



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



FREDERICO ROCHA SOARES

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE FALHAS PARA BOMBAS DE DESLOCAMENTO
POSITIVO: O CASO DE UMA EMPRESA DO SETOR DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG

2021

FREDERICO ROCHA SOARES
soaresr.itaobim@gmail.com

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Ouro Preto como requisito para a obtenção do título
de Engenheiro Mecânico

Professor orientador: DSc. Washington Luis Vieira
da Silva

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S676s Soares, Frederico Rocha .
Sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento
positivo [manuscrito]: o caso de uma empresa do setor de mineração. /
Frederico Rocha Soares. - 2021.
78 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Vieira Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto,
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Bomba Hidráulica - Manutenção. 2. Bomba Hidráulica - Análise de
Falha. 3. Bomba Hidráulica - Bomba de deslocamento positivo. I. Silva,
Washington Luis Vieira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Frederico Rocha Soares

Sistema de Tratamento de Falhas para bombas de deslocamento positivo: o caso de uma empresa do setor de mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 31 de março de 2021

Membros da banca

DSc. Washington Luis Vieira da Siva - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Ph.D Elisangela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luis Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/04/2021



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/04/2021, às 09:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0157467** e o código CRC **FC73720E**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003286/2021-13

SEI nº 0157467

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Dedico esse trabalho à toda a minha família de sangue e de coração
Pelo exemplo e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos que vêm distribuindo em minha vida, pela força para encarar as dificuldades mundanas e pela garra para seguir em frente a cada novo dia. Agradeço a toda minha família pelo apoio incondicional, ao meu pai Ademilson Pereira Soares, minha mãe Maria Ireni Neres Rocha, meu irmão Mateus Rocha Soares e a minha irmã Amannda Paula Rocha Soares – vocês foram e são a minha base. Agradeço ao meu orientador Washington Luis Vieira da Silva por toda instrução e trocas de conhecimento. Agradeço a UFOP e a Escola de Minas por todo o apoio e ensino para a realização desse trabalho.

“Mil cairão ao teu lado, e dez mil a tua direita, mas tu não serás atingido.”

Salmo 91.

RESUMO

SOARES, Frederico Rocha. Estudo do desenvolvimento de um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo de uma empresa do setor de mineração, 2021. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

Este estudo tem como objetivo desenvolver um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo de uma empresa do setor de mineração. Para tanto o trabalho teve como base teórica a manutenção e seus tipos, ferramentas de manutenção, sistema de tratamento de falhas e um estudo sobre bombas de deslocamento positivo. Além disso, apresenta-se uma metodologia de natureza qualitativa, exploratória, bibliográfica e estudo de caso para a realização do diagnóstico das causas que acarretaram as falhas das bombas de deslocamento positivo. Tais bombas são responsáveis por realizar o transporte da polpa de minério de ferro da mina ao porto, dessa forma, são caracterizados como ativos críticos para a operação do mineroduto da empresa de mineração devendo possuir alta disponibilidade. A tabulação dos dados foi feita em uma planilha do Microsoft Excel e foi utilizado o Microsoft Word para relatar e discutir os resultados obtidos. A partir das causas fundamentais da falha avaliadas pela ferramenta “Diagrama de causa e efeito”, podendo-se destacar dentre as principais causas fundamentais avaliadas pela equipe da manutenção a falha na montagem das válvulas HV e a falha no sistema de sede/válvula dos blocos da sucção/descarga - pôde-se partir para a investigação das causas raízes de cada causa fundamental por meio da ferramenta “Método dos 5 Porquês”. Para cada causa raiz foi estabelecido uma contramedida para eliminar/atenuar os efeitos do modo de falha por meio de um plano de ação 5W1H. As principais contramedidas planejadas pela equipe da manutenção foram verificar a linha de transmissão de ar das HV’s e inspecionar as sedes das válvulas de sucção e descarga. Com a elaboração do sistema de falhas (identificação e priorização dos modos de falha, coleta de dados, avaliação dos dados coletados, busca das causas raízes para cada causa fundamental encontrada e planejamento das contramedidas para cada causa raiz) espera-se reduzir as paradas emergenciais, aumentando a disponibilidade do equipamento que resultará em uma redução no custo e aumento na produtividade da empresa.

ABSTRACT

SOARES, Frederico Rocha: Study of the development of a fault treatment system for positive displacement pumps from a mining company, 2021. Monograph. (Bachelor Degree in Mechanical Engineering). Universidade Federal de Ouro Preto.

