprovisionar:** Na função provisionar, o profissional incumbido deve realizar a requisição dos materiais apontados pelo planejador, analisando o que há em estoque e realizando a compra do que estiver em falta. Para isso, deve gerenciar interfaces com o armazém, área de suprimentos, engenharia e inspeção, fazendo a parametrização de novos itens em estoque ou em contrato.
- **Programar:** O programador tem a função de programar as manutenções sistemáticas e condicionais, de acordo com aquilo que foi priorizado pelo planejador e tendo o material garantido pelo provisionador. Nesse contexto, é importante que realize o gerenciamento do mapa de 52 semanas (referente ao ano inteiro), para prever distribuição e balanceamento de recursos e tratar possíveis desvios.
- **Preparar:** Na função Preparação, o encarregado é responsável por realizar o controle dos materiais das atividades programadas, para isso ele administra o recebimento, cadastro e montagem de kits de materiais na área, comandando a movimentação desses materiais, para que todo esse recurso esteja disponível na frente de serviço antes da execução da atividade, assim garantindo que não haja falta ou desperdício de materiais no processo. O gerenciamento das interfaces entre provisionamento, programação e execução é essencial para o processo de preparação.
- **Executar:** Na última parte do processo da “Função Manter”, o executante realiza o check list de materiais disponibilizados pelo preparador, garantindo a aderência do que foi sinalizado pelo planejador. Por conseguinte, executa as atividades programadas, sejam preventivas (MP’s) ou condicionais (OM’s), com o tempo e mão-de-obra apontados. Ao final dos serviços, são realizadas a limpeza geral e desmobilização de equipamentos, materiais e sucatas, podendo o profissional, enfim, encerrar as OM’s no sistema. Além disso, o gerenciamento das atividades da execução são registrados, para que seja possível analisar eventuais desvios que ocorrerem

3.3.2 PCM - Planejamento e Controle da Manutenção

Como exposto, o PCM está inserido como uma ferramenta para o cumprimento da “Função Manter”. Com isso, as etapas que fazem parte do PCM são planejamento e programação, as quais exigem gerenciamento dos *Key Process Indicators (KPI's)*, ou Indicadores Chaves do Processo, e cumprimento do mapa de 52 semanas, que é elaborado pelas áreas de engenharia. Assim, sabe-se que o PCM está incluído no processo desde a entrada de demandas de manutenção até a execução das atividades programadas.

Para explicitar melhor, o macroprocesso do PCM se dá de forma semelhante ao da Função Manter, como se observa abaixo:



Fonte: Documentos fornecidos pela empresa.

- **Planejamento de Médio Prazo:** Realizar o planejamento das atividades de manutenção no horizonte de 52 semanas, estando alinhado com o Controle de Operação, com base em demandas de condição, planos sistemáticos, *inputs* das áreas de engenharia, confiabilidade e riscos do negócio. A estratégia para as intervenções devem conter informações como: o tipo de atividade a ser realizada, qual a duração, estratégia de contratação de serviços terceirizados e recursos necessários (materiais, ferramentas, componentes, entre outros);
- **Planejamento de Curto Prazo:** Desdobrar o mapa de 52 semanas atualizando as manutenções necessárias para as próximas semanas e o seu desdobramento no próximo mês ou semana, informando corretamente as premissas adotadas no planejamento. Nessa etapa, os serviços previstos para, até, 3 meses a frente devem ser gerenciados para garantir que, os quais forem prioridade, não deixem de ser executados por falta de materiais, componentes ou mão de obra, por exemplo. Assim, garante-se o cumprimento e aderência ao planejamento e programação dos ativos conforme o mapa de 52 semanas;
- **Planejamento de Ordem de Manutenção:** Planejar as ordens de manutenção (OM's) abertas no sistema informatizado de manutenção. Para isso, o planejador deve aceitar a nota de manutenção, conforme necessidade do ativo a partir da criticidade definida pelo inspetor na nota, assim ele planeja e, sempre que necessário, vai ao local onde a manutenção será realizada para avaliar o cenário e definir a melhor forma de sequenciar as atividades, com interface junto aos profissionais de execução e sempre de acordo com

a documentação técnica da máquina;

- **Aprovisionamento:** Solicitar material e componente através da ordem de manutenção, diligenciando sua entrega, para proporcionar mais eficiência à execução da manutenção. Para isso, deve estratificar a carteira de OM's, dando preferência às atividades priorizadas e aprovisionar os materiais, componentes, serviços e ferramentas conforme necessidade. Nesse contexto, é essencial que o responsável diligencie os itens aprovisionados conforme a data planejada para execução da atividade, negociando com os fornecedores o atendimento dos prazos e gerenciando qualidade e *lead time* de entregas;
- **Programação:** Programar as atividades de manutenção de acordo com a necessidade do ativo, otimizando a utilização dos recursos, com análise preliminar dos riscos da atividade e ações para eliminar acidentes. A programação só deve ser realizada para as ordens que tiverem todos os recursos já disponibilizados, informando as necessidades no sistema informatizado de manutenção;
- **Preparação:** Preparar os recursos e serviços necessários (posicionamento, limpeza, guindaste, bloqueio, máquina de solda, ferramentas, etc.) com antecedência, para execução das atividades, e entregar no local, no tempo, na qualidade e quantidade de acordo com o estabelecido. Para tal, o preparador recebe a programação semanal e define a logística de distribuição de entrega de materiais e componentes, dentro do prazo correto. O gerenciamento das interfaces com operação, planejamento, aprovisionamento, programação e execução garante os recursos nas frentes de serviço;
- **Controle:** Monitorar e gerenciar os processos de PCM e de Execução, através da consolidação e análise de indicadores, propondo soluções para os desvios e falhas de processo, bem como auxiliar a identificar oportunidades de melhoria. Assegurar a saúde dos KPI's de processo e gerenciar os indicadores de manutenção são tarefas básicas para se fazer o controle das atividades.

3.4 COLETA E MANIPULAÇÃO DOS DADOS DE FALHAS DA RC

3.4.1 Base de dados

Para coleta dos dados de falhas da máquina utilizou-se um sistema de informações da empresa que gere as atividades de produção, o qual possui o histórico de falhas de todos os equipamentos relativos aos processos de mineração e beneficiamento da empresa, assim como as motivações para paradas do ativo para manutenção. Na Figura 36, observa-se a interface do

portal, no qual podem-se aplicar diversos filtros para gerar os relatórios em formato de planilha Excel com os resultados demandados:

Figura 36. Interface do Sistema de Informações.

The screenshot shows the interface of the Sistema de Informações. At the top, there is a navigation menu with options: Cadastro, Planejamento, Execução, Acompanhamento, Administração, and Otimização. Below the menu, there is a search bar and a breadcrumb trail: [AEO3] Acompanhamento » Equipamento » Extração de Apontamentos de Tempo. The main area contains a search form with various filters: Tipo de Equipamento (Fixo), Visualização por (Proprietário), Local/Equipamento (Serra Norte), Categoria, Tipo de Evento (Parado), Família, Evento, Classe, Categoria de Horas, Modelo, Classificados, Grupo de Equipamentos, Apontamentos, and Porte. There are also date range fields for Início* (01/01/2018 00:00:00) and Fim* (01/02/2018 00:00:00). A 'Colunas' section shows a list of columns to be included in the report, with 'Validado', 'Diretoria', 'Complexo', 'UO', 'Fase Produtiva', 'Sistema Produtivo', 'Subprocesso', 'Linha', 'Equipamento', and 'Câmbio do Evento' listed. At the bottom, there are buttons for 'Gerar Relatório' and 'Limpar'.

Fonte: Documentos Fornecidos pela empresa.

Importante salientar que o sistema é alimentado com dados advindos de informações repassadas pelas equipes de operação e que são alimentadas nos relatórios por integrantes do Centro de Controle de Operação (CCO), portanto é comum que surjam informações, algumas vezes, repetidas ou errôneas, visto que ocorrem falhas humanas no preenchimento.

No que se refere aos relatórios gerados, sabe-se que eles demonstram informações de processo como em qual área o equipamento opera, diretoria responsável, classe do ativo entre outros. Além disso, são mostrados os dados relevantes para o trabalho, os quais são: horas paradas para manutenção, número de intervenções corretivas, causas da parada e modos de falha. Além disso, tem-se os diferentes setores responsáveis pelos tipos de falhas, separados por mecânica, elétrica, vulcanização, instrumentação, automação e outros.

Desse modo, foram levantados os relatórios referentes as paradas para manutenção corretiva da Recuperadora de Minério de TAG RC-3011KN-01, dos meses de **fevereiro a novembro de 2019**. Os relatórios processados pelo portal são muito extensos pois obtém inúmeras colunas de informações, sendo cada linha correspondente a uma ocorrência. Na Figura 37 abaixo, observa-se uma pequena parte do relatório mensal gerado:

Figura 37. Parte de um relatório mensal gerado pelo Sistema de Informações.