This study aims to develop a fault treatment system for positive displacement pumps from a mining company. For this purpose, the study was based on the maintenance and its types, maintenance tools, failure treatment system and a case study on positive displacement pumps. The work presents a methodology of a qualitative, exploratory, bibliographic nature and case study for the diagnosis of the cause of failures of the positive displacement pumps. Such pumps are responsible for transporting the iron ore slurry from the mine to the port, thus, they are characterized as critical assets for the operation of the mining company's pipeline and must have high availability. The data were tabulated on a Microsoft Excel spreadsheet and Microsoft Word was used to report and discuss the results obtained. Based on the fundamental causes of failure evaluated by the tool "Diagram of cause and effect" - among the main fundamental causes evaluated by the maintenance team, the failure in the assembly of the HV valves and the failure in the seat / valve system of the blocks suction / discharge - it was possible to investigate the root causes of each fundamental cause using the tool "Method of the 5 Whys". For each root cause, a countermeasure was established to eliminate / mitigate the effects of the failure mode through a 5W1H action plan - the main countermeasures planned by the maintenance team were to check the air transmission line of the HV valves and inspect the suction and discharge valve seats. With the elaboration of the failure system (identification and prioritization of failure modes, data collection, evaluation of collected data, search for root causes for each fundamental cause found and planning of countermeasures for each root cause), it is expected to reduce downtime. emergency, increasing the availability of equipment that will result in cost reduction and increase in company productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação dos recursos na manutenção (%).	25
Figura 2 - Etapas para elaboração de uma análise FMEA.....	27
Figura 3 - Etapas para realização da metodologia RCFA	29
Figura 4 - Ciclo PDCA.	30
Figura 5 - Diagrama de Causa e efeito	32
Figura 6 - Fluxograma de funcionamento dos 5 Porquês.....	33
Figura 7 - O círculo vicioso das falhas.	36
Figura 8 – Etapas para elaboração de uma análise de falhas.....	37
Figura 9 - Sistemática de funcionamento de um sistema de tratamento de falhas segundo a metodologia PDCA.	40
Figura 10 - bomba de deslocamento positivo rotativa de engrenagens.....	41
Figura 11 - Desenho de um conjunto de uma bomba GEHO TZPM	42
Figura 12 - Princípio de trabalho curso de sucção.....	43
Figura 13 - Princípio de trabalho Curso de descarga.....	44
Figura 14 - Válvulas HV	44
Figura 15 - Sistema de comando automático do líquido propulsor.....	45
Figura 16 - Identificação dos corpos do diafragma.	46
Figura 17 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizados.	50
Figura 18 - Pelotas de minério de ferro.	58
Figura 19 - Faixa de extensão do mineroduto.	59
Figura 20 - Organograma GMI.....	60
Figura 21 – Bomba Geho TZPM 2000 na estação de bombas 4.	61
Figura 22 - Fluxograma de informações para relato de falha.....	63
Figura 23 - Nota de manutenção para a bomba 214BP001.	64
Figura 24 - Tempo de experiência participantes brainstorming.....	66
Figura 25 - Diagrama de causa e efeito.	67
Figura 26 - Etapas para elaboração do plano de ação.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nível de atuação no Brasil.....	24
Tabela 2 - Variáveis e indicadores adotados.	52
Tabela 3 - Tabela para coleta de dados durante reuniões de brainstorming.....	54
Tabela 4 - Características de Operação da Bomba GEHO TZPM 2000.	55
Tabela 5 - Dados e identificação da bomba e do projeto.....	55
Tabela 6 - Planilha para elaboração do método dos Porquês.	56
Tabela 7 - Planilha para elaboração do plano de ação.....	56
Tabela 8 - Controle de velocidades das bombas Geho TZPM 2000.	62
Tabela 9- Dados coletados na fase de brainstorming.	64
Tabela 10 - Elaboração do método dos 5 Porquês.....	68
Tabela 11 - Causas raízes encontradas com base na ferramenta dos 5 Porquês.....	69
Tabela 12 - Plano de ação.....	70

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

FMEA – Failure mode and effects analysis

NBR – Norma Brasileira

PDCA – Plan-Do-Check-Act

RCFA - Root Cause Failure Analysis

5WIH – What-Where-When-Why-Who-How.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Formulação do Problema.....	15
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Geral	18
1.3.2	Específicos.....	18
1.4	Estrutura do Trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Manutenção	20
2.2	Métodos de Manutenção	22
2.2.1	Manutenção Corretiva	23
2.2.2	Manutenção Preventiva	24
2.2.3	Manutenção Preditiva.....	25
2.3	Ferramentas de manutenção	26
2.3.1	FMEA	27
2.3.2	RCFA.....	28
2.3.3	Ciclo PDCA.....	29
2.3.4	Reuniões de <i>Brainstorming</i>	30
2.3.5	Diagrama de Ishikawa	31
2.3.6	Análise dos 5 Porquês	33
2.3.7	Metodologia 5W1H	34
2.4	Sistema de tratamento de falhas	34
2.4.1	Círculo Vicioso das Falhas	35
2.4.2	Sistemática de funcionamento da análise de falha	37
2.5	Bombas de deslocamento positivo	40
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	Tipo de Pesquisa	48
3.2	Materiais e Métodos	49
3.3	Variáveis e indicadores	52
3.4	Instrumento de coleta de dados.....	53

3.5	Tabulação de Dados	57
3.6	Considerações Finais do Capítulo	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Caracterização da empresa	58
4.2	Descrição das bombas de deslocamento positivo	60
4.3	Diagnóstico do sistema de tratamento de falha.....	62
4.3.1	Elaboração do sistema de tratamentos de falhas	62
4.3.2	Registro da ocorrência da falha	63
4.3.3	Investigação das causas fundamentais da falha.....	64
4.4	Proposta do sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo.....	70
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
5.1	Conclusões	74
5.2	Recomendações	74
6	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema proposto, a fim de promover uma familiarização com o problema que impulsionou o mesmo. A seguir tem-se uma descrição da formulação do problema, da justificativa, dos objetivos e da estrutura do trabalho que foi desenvolvido.

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Xenos (1998), o grande avanço tecnológico, o desaparecimento das fronteiras, a incorporação da sustentabilidade e a responsabilidade social dentro das empresas são fatores indicativos da evolução da economia mundial. Aliado a isso, segundo o mesmo autor, há um aumento da concorrência entre as organizações para um atendimento cada vez mais eficiente ao mercado consumidor, forçando-as a desenvolverem continuamente os seus processos produtivos a fim de garantir o aumento da eficiência produtiva, qualidade e redução de custos.

Sendo assim, com tamanha necessidade de produção de forma rápida, a manutenção surge como uma estrutura organizacional independente à da operação com o foco na prevenção de avarias, para a garantia da produção de bens e serviços de alta qualidade, com baixo custo de produção (OTANI, MACHADO, 2008). Segundo a NBR 5462 de 1994, o termo manutenção pode ser definido como a combinação de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Dessa forma, a manutenção ocupa um papel crucial para o aumento da eficiência de um processo produtivo, visto que a disponibilidade dos recursos está diretamente relacionados ao rendimento deste processo, e a manutenção passa a ser um conjunto de procedimentos realizados para a maior qualidade e garantia de desempenho dos ativos de uma empresa (VIANA, 2002).

Em todo processo industrial, diversos fatores podem ocasionar falhas aos equipamentos. Logo, para Moubray (2000), tais falhas podem ser inseridas no projeto, seja por erros de concepção, interpretação ou execução. O mesmo autor destaca ainda que em diversas situações há um aumento na probabilidade de ocorrência de falhas, tais como:

condições operacionais destoantes das especificadas; operação inadequada dos equipamentos; vida útil excedida dos materiais; e a própria manutenção quando realizada de forma incorreta pode levar a falhas catastróficas dos ativos, a menores índices de disponibilidade e confiabilidade de operação da planta industrial, gerando perda de faturamento.

Nesse contexto, com o objetivo de minimizar o número de falhas industriais e consequentemente maximizar a eficácia do processo de manutenção é necessário utilizar-se de uma metodologia de análises de falhas eficiente para atingir a causa fundamental (causa raiz) de cada falha por meio de ações de bloqueio bem estruturadas (PASSAMAI *et al*, 2007).

Segundo Sharma e Sharma (2010), a análise de falhas é uma ação planejada que visa prevenir e avaliar não conformidades em processos, com base em falhas já ocorridas, afim de bloquear a recorrência destas. Dessa forma, ainda segundo o autor, a análise de falhas, quando bem empregada auxilia até mesmo na tomada de decisões a nível gerencial para a tratativa das causas fundamentais das falhas. Dentre as várias ferramentas existentes para análise, destacam-se: RCFA (*Root Cause Failure Analysis*) conhecida como Análise de Causa Raiz da Falha, FMEA (*Failure mode and effects analysis*) conhecida como Análise do Modo e Efeito da Falha, o diagrama de causa e efeito, as reuniões de *brainstorming*, a análise dos 5 Porquês (PASSAMAI *et al*, 2007). Ainda conforme o autor, todas essas ferramentas são amplamente usadas pelos setores industriais por gerarem ações de bloqueio às causas fundamentais das falhas encontradas.