Início	Fim	Duração	EGP	Família do EGP	Classe do EGP	Setor	Causa	Falha	Categoria de Horas	Categoria de Horas Diretoria
01/07/2019 00:00:00	01/07/2019 04:42:40	04:42:40	PN 131-10	Peneiras	Peneira vibratória horizontal	Mecânica	Componentes da peneira	Defeito channel	HOI - Hora Ociosa Interna	HMC - Hora de Manutenção Corretiva
01/07/2019 00:00:00	01/07/2019 05:15:00	05:15:00	BA 149-08	Bombas	Bomba de polpa	Preventiva	Manutenção Preventiva	Preventiva de equipamento	MPS - Hora Manutenção Preventiva Sistemática	MPS - Hora Manutenção Preventiva Sistemática
01/07/2019 00:00:00		06:32:36	RC 1520-04	Recuperadoras	Recuperadora de caçamba	Preventiva	Manutenção Preventiva	Limpeza de equipamento	MPS - Hora Manutenção Preventiva Sistemática	MPS - Hora Manutenção Preventiva Sistemática

Fonte: Documentos fornecidos pela empresa.

Os dados gerados não dão uma profundidade muito detalhada das falhas de componentes do ativo selecionado, pode-se observar, apenas, as falhas de sistemas macros para o processo. Para entender o contexto de preenchimento das planilhas no sistema, sabe-se que todos esses dados são apontados pela operação, a qual, no momento em que acontece alguma falha, aponta as informações à sala de controle, onde há operadores que realizam o preenchimento manualmente, com excessão de alguns dados que são gerados automaticamente pelos sensores existentes na máquina (como o horário em que ocorreu a falha, por exemplo).

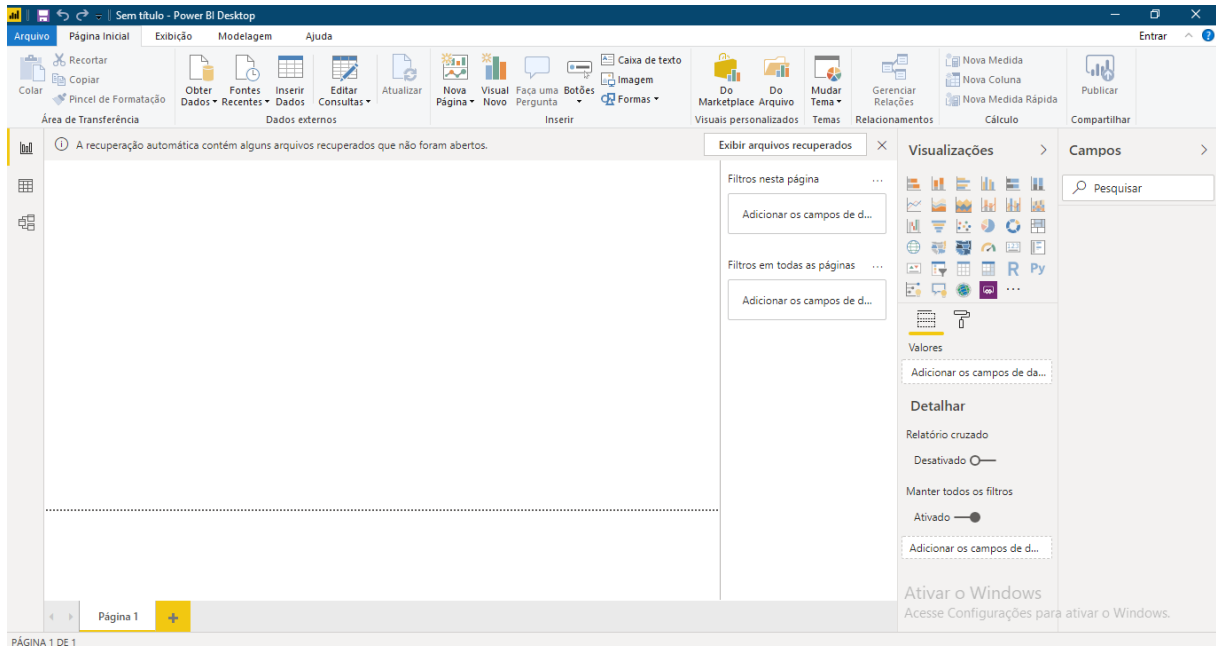
Portanto, por não ser pertinente para o setor de operação, não são apontados maiores detalhes da ocorrência e, desse modo, não é gerado um histórico de falhas dos componentes que serão estudados. Porém, consegue-se fazer uma análise mais geral dos eventos de falhas como: qual a natureza da falha (mecânica, elétrica, automação e afins), quantos eventos aconteceram em um determinado período e por quanto tempo a máquina ficou parada para manutenção corretiva não planejada.

Sendo assim, foi necessário contabilizar os resultados e separar as informações estritamente necessárias para a análise. Para isso, foram extraídos os relatórios do período em estudo e realizada a manipulação dos dados.

3.4.2 Manipulação dos Dados de Falhas

Para uma melhor visualização dos dados de falhas do equipamento, todos os relatórios mensais gerados foram manipulados e tabulados com auxílio do *software Microsoft Power BI Desktop* (Versão 2.76.5678.782 – ano 2019), o qual permite coletar, organizar e visualizar dados de planilhas de forma dinâmica e interativa, potencializando o processo de análise das informações, pois consegue-se fazer filtros e aplicar os mais diversos tipos de gráficos de forma rápida e fácil. Na figura 38, observa-se como é a interface do programa.

Figura 38. Interface do software *Microsoft Power BI Desktop*.



Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, o *Power Bi* pôde fornecer alguns dados para se analisar a confiabilidade do ativo, como o número de eventos por setor, quantidade de horas e de eventos de manutenção corretiva não planejada mensal, com os quais calculou-se o MTBF da máquina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico será explicado cada um dos passos definidos na metodologia e as técnicas para se cumprir cada tarefa para aplicar o programa MCC.

4.1 DADOS SOBRE A RC

4.1.1 Dados de Produção

Primeiramente, como definiu Kardec e Nascif (2009), os dados de produção do ativo precisam ser levantados, para assim analisar sua performance, se está cumprindo com o que foi projetado e alcançando as metas de produção da empresa. Desse modo, tem-se uma ideia de o quanto o ativo está sendo confiável em cumprir suas funções primordiais. Por isso, buscou-se os dados de produção da máquina, fornecidos pela área operacional, no mesmo período em que as falhas serão analisadas (de fevereiro a novembro de 2019), com os quais pode-se fazer a comparação do programado de produção *versus* o quanto foi realmente executado, como se vê na Tabela 12:

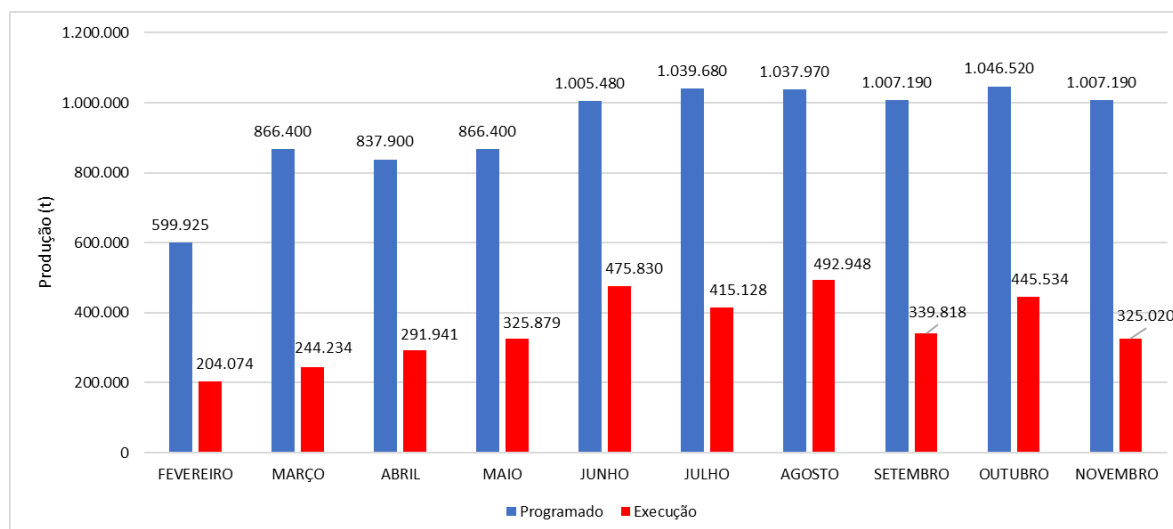
Tabela 12. Dados de Produção da RC no ano de 2019 (fevereiro a novembro)

Mês	Programado (T)	Executado (T)
FEVEREIRO	599.925	204.074
MARÇO	866.400	244.234
ABRIL	837.900	291.941
MAIO	866.400	325.879
JUNHO	1.005.480	475.830
JULHO	1.039.680	415.128
AGOSTO	1.037.970	492.948
SETEMBRO	1.007.190	339.818
OUTUBRO	1.046.520	445.534
NOVEMBRO	1.007.190	325.020

Fonte: Documentos Fornecido pela Empresa.

Para se visualizar melhor esses dados e realizar uma comparação, foi elaborado o gráfico da Figura 39 a seguir:

Figura 39. Comparação entre dados de produção: Programado x Executado no ano de 2019 (fevereiro a novembro).



Fonte: Autoria própria.

A programação de produção da máquina é realizada no ano anterior, de acordo com as metas de produção da empresa e orçamentos realizados, ou seja, os dados de programação vistos acima foram todos definidos antes do fechamento do ano de 2018. Esse orçamento é realizado considerando-se os períodos chuvosos do ano, nos quais sabe-se que os números de produção da máquina serão menores - período de fevereiro a maio -, já no restante do ano a programação é maior para compensar os meses de menor capacidade de produção.

Outro fator considerado é a oferta de produção da mina, pois o pátio de regularização no qual a RC está localizada funciona como um “pulmão” no processo. Em outras palavras, em períodos que a mina está operando em sua capacidade total e consegue ofertar uma grande quantidade de minério, a RC fica em modo *stand by*, e o material segue o fluxo do processo normalmente até os vagões do trem que faz o transporte do produto para exportação. Assim, o minério estocado no pátio só é recuperado pela RC quando a oferta de mina é baixa, ou quando ocorrem problemas ou paradas na área de Britagem (início do processo de beneficiamento que alimenta todo o circuito da Usina em questão), havendo a necessidade da Recuperadora operar e transportar o material estocado no pátio de regularização para a linha de produção, para então manter o processo funcionando sem haver perdas significativas. Desse modo, a RC é vital para a produção da empresa, pois permite que a Usina continue produzindo quando ocorrem problemas em outros circuitos.

Assim, analisando os dados de produção, conforme mostra a Figura 39 (gráfico produção), pode-se enxergar, evidentemente, que a máquina não cumpriu a meta orçada em nenhum mês analisado. Nesse sentido, as informações levantadas acima, sobre o contexto de

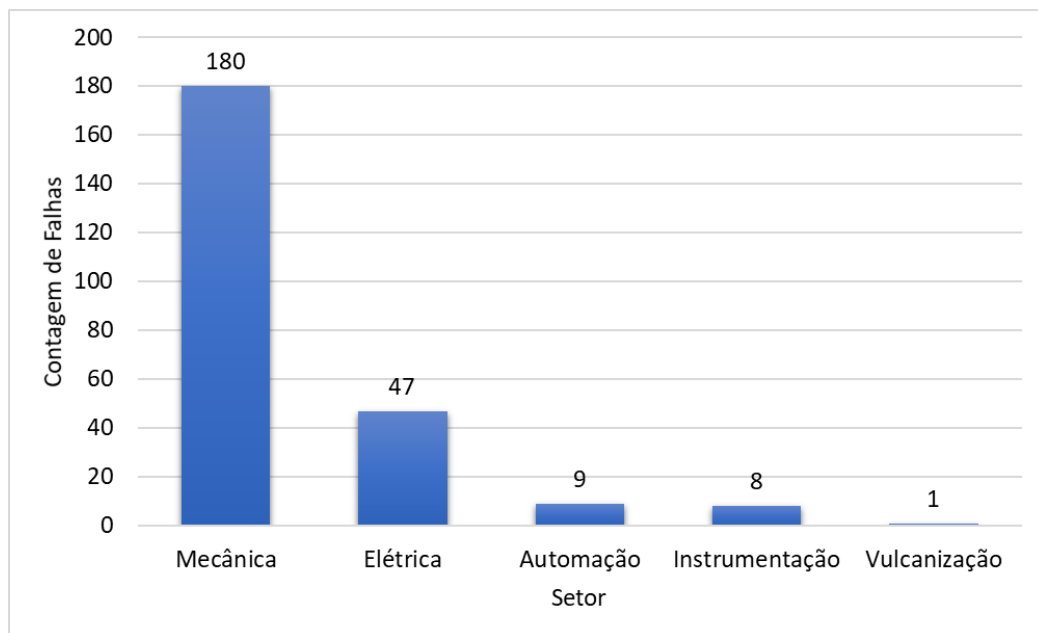
operação da máquina, devem ser levadas em consideração para o não cumprimento do programado. Há a possibilidade de que a mina possa ter garantido a oferta de minério necessária e a RC ter se mantido em *stand by* por mais tempo e, por isso, não ter cumprido o orçamento. Mas, como será evidenciado nos próximos tópicos desse trabalho, será possível ver que os principais motivos para o baixo desempenho da máquina são as excessivas falhas ocorridas e paradas para manutenção corretiva, o que tem comprometido a confiabilidade do ativo.

4.1.2 Dados de Falhas

Os dados de falhas foram coletados em um sistema de informações da empresa e mensurados com o software *Power Bi*, como se vê na seção 3.4 desse trabalho. Nos próximos subtópicos, observam-se os principais dados de falhas para se analisar a máquina.

4.1.2.1 Eventos por Setor

Figura 40. Contagem de falhas por setor durante o período de fevereiro a novembro de 2019.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 40 que, no período em estudo, houve um acumulado de 245 falhas se somados os setores, das quais a maioria são em componentes mecânicos (180 eventos). Assim, as falhas mecânicas serão o foco da implantação do MCC, visto que as áreas (PCM, Inspeção, Operação e Engenharia) para as quais o trabalho será exposto, atuam no setor de mecânica. Desse modo, a análise dessas falhas, junto com a posterior elaboração dos planos de manutenção pertinentes aos componentes mais críticos, devem atender as necessidades de aumento de confiabilidade do ativo.

4.1.2.2 Intervenções Mecânicas por Mês

Na tabela 13, pode-se enxergar os dados mensais, obtidos pelo *Power BI*, como número de eventos e horas paradas para manutenção corretiva não planejada, além da quantidade de horas que a máquina ficou disponível para operar normalmente.

Tabela 13. Dados de Intervenções Mecânicas e horas disponível para operação da máquina– Mensal

Mês	Quantidade de eventos - corretiva	horas paradas para corretiva (h)	horas disponível para operação (h)
fevereiro	11	21,18	650,82
março	32	181,83	562,17
abril	20	52,71	667,29
maio	11	51,47	692,53
junho	26	46,48	673,52
julho	10	19,18	724,82
agosto	20	39,53	704,47
setembro	12	264,85	455,15
outubro	17	15,57	728,43
novembro	21	295,71	424,29
Total Geral	180	988,51	6283,49

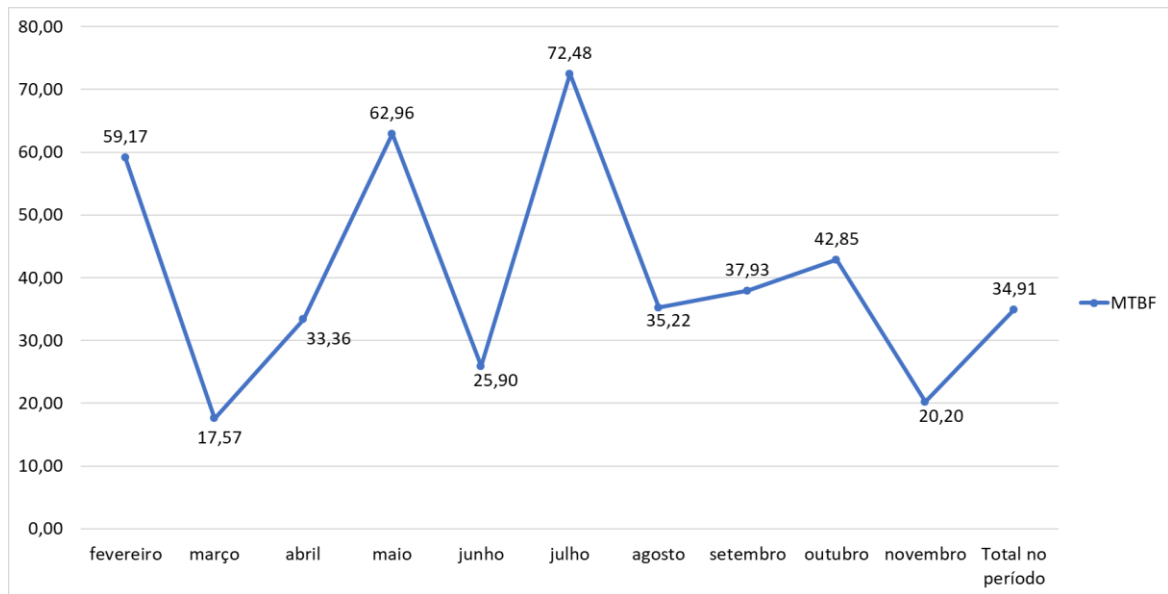
Fonte: Autoria Própria.

Esses dados servirão de base para o cálculo dos indicadores MTBF, Taxa de Falhas e Confiabilidade, mostradas a seguir.