Tendo em vista tantas vantagens advindas do emprego da análise de falhas no setor industrial, será desenvolvido um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo, com base na ferramenta RCFA, na Gerência de Mineroduto (GMI) de uma empresa do setor de mineração, a fim de otimizar o processo de manutenção das bombas principais.

De acordo com Chaves (2002) e Bozolla (2020), o mineroduto pode ser definido como um modelo de escoamento de sólidos granulares misturado com um líquido, geralmente água, que funciona como um veículo de transporte. Como exemplo de sólidos granulares pode-se citar o minério de ferro, minério de cobre, rejeitos de beneficiamento, dentre outros materiais granulares. Dados fornecidos pela empresa destacam que o transporte da polpa de minério de ferro apresenta uma composição de 70% de sólidos e 30% de água, por 396 quilômetros. Outra informação importante é que o transporte realizado da polpa dura é de aproximadamente de 60 horas, com uma velocidade média de 6 km/h.

O bombeamento da polpa de minério de ferro é feito através de bombas de deslocamento positivo (bombas específicas para bombear líquidos pesados e viscosos a altas pressões de recalque) e como estão diretamente ligadas ao processo produtivo da empresa, é necessário que estejam sempre em perfeitas condições de operação. Para isso, é interessante que a manutenção destes equipamentos seja a mais eficaz possível para garantir altos índices de disponibilidade, com alta confiabilidade.

Diante do exposto, o presente trabalho se dispõe a estudar o emprego de uma metodologia de análise de falha para as bombas de deslocamento positivo da Gerência de Mineroduto de uma empresa de mineração. Tais equipamentos estão apresentando comportamento anormal durante momentos distintos da operação com água. Dessa forma, o emprego adequado de uma metodologia de análise de falhas irá garantir o cumprimento das metas de disponibilidade destes equipamentos, através da análise da seguinte problemática:

Como desenvolver um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo de uma empresa do setor de mineração?

1.2 Justificativa

Nos mais diversos processos industriais, vários fatores podem ocasionar falhas nos equipamentos. Sendo assim, o setor de manutenção torna-se importante no que tange o contexto operacional da empresa. No atual cenário de competitividade de mercado, é inaceitável pensar a realidade de uma empresa apenas no que diz respeito a seu processo produtivo, pois é preciso aliar altos índices de disponibilidade e confiabilidade de equipamentos para assegurar concorrência com o mercado produtor e consequente faturamento da empresa (PASSAMAI *et al*, 2007).

Para Slack *et al* (2002), a confiabilidade pode ser entendida como a capacidade de entregar um produto em tempo acordado aos seus consumidores.

Dessa forma, com o objetivo de garantir a satisfação dos clientes, as organizações estão buscando aumentar os índices de confiabilidade de seus produtos e/ou serviços, por meio da redução de falhas nas operações e na cadeia produtiva, através de métodos e ferramentas de confiabilidade (MOUBRAY, 2000).

Dentre essas ferramentas, encontram-se as técnicas de análises de falhas. Essas técnicas, basicamente, identificam causas ou origens do problema, sugerem uma ação de

bloqueio e solução dos problemas que impactam negativamente a confiabilidade de equipamentos e instalações (PASSAMAI *et al*, 2007).

Dessa forma, com base nas vantagens advindas da utilização das técnicas de análise de falhas para o setor industrial, principalmente no que tange o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos ativos, o presente trabalho se justifica por desenvolver um estudo de análise de falha adequado ao problema das bombas de deslocamento positivo que possivelmente poderá assegurar o rendimento desses ativos e do processo de bombeamento da polpa de minério de ferro através do mineroduto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo de uma empresa do setor de mineração.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo teórico sobre manutenção, métodos de manutenção, sistema de tratamento de falhas, ferramentas de Manutenção e bombas de deslocamento positivo;
- Elaborar um procedimento metodológico para realizar o diagnóstico das causas que acarretam as falhas das bombas de deslocamento positivo;
- Aplicar as ferramentas de manutenção para o estudo das bombas de deslocamento positivo;
- Comparar a base teórica com os dados obtidos para desenvolver