4.1.2.3 Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)

O indicador MTBF da máquina, segundo Viana (2002), é calculado pela razão entre horas disponíveis de operação da máquina e número de eventos corretivos. Assim, o indicador da RC foi calculado e é mostrado na Figura 41:

Figura 41. Tempo Médio entre falhas no período de fevereiro a novembro de 2019.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se uma inconstancia muito grande no funcionamento da máquina. Há meses em que o MTBF está com valores bons, porém, nos meses seguintes aos bons, os índices de tempo médio entre falhas decaem bruscamente. Por exemplo: quando a máquina está performando bem (meses de fevereiro, maio e julho), logo nos meses seguintes a esses (março, junho e agosto) houveram decréscimos muito grandes no indicador MTBF, o que explicita uma sazonalidade no processo da RC, que não consegue manter uma performance constante e satisfatória.

4.1.2.4 Taxa de Falhas (λ)

A taxa de falhas é o inverso do MTBF (VIANA, 2002). Portanto, obtém-se os seguintes dados, conforme mostra a Figura 42:

Figura 42. Taxa de falhas (λ) no período de fevereiro a novembro de 2019.



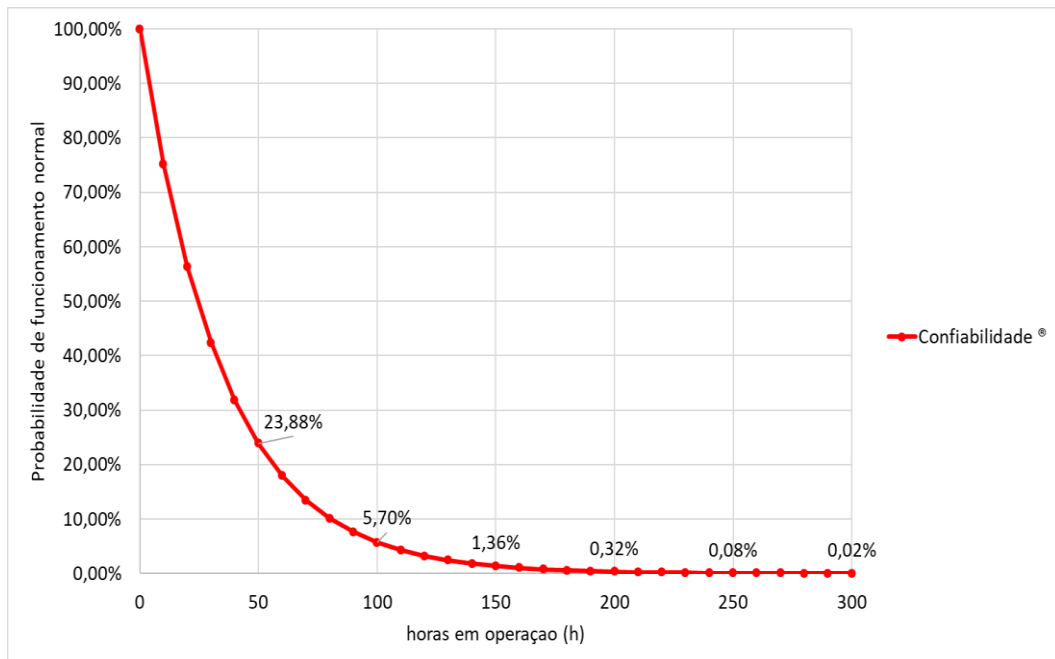
Fonte: Autoria Própria.

Mais uma vez, conforme pode-se observar na Figura 42, os dados mostram como o processo está inconstante, sem nenhum padrão de funcionamento da máquina. Com isso, a taxa de falhas permite calcular a confiabilidade da RC. Pode ser possível que estejam sendo tratadas as falhas de forma reativa, ou seja, as manutenções estão sendo realizadas depois que acontecem as consequências de falhas. Nesse sentido, é importante que se utilizem técnicas para que se possa prever as falhas e agir antes que aconteçam.

4.1.2.5 Confiabilidade $R(t)$

A confiabilidade é vista com uma função exponencial, que varia com o tempo, a qual mostra a probabilidade de o equipamento estar funcionando normalmente após um determinado período de tempo. Considerando um regime de funcionamento de 300h sem parar e a taxa de falhas calculada anteriormente, tem-se a seguinte distribuição de confiabilidade (Figura 43):

Figura 43. Confiabilidade da máquina em um período de 300h de operação.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se uma queda acentuada de confiabilidade logo nas primeiras horas de operação. Visto que a máquina é projetada para funcionar durante 24h por dia, todos os dias do ano, esse é um problema muito sério, pois é possível enxergar que após aproximadamente dois dias operando (50h), a confiabilidade da máquina está abaixo de 25%, tendo mais de 75% de chances de apresentar alguma falha mecânica que pare a máquina.

As chances de quebra são ainda mais críticas após 150h de operação - equivalente a, aproximadamente, 6 dias – apresentando menos do que 2% de probabilidade da RC estar operando nas condições normais de funcionamento.

4.1.3 Considerações Gerais dos Dados

Nesse sentido, foi mostrado que a máquina tem significativos problemas de confiabilidade, pois não há constância no seu funcionamento nem na produção. Para resolver isso, um bom plano de manutenção é necessário, com tarefas proativas que aumentem o indicador MTBF e, conseqüentemente, a confiabilidade da Recuperadora.

O ideal para elaborar esse plano de manutenção seria uma análise de dados de falhas e confiabilidade mais profunda, em cada sistema e subsistema da máquina. Porém, esses dados, hoje, não existem, pois não é feito um estudo tão detalhado a esse nível, ainda. Sendo assim, Fogliatto e Ribeiro (2011) explicitam que, em casos assim, que não se tenham esses dados,

pode-se partir para análise de falhas com os conhecimentos e experiências da equipe de trabalho, com as ferramentas disponíveis para isso.

Dessa forma, a abordagem selecionada será aplicar a ferramenta FMEA e, depois, separar os componentes de maior criticidade e dar tratativas, sempre levando-se em conta a expertise dos envolvidos no trabalho.

4.2 DEFINIÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO

Com os dados de falhas da máquina coletados, foi imprescindível, por conseguinte, definir a equipe de envolvidos no trabalho, os quais detêm conhecimento da rotina de funcionalidade e processos de manutenção que estão sendo aplicados na Recuperadora de minério. Abaixo, pode-se ver as funções dos profissionais escolhidos para integrar o trabalho na Figura 44.

Figura 44. Equipe de trabalho para implementação do MCC.



Fonte: Autoria Própria.

Os facilitadores são os autores desse trabalho, incumbidos de organizar reuniões, interfaces e fazer todo o levantamento de informações, além de escolher as pessoas envolvidas.

Nesse sentido, a escolha dos envolvidos foi pensada de forma a envolver os profissionais que estão diretamente ligados aos procedimentos de manutenção do ativo.

O supervisor do setor de Inspeção, que possui formação em Engenharia Mecânica, junto com o técnico de inspeção sensitiva, são incumbidos de gerar ordens de manutenção de acordo com a inspeção sensitiva realizada, para isso é necessário a realização de rotas de inspeção quase que diárias, o que explicita o conhecimento dos subsistemas e componentes da máquina e dos principais problemas ocorridos. Eles, também, são responsáveis por gerar relatórios de falhas da máquina. Um inspetor da preditiva também foi adicionado, pois alguns componentes da máquina são monitorados por ele, principalmente com técnicas de análises de vibração e de temperatura.

Além disso, os planejadores de manutenção, um sendo responsável pelo equipamento e o outro pelas atividades relevantes de manutenção da usina, têm o conhecimento das atividades preventivas que são realizadas, recursos e mão de obra demandados, tempo de parada necessária e, também, dos modos de falhas. Um profissional da operação também foi inserido no estudo, pois ele detém informações sobre as estimativas de produção da máquina e o quanto está sendo executado, e também pela operação ser o setor que detecta, em primeira mão, quando ocorre algum evento de falha.

O supervisor de Preventiva da máquina é quem está ligado aos serviços de manutenção sistemáticos e periódicos, que já tem um intervalo definido para que ocorram. Por fim, um técnico especialista em processos foi convidado, visto que ele obtém expertise quanto aos indicadores de manutenção, das metas a serem cumpridas e do fluxo do processo de PCM da empresa, além de ter acesso ao banco de dados do qual foi retirado o histórico de falhas da máquina.

4.3 REUNIÃO DE *BRAISNTORMING* COM OS ENVOLVIDOS

O propósito para a realização desse *brainstorming* inicial foi de delimitar como seria implantado o programa MCC e levantar informações relevantes com os profissionais que detém grande experiência na área. Para nortear a reunião e estimular a geração de ideias, apresentou-se o perfil de perdas elaborado no *software Power BI*, referente às manutenções corretivas realizadas durante o ano de 2019. Desse modo, os principais pontos de atenção levantados pela equipe foram:

- **A sazonalidade no funcionamento da máquina:** comentou-se que ela, muitas vezes,

está em status de *standby*, ou seja, não está operando mas está disponível para quando necessário, então isso não impacta no indicador disponibilidade física (DF). Porém, quando a máquina é solicitada e passa a funcionar, é comum que apresente alguma falha, sendo esse, então, um sério problema de confiabilidade;

- Alguns efeitos de falhas podem estar sendo ocasionados por outros, portanto é necessário que se **analise as causas raízes**;
- Atualmente, trata-se os efeitos de falhas, os quais são mais fáceis de se enxergar e são de conhecimento do inspetor, porém esse é apenas um tratamento pontual e reativo que não soluciona os principais problemas da máquina, isso diminui bastante a estabilidade do processo;
- Alguns componentes são de difícil acesso para se realizar a inspeção sensitiva pelo inspetor, isso está acarretando em falhas inesperadas nesses tipos de componentes, pois não é possível fazer uma projeção de quando irão falhar;
- O problema de vazamento pode estar acarretando quebras em componentes mais críticos, como a estrutura radial da roda e o sistema de vedação do chute;
- Algumas melhorias implantadas, como a instalação de calhas para reter vazamento, são apenas soluções temporárias e que não resolvem em definitivo os problemas.

A partir dos pontos de atenção levantados na reunião de *brainstorming* inicial, surgiram as ideias para delimitação da implantação do programa MCC, as quais são apresentadas a seguir:

- Foco para melhorar o indicador MTBF, buscando **diminuir a quantidade de número de eventos de falhas**, visto que é o que impacta, atualmente, na confiabilidade da Recuperadora de Minério;
- Delinear a aplicação do MCC aos **modos de falhas mais críticos**;
- **Mostrar as causas raízes** desses modos de falhas e propor tratativas;
- Propor planos de Manutenção **Preventiva para os itens não inspecionáveis**, para que não aconteçam mais falhas inesperadas;
- Propor planos de **Manutenção Preventiva para componentes de alta criticidade** devido a difícil manutenção, custo elevado, entre outros critérios.

4.4 APLICAÇÃO DO FMEA

Para aplicação do FMEA foram envolvidos os profissionais da equipe formada para o MCC. Com isso, conseguiu-se fazer o levantamento dos principais modos de falhas, seus efeitos e índices de ocorrência, severidade e detecção, para mensurar os riscos de cada falha e, posteriormente, propor soluções. Na Tabela 14, temos o estudo FMEA completo.

Tabela 14. FMEA da Recuperadora de Minério Tipo Ponte RC-3011KN-01

FMEA - ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA								
FMEA Nº 001		Revisão: 00	Data de Emissão: 31/01/2020			Responsáveis: Magson da Silva, Pedro Ribeiro Neto		
EQUIPAMENTO:		RECUPERADORA DE MINÉRIO DE RODA DE CAÇAMBA TIPO PONTE - RC-3011KN-01						
Ponto da Falha			Análise da Falha		Avaliação de Risco			
ITEM	Sistema	Subsistema	Modos de Falha	Efeitos de Falha	Ocorrência	Severidade	Detecção	RPN
1	RODA DE CAÇAMBA	RODA DE APOIO	TEMPERATURA EXCEDENTE	FUSÃO DO ROLAMENTO COM EIXO	6	8	6	288
			DESGASTE FACIAL (TRAVAMENTO)	SUSPENDE A OPERAÇÃO	7	8	6	336
			FALHA NO ROLAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	6	8	6	288
		RODA DE ENCOSTO	DESGASTE FACIL (TRAVAMENTO)	SUSPENDE A OPERAÇÃO	5	8	6	240
			DESGASTE FACIAL (NATURAL)	DESALINHAMENTO	7	3	6	126
			FALHA NO ROLAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	6	8	7	336
		ESTRUTURA RADIAL INTERNA	FISSURAS / AVARIAS	SUSPENDE A OPERAÇÃO	5	8	6	240
		TRILHO CIRCULAR	DESGASTES/TRINCAS	DESALINHAMENTO	3	8	6	144
			FOLGA NO ELEMENTO DE FIXAÇÃO	VIBRAÇÃO EXCESSIVA	6	4	6	144
		CAÇAMBA	FISSURAS / AVARIAS	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	6	144
			QUEBRA DO BRAÇO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	6	144
			DESPRENDIMENTO DA BORDA	DESGASTE DA ESTRUTURA DA CAÇAMBA	3	8	6	144
			QUEBRA DE PINOS (CUPILHA)	SUSPENDE A OPERAÇÃO	4	7	6	168

Tabela 14. FMEA da Recuperadora de Minério Tipo Ponte RC-3011KN-01

ITEM	Sistema	Subsistema	Modos de Falha	Efeitos de Falha	Ocorrência	Severidade	Deteção	RPN
1	RODA DE CAÇAMBA	BALANÇIM DA RODA DE APOIO	TRAVAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	8	192
			QUEBRA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO EIXO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	8	192
			DESLOCAMENTO DO EIXO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	8	192
2	CHUTES CIRCULARES	ESTRUTURA	AVARIAS	SUSPENDE A OPERAÇÃO	5	8	6	240
		REVESTIMENTO	DESGASTE PRECOCE	VAZAMENTO DE MATERIAL	5	5	6	150
3	ACIONAMENTO DA RODA DE CAÇAMBA	MOTO REDUTOR	VAZAMENTO DE ÓLEO	PERDA DE LUBRIFICANTE	4	5	6	120
			FALHA NO ROLAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	3	72
			QUEBRA DO EIXO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	3	8	6	144
		PINHÃO	DESGASTE DO SEGMENTO DENTADO	PROBLEMA NA TRANSMISSÃO	3	5	3	45
		CORRENTE	DESGASTE PRECOCE	PROBLEMA NA TRANSMISSÃO	3	4	6	72
4	TRANSLAÇÃO (CARRO TROLLEY)	RODA DE TRANSLAÇÃO	DESGASTE FACIAL (NATURAL)	DESALINHAMENTO	4	4	6	96
			FALHA NO ROLAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	5	8	3	120
		ROLDANA DO CABO	FALHA NO ROLAMENTO	SUSPENDE A OPERAÇÃO	2	8	3	48
		TAMBOR ENROLADOR DE CABO	AFROUXAMENTO DO CABO	FALHA NO SISTEMA DE TRANSLAÇÃO	5	5	6	150
		TENSOR DO CABO	FALHA NA MOLA	FALHA NO SISTEMA DE TRANSLAÇÃO	5	4	6	120
5	LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	TUBULAÇÃO	VAZAMENTO	FALHA NA LUBRIFICAÇÃO DOS PONTOS	9	6	6	324
			ENTUPIMENTO	FALHA NA LUBRIFICAÇÃO DOS PONTOS	6	6	10	360
		RESERVATÓRIO DO LUBRIFICANTE	CONTAMINAÇÃO	PERDA DE QUALIDADE DE LUBRIFICANTE	7	7	8	392
			AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	FALHA NA LUBRIFICAÇÃO DOS PONTOS	5	8	8	320
		BOMBA CENTRIFUGA	BAIXA PRESSÃO	FALHA NA LUBRIFICAÇÃO DOS PONTOS	1	6	10	60

Fonte: Autoria Própria.

4.5 CLASSIFICAÇÃO DOS COMPONENTES POR CRITICIDADE

O critério para classificação da criticidade é baseado no estudo de DIAS (2018), em que é calculada a média dos valores do índice **RPN** e usa-se esse valor como uma linha de corte para priorizar os itens. Assim, a linha de corte é de:

$$\text{Linha de corte para criticidade} = \frac{\text{soma de todos os RPN's}}{\text{Quantidade de modos de falha}} = \mathbf{186}$$

Com isso, o critério de escolha dos itens a serem priorizados é ter o valor de RPN individual maior que a Média de todos os RPN's juntos. Desse modo, o valor da Média dos RPN's foi de **186**, e os índices que estiverem acima desse valor são considerados os de maior criticidade. Na **Tabela 15**, abaixo, são demonstrados os modos de falha mais críticos.

Tabela 15. Modos de falhas mais críticos, de acordo com linha de corte para o índice de RPN

Sistema	Subsistema	Modos de Falha	RPN>186
RODA DE CAÇAMBA	RODA DE APOIO	TEMPERATURA EXCEDENTE	288
		DESGASTE FACIAL (TRAVAMENTO)	336
		FALHA NO ROLAMENTO	288
	RODA DE ENCOSTO	DESGASTE FACIL (TRAVAMENTO)	240
		FALHA NO ROLAMENTO	336
	ESTRUTURA RADIAL INTERNA	FISSURAS / AVARIAS	240
	BALANCIM DA RODA DE APOIO	TRAVAMENTO	192
		QUEBRA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO EIXO	192
		DESLOCAMENTO DO EIXO	192
CHUTES CIRCULARES	ESTRUTURA	AVARIAS	240
LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	TUBULAÇÃO	VAZAMENTO	324
		ENTUPIIMENTO	360
	RESERVATÓRIO DO LUBRIFICANTE	CONTAMINAÇÃO	392
		AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	320

Fonte: Autoria Própria.

4.6 ANÁLISE DAS CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHAS

Para se analisar as causas fundamentais dos principais modos de falhas priorizados, foi utilizada a metodologia dos “5 Por quês”. Essa análise, como explica Costa e Mendes (2018),

busca as causas raízes das falhas com aplicação de até 5 por quês, porém a causa pode ser encontrada, até mesmo, antes de se realizar as 5 perguntas.

Tabela 16. Teste dos 5 Por quês para análise das causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos

Sistema	Subsistema	Modos de Falha	Por que?	Por que?	Por que?	Por que?	Por que? (Causa Fundamental)
RODA DE CAÇAMBA	RODA DE APOIO	TEMPERATURA EXCEDENTE	ELEVADO ATRITO NO ROLAMENTO	AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	LUBRIFICANTE NÃO CHEGA ATÉ O PONTO DE LUBRIFICAÇÃO	-	VAZAMENTO OU ENTUPIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.
		DESGASTE FACIAL	TRAVAMENTO DO ROLAMENTO	CONTAMINAÇÃO DO LUBRIFICANTE DO ROLAMENTO POR MINÉRIO	ACÚMULO DE MINÉRIO SOBRE A RODA DE APOIO	FUGA DE MATERIAL RECUPERADO	MÁ VEDAÇÃO DOS CHUTES
		FALHA NO ROLAMENTO	AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	LUBRIFICANTE NÃO CHEGA ATÉ O PONTO DE LUBRIFICAÇÃO	-	-	VAZAMENTO OU ENTUPIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.
	RODA DE ENCOSTO	DESGASTE FACIAL	TRAVAMENTO DA RODA	ACOMODAÇÃO DE MATERIAL NA CAIXA ONDE ESTÁ A RODA DE ENCOSTO	FUGA DE MATERIAL QUE CAI SOBRE A RODA	-	MÁ VEDAÇÃO DO CHUTE
		FALHA NO ROLAMENTO	AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	LUBRIFICANTE NÃO CHEGA ATÉ O PONTO DE LUBRIFICAÇÃO	-	-	VAZAMENTO OU ENTUPIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.
	ESTRUTURA RADIAL INTERNA	AVARIAS	CONTATO E ATRITO DA ESTRUTURA COM O MATERIAL A SER RECUPERADO	-	-	-	DETERIORAÇÃO NATURAL DEVIDO AO TEMPO DE USO
	BALANÇIM DA RODA DE APOIO	TRAVAMENTO	BUCHAS NÃO FORAM SUBSTITUÍDAS ANTES DA FALHA	NÃO HÁ CONTROLE SOBRE PERÍODO CORRETO PARA SUBSTITUIÇÃO	-	-	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL
		QUEBRA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO EIXO	BUCHAS NÃO FORAM SUBSTITUÍDAS ANTES DA FALHA	NÃO HÁ CONTROLE DO PERÍODO CORRETO PARA SUBSTITUIÇÃO	-	-	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL
		DESLOCAMENTO DO EIXO	BUCHAS NÃO FORAM SUBSTITUÍDAS ANTES DA FALHA	NÃO HÁ CONTROLE DO PERÍODO CORRETO PARA SUBSTITUIÇÃO	-	-	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL

Tabela 16. Teste dos 5 Por quês para análise das causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos

CHUTES CIRCULARES	ESTRUTURA	AVARIAS	ACÚMULO DE MATERIAL ENTRE O CHUTE E A VIGA TRANSVERSAL DA RODA DE CAÇAMBA	PARTE DO MATERIAL A SER RECUPERADO ESTÁ COM GRANULOMETRIA MAIOR DO QUE O RECOMENDÁVEL (<90mm)	MATERIAL COM GRANULOMETRIA MAIOR NÃO ESTÁ SENDO PROCESSADO CORRETAMENTE	-	ERRO NO PROCESSO DE BRITAGEM
LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	TUBULAÇÃO	VAZAMENTO	EXISTEM FUROS EM ALGUNS PONTOS NA TUBULAÇÃO	-	-	-	DETERIORAÇÃO NATURAL DEVIDO AO TEMPO DE USO
		ENTUPIIMENTO	LUBRIFICANTE CONTAMINADO	NO PROCESSO DE REABASTECIMENTO, O LUBRIFICANTE ESTÁ SENDO MANUSEADO INCORRETAMENTE	-	-	FALTA DE TREINAMENTO DA EQUIPE QUE REALIZA O REABASTECIMENTO
	RESERVATÓRIO DO LUBRIFICANTE	CONTAMINAÇÃO	NO PROCESSO DE REABASTECIMENTO, O LUBRIFICANTE ESTÁ SENDO MANUSEADO INCORRETAMENTE	NÃO ESTÁ SENDO SEGUIDO O PROCEDIMENTO RECOMENDADO PELO FABRICANTE	-	-	FALTA DE TREINAMENTO DA EQUIPE QUE REALIZA O REABASTECIMENTO
		AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	NÃO ESTÁ SENDO CONTROLADO O NÍVEL (PROTEÇÃO)	-	-	-	FALHA NA CHAVE DE NÍVEL MÍNIMO E MÁXIMO DO RESERVATÓRIO

Fonte: Autoria Própria

4.7 AÇÕES PROPOSTAS

Para se propor as ações pertinentes para tratar os modos de falhas críticos, a abordagem utilizada será de atacar, diretamente, as causas fundamentais. Como se verá na Tabela 17, algumas causas fundamentais podem ser resolvidas com ações rápidas, sem a necessidade de elaborar um plano de manutenção preventiva, por exemplo. Nos casos em que é necessário destrinchar mais as atividades, serão elaborados planos mais detalhados na seção 5.9 desse trabalho.

Tabela 17. Ações propostas para atuar nas causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos

Sistema	Subsistema	Modos de Falha	Por que? (Causa Fundamental)	Pontos da Causa	Ação	Característica da Ação	
RODA DE CAÇAMBA	RODA DE APOIO	TEMPERATURA EXCEDENTE	VAZAMENTO OU ENTUPIIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADO	PREDITIVA: ADOÇÃO DE ROTA DE INSPEÇÃO (CHECK LIST)	Proativa	
		DESGASTE FACIAL	MÁ VEDAÇÃO DOS CHUTES	CHUTE CIRCULAR	REDESENHO: MELHORAR VEDAÇÃO	Reativa	
		FALHA NO ROLAMENTO	VAZAMENTO OU ENTUPIIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADO	PREDITIVA: ADOÇÃO DE ROTA DE INSPEÇÃO (CHECK LIST)	Proativa	
	RODA DE ENCOSTO	DESGASTE FACIAL	MÁ VEDAÇÃO DO CHUTE	CHUTE CIRCULAR	REDESENHO: MELHORAR VEDAÇÃO	Reativa	
		FALHA NO ROLAMENTO	VAZAMENTO OU ENTUPIIMENTO DA TUBULAÇÃO; BAIXA PRESSÃO DO FLUÍDO.	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADO	PREDITIVA: ADOÇÃO DE ROTA DE INSPEÇÃO (CHECK LIST)	Proativa	
	ESTRUTURA RADIAL INTERNA	AVARIAS	DETERIORAÇÃO NATURAL DEVIDO AO TEMPO DE USO	ESTRUTURA RADIAL INTERNA	REDESENHO: RECONDICIONAMENTO ESTRUTURAL COM CHAPAS CALANDRADAS	Reativa	
	BALANCIM DA RODA DE APOIO	TRAVAMENTO	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL	BALANCIM	PREVENTIVA SISTEMÁTICA: TROCA BASEADA NO TEMPO	Proativa	
		QUEBRA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO EIXO	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL	BALANCIM	PREVENTIVA SISTEMÁTICA: TROCA BASEADA NO TEMPO	Proativa	
		DESLOCAMENTO DO EIXO	TRATA-SE DE UM ITEM NÃO INSPECIONÁVEL	BALANCIM	PREVENTIVA SISTEMÁTICA: TROCA BASEADA NO TEMPO	Proativa	
	CHUTES CIRCULARES	ESTRUTURA	AVARIAS	ERRO NO PROCESSO DE BRITAGEM	BRITAGEM (PROCESSO EXTERNO, ANTERIOR AO DA RECUPERADORA)	INFORMAR À ÁREA DE BRITAGEM SOBRE POSSÍVEIS FALHAS NO PROCESSO	Reativa

Tabela 17. Ações propostas para atuar nas causas fundamentais dos modos de falhas mais críticos

Sistema	Subsistema	Modos de Falha	Por que? (Causa Fundamental)	Pontos da Causa	Ação	Característica da Ação
LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	TUBULAÇÃO	VAZAMENTO	DETERIORAÇÃO NATURAL DEVIDO AO TEMPO DE USO	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADO	PREDITIVA: ADOÇÃO DE ROTA DE INSPEÇÃO (CHECK LIST)	Proativa
		ENTUPIMENTO	FALTA DE TREINAMENTO DA EQUIPE QUE REALIZA O REABASTECIMENTO	FALHA HUMANA (EQUIPE DE LUBRIFICAÇÃO)	REALIZAR TREINAMENTO DA EQUIPE PARA SEGUIR PROCEDIMENTO PREVISTO NO MANUAL	Reativa
	RESERVATÓRIO DO LUBRIFICANTE	CONTAMINAÇÃO	FALTA DE TREINAMENTO DA EQUIPE QUE REALIZA O REABASTECIMENTO	FALHA HUMANA (EQUIPE DE LUBRIFICAÇÃO)	REALIZAR TREINAMENTO DA EQUIPE PARA SEGUIR PROCEDIMENTO PREVISTO NO MANUAL	Reativa
		AUSÊNCIA DE LUBRIFICANTE	FALHA NA CHAVE DE NÍVEL MÍNIMO E MÁXIMO DO RESERVATÓRIO	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA	PREDITIVA: ADOÇÃO DE ROTA DE INSPEÇÃO (CHECK LIST)	Proativa

Fonte: Autoria Própria.

Portanto, foram identificados os pontos onde ocorrem cada causa fundamental (coluna de Pontos de causa da Tabela 17). Desse modo, consegue-se ver qual a raiz dos problemas ocorridos e propor soluções pertinentes. Alguns, como dito anteriormente, necessitam de ações de ajuste da atividade ou, até mesmo, de redesenho de projeto. Nesse caso, o programa MCC visa soluções reativas que mitiguem esses problemas. Todas as ações de característica reativa propostas foram necessárias por não ser viável realizar atividades proativas.

O critério definido para separação das atividades proativas e reativas é definido por meio do Diagrama de decisão proposto por Fogliatto e Ribeiro (2011), o qual pode-se ver na Figura 10 do subtópico 2.5.5 desse trabalho. Nesse diagrama, observa-se que as atividades proativas tem cunho dos tipos de manutenção preditiva (recuperação ou substituição baseada na condição) e preventiva (recuperação ou substituição programada). Dessa forma, os outros tipos de atividade que fogem dessas características são consideradas reativas.

Nos casos de redesenho, a necessidade é para corrigir falhas do projeto. A má vedação dos chutes, por exemplo, tem ocasionado fuga do minério que se acumulam nas rodas de apoio e de encosto, causando desgaste facial devido o material corroer a estrutura das rodas. Nesse sentido, algumas medidas estão sendo tomadas para desviar o fluxo do minério (com a instalação de calhas e proteções de borracha, por exemplo) para que não se tenha acúmulo do

material nas rodas, porém essas medidas tratam a consequência final da falha e não a causa raiz, por isso o problema não foi eliminado, portanto o ideal é que se faça um projeto para melhorar a vedação dos chutes. No caso da estrutura radial interna, o mesmo problema de vazamento de minério ocorre, ocasionando as avarias na estrutura devido ao tempo, assim um condicionamento da estrutura com chapas calandradas já está sendo realizado pelos responsáveis da área de manutenção.

Na situação das avarias dos chutes circulares, sabe-se que parte do material que está chegando a RC, vindo da área de Britagem, tem granulometria maior do que para qual a Recuperadora foi projetada para operar (<90mm), o que pode estar gerando danos nos chutes circulares da RC. Assim, conclui-se que esse é um problema externo e não há ações diretas há serem realizadas pelos responsáveis pela máquina. Nesse sentido, a ação a se fazer é expor esse problema para a área de Britagem da empresa poder verificar porque o material não está sendo processado corretamente.

Por fim, os problemas ocorridos devido ao manuseio incorreto do lubrificante podem ser resolvidos com a diligência de treinamento para a equipe de lubrificação responsável. O treinamento deve ser voltado para o cumprimento dos procedimentos mostrados no manual técnico do sistema de lubrificação, visto que estes procedimentos não estão sendo seguidos, atualmente, causando a contaminação do fluido devido a falhas humanas no manuseio.

Por outro lado, em caso de atividades proativas, o MCC visa elaborar a atividade com mais detalhes para que sejam verificados os procedimentos e, então, sejam propostos para a empresa e documentados. Na seção 5.9 são detalhadas as atividades proativas.

4.8 DOCUMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES PROATIVAS E BOAS PRÁTICAS

De acordo com a Tabela 17 (seção 4.7), as atividades proativas visam sanar as causas fundamentais ocorridas no **Sistema de Lubrificação Centralizada** e nos **Balancins**, os quais foram apontados como os pontos de ocorrência de diversos modos de falha da máquina e foram propostas ações preditivas e preventivas para eles, respectivamente.

4.8.1 Manutenção Preditiva para o Sistema de Lubrificação Centralizada

4.8.1.1 Checklist de Verificação do Sistema

A abordagem aqui será de adotar um checklist de manutenção, que é uma ação fundamental para ajudar no planejamento de manutenção dos componentes do sistema, ou seja,

as atividades serão realizadas baseadas na condição do equipamento. Esse processo garante que todos os passos foram dados corretamente para que os procedimentos a serem realizados garantam a qualidade e o bom funcionamento do maquinário. O checklist é viável em termos econômicos e de segurança, pois a máquina fica em modo *standby* com frequência, sendo possível realizar a rota de inspeção com a periodicidade programada e verificar possíveis problemas antes que ocorram.

Tabela 18. Proposta de Checklist para verificação de todo o Sistema de Lubrificação Centralizada

Item	Atividades	Periodicidade		
		D	S	M
1	Executar análise/aferição do sistema de lubrificação aos modos que detecte possíveis vazamentos, entupimentos e/ou baixa pressão do fluido lubrificante no sistema.			X
2	Limpar completamente todos os tubos de lubrificação, antes de adicionar graxa e antes do comissionamento.	X		
3	Verificar se não existem pontos de vazamento ao longo das tubulações de graxa.	X		
4	Verificar se não há danos ou partes faltantes na tubulação.	X		
5	Verificar se há graxa suficiente nos reservatórios.	X		
6	Garantir que o reservatório não contenha impureza, certifique que as conexões das linhas e da saída da bomba de lubrificação estejam devidamente apertadas.		X	
7	Certifique-se de que poeiras ou outras impurezas não entrem em contato com a graxa, durante essas operações de recarga, evitando a contaminação da graxa dos reservatórios.	X		

Fonte: Autoria Própria.

As periodicidades são:

- D: diária
- S: semanal
- M: mensal

4.8.1.2 Boas Práticas a Seguir

- Utilizar lubrificantes de alta qualidade recomendável pelo fabricante do equipamento.
- Armazenar os lubrificantes em recipientes fechados (de preferência em sua embalagem original).
- Manter os lubrificantes em local seco e fresco, livres de poeiras e/ou outros contaminantes.

- Observar o prazo de validade dos lubrificantes antes da sua respectiva utilização.
- Recipientes de lubrificação, ferramentas hidráulicas e bombas de graxa devem ser limpas antes de cada uso.
- Toda impureza deve ser removida da extremidade das ponteiros de lubrificação e da região em torno delas.
- Deve ser realizado um controle periódico dos lubrificantes e graxas utilizados em toda a máquina, com o objetivo de detectar possíveis contaminações ou elementos estranhos que possam causar danos nos sistemas, tais como, contaminação por minério de ferro, água, entre outros.

4.8.2 Manutenção Preventiva para os Balancins

4.8.2.1 Adoção de Preventiva Sistemática

Os balancins são componentes de características de difícil acesso para realização de inspeção, por isso foi adotada a manutenção preventiva sistemática para troca baseada no tempo. Atualmente, não há critérios para realização da troca dos balancins, o que contribui para que os itens falhem por término de vida útil, em virtude que a inspeção detectiva não consegue averiguar possíveis falhas. Tendo isso em vista, e considerando que os balancins são componentes não inspecionáveis, se faz necessário definir uma periodicidade para troca desse componente.

Tabela 19. Atividades recomendadas para serem aplicadas no planejamento de manutenção dos balancins

Atividade	Objetivo
Criar MP para substituição do balancim a cada 3 anos	Evitar falhas por término de vida útil.
Criação de código de compra no sistema para balancim	Garantir a disponibilidade de sobressalente
Garantir em estoque dois conjuntos completos sobressalentes (balancim, roda de apoio, pinos e buchas)	Substituição imediata caso necessário
Recondicionamento do conjunto balancim após sua substituição.	Utilizar caso tenha ocorrência de falha antes da compra dos novos conjuntos.

Fonte: Autoria Própria.

4.8.2.2 Boas Práticas a Seguir

Após a implantação da MP (manutenção preventiva) no sistema, cria-se a obrigatoriedade do cumprimento da referida manutenção, sendo necessário todos os procedimentos que antecedem a execução da atividade, tais como: planejamento da manutenção, provisionamento dos itens necessários e a programação da manutenção. A atividade de substituição será feita independente do atual estado do componente, sendo executado a manutenção periódica e não por condição.

Através da criação do código de compra para balancim no sistema de gerenciamento, irá facilitar o processo, agilizando a compra de novos itens e garantindo a disponibilidade de sobressalentes. Com os itens sobressalentes adquiridos, todo o processo de manutenção na recuperadora que diz respeito a falha no balancim se tornará muito mais ágil.

Se faz necessário, então, o recondicionamento do conjunto balancim que foi substituído por um novo, pela ocasião de uma possível falha do componente novo antes do tempo previsto para se adquirir os novos sobressalentes. Agilizando a substituição e minimizando o impacto da produção devido ao tempo de interrupção para a atividade de manutenção.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A importância da Recuperadora de Minério Tipo Ponte estudada explica-se por ela ser um ativo essencial no processo produtivo no qual está inserida, principalmente por ter a função de regularizar o envio do minério para o processo que sucede a estocagem, evitando a queda na taxa de produção por ventura de alguma falha no processo de extração e britagem da mina. Sendo assim, a ocorrência de uma parada não programada da RC impacta diretamente na produtividade, o que mostra a importância do ativo na planta.

Em busca de melhores índices de confiabilidade para a Recuperadora de Minério, a proposta de adoção da metodologia MCC teve a pretensão de trazer uma visão estratégica para soluções de problemas, com alguns passos predefinidos para aplicação do método, que seguiam: montagem de uma equipe de trabalho, coleta de dados da máquina, estudo das falhas e suas causas e, por fim, propostas de ações para eliminar ou amenizar os problemas.

Sendo assim, A equipe de profissionais envolvida no levantamento dos dados, conseguiu transmitir as informações iniciais necessárias para o desenvolvimento do estudo em questão, agregando valor ao trabalho com a experiência repassada. Através das informações levantadas com a equipe, acrescida de dados obtidos em sistemas da empresa e com o uso de ferramentas de gestão, foi desenvolvido o FMEA, em busca dos modos e efeitos de falha, assim como a probabilidade de risco (RPN) para cada subsistema. Ademais, com uso da metodologia dos 5 porquês foi possível encontrar as causas raízes das falhas com maior criticidade.

Desse modo, foram elaboradas ações viáveis para solucionar essas falhas. Algumas foram de caráter reativo, mas houveram ações proativas necessárias, também. As proativas foram propostas para os sistemas que estão gerando mais problemas na máquina (de acordo com a análise dos 5 Porquês), que são o Sistema de Lubrificação Centralizado e os Balancins.

Para o sistema de lubrificação, identificou-se que os problemas ocorridos nele estão acarretando em diversos dos modos de falha levantados na planilha FMEA. Dessa forma, foi elaborada e proposta a atividade proativa de inspeção com base em um checklist, com rotas de verificação diárias, semanais ou mensais, assim como boas práticas para que essas atividades sejam cumpridas de forma eficiente.

Para os balancins, que tem características de serem itens não inspecionáveis, foi necessário estabelecer atividades preventivas de troca baseada no tempo de utilização, assim tentando prever falhas e evitar paradas não programadas por conta desse componente. Para

gerar essas atividades sistemáticas, também foi proposto informações quanto a peças sobressalentes necessárias para realização da troca, intervalo de trocas e ações de segurança (como recondicionar o balancim trocado e mantê-lo em estoque), bem como as boas práticas para que sejam cumpridos os requisitos dessa manutenção.

Em suma, com a estratificação das informações obtidas com uso das ferramentas (FMEA, Teste dos 5 Porquês, entre outras), tornou-se possível a elaboração de atividades de manutenção proativas em componentes específicos, de maneira que seja possível prever eventuais falhas e, além disso, recomendar procedimentos preventivos. Com adoção destas medidas, a probabilidade de ocorrência de manutenção corretiva não programada será menor, pois a Recuperadora de Minério poderá operar com maior confiabilidade e garantia de cumprir suas funções primárias.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para melhorar, cada vez mais, os aspectos de confiabilidade da máquina, ficam como sugestões para trabalhos futuros as seguintes abordagens:

- Aplicar as atividades propostas neste trabalho e verificar os impactos disso na confiabilidade da máquina;
- Realizar estudo dos impactos das paradas não planejadas da Recuperadora, em relação a custos referentes a perda de produção e atividades de manutenção realizadas;
- Elaborar ferramenta e atividades para coletar dados de falhas em cada subsistema da máquina, para que seja possível traçar curvas de confiabilidade e elaborar planos de manutenções baseadas nesses dados;
- Fazer uma análise aprofundada do sistema de lubrificação centralizado, seus componentes e eficiência em garantir a lubrificação de todos os pontos que necessitam do fluido.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção Mecânica Industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Érica Ltda., 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, p. 3. 1994
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Reference Manual**. 4ª Ed., 2008
- BEZERRA, F. **Diagrama de Ishikawa – Causa e efeito**. Portal da Administração, 2014. Disponível em: <<http://www.portal-administracao.com/2014/08/diagrama-de-ishikawa-causa-e-efeito.html>> Acesso em: 20/01/2020.
- COSTA, Taiane Barbosa da Silva; MENDES, Meirivone Alves. **Análise da causa raiz: utilização do diagrama de Ishikawa e Método dos 5 Porquês para identificação das causas da baixa produtividade em uma cacauicultura**. Anais do X SIMPROD, 2018.
- DHILLON, B. S. **Maintainability, maintenance and reliability for Engineers**. 1ª. ed. New York: CRC Press, 2006.
- DIAS, S.O. **Aplicação de ferramenta FMEA para análise de falhas de uma máquina empilhadeira/recuperadora**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí. Tucuruí, Pará, 2018.
- ENGETELES. **FMEA: que é e como fazer**. 2017a. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/fmea-o-que-e-comofazer/>>. Acesso em: 18/01/2020
- ENGETELES. **Metodologia 8D – Processo de Solução de Problemas**. 2017b. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/metodologia-8d/>>. Acesso em: 20/01/2020
- FILHO, Gil Branco. **Dicionário de termos técnicos de manutenção e confiabilidade**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2000.
- FOGLIATTO, Flávio S.; RIBEIRO, José Luis D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011
- GUZZON, Samanta de Oliveira. **Proposta de análise quantitativa de confiabilidade a partir de dados qualitativos provenientes da FMEA**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total: à maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Campos, 1993.
- JURAN, Joseph M.; GODFREY, A. Blanton. **Juran's Quality Handbook**. 5ª Ed., New York: McGraw-Hill, 1999.
- KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. 3ª ed., Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2001.
- MARÇAL, R. F. M. **Gestão da Manutenção**. Ponta Grossa: Programa de Especialização em Gestão Industrial com ênfase em Produção e Manutenção (ESPGESTIND-PM), 2008.
- MIRSHAWKA, V. **Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos**. 1ª ed. São Paulo: Makron Books, McGrawHill, 1991.
- MOBLEY, R. K; HIGGINS L. R.; WIKOFF, D. J. **Maintenance Engineering Handbook**. 7ª Ed., McGraw-Hill, 2008.
- MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance: second edition**. 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.
- OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Ponta Grossa: Revista Gestão Industrial, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008.
- PEREIRA, Mário J. **Engenharia de Manutenção - Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.
- ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A; AMARAL, D. C; TOLEDO, J. C; SILVA, A. L. da; ALLIPRANDINI, D. H; SCALICE, R. K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.
- SANTANNA, Annibal Parracho; JUNIOR, Roberto Paulo da Silva Pinto. **Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA**. Sistemas & Gestão, v. 5, n. 3, p. 179-191, dez. 2010.

- SELLITTO, Miguel Afonso. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. Production, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.
- SHIBA, S.; GRAHAM, A.; WALDEN, D. **TQM: Quatro Revoluções Na Gestão da Qualidade**. Artes Médicas, Porto Alegre, 1997.
- SMITH, Anthony M.; HINCHCLIFFE, Glenn R. **RCM – Gateway to World Class Maintenance**. Elsevier Inc., 2004.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes**. 1999.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **JA1012: A guide to reliability-centered maintenance (RCM) Standard**. 2002.
- STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. New York: ASQC, 1995.
- TAVARES, Lourival Augusto. **Administração moderna da manutenção**. Rio de Janeiro: Novo Polo, 1999.
- THYSSENKRUPP FÖRDERTECHNIK L. T. **Manual de Manutenção Recuperadora de Roda de Caçamba Tipo Ponte: RC-3011KN-01 – DF-MM-3011KN-M-532-M-001REV 0**. 2011.
- VAZ, José Carlos. **Gestão da Manutenção Preditiva: Gestão de Operações**. Fundação Vanzolini. Ed. Edgard Blücher, 1997.
- VIANA, Herbert R. G. **PCM-Planejamento e Controle da manutenção**. Qualitymark Editora Ltda, 2002.
- WEISS, A.E. **Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know**. Grã-Bretanha: Pearson Education Limited, 2011.
- XAVIER, Júlio Nascif. **Manutenção – tipos e tendências**. Relatório Técnico TECÉM, 2005.
- XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial, v. 171, 1998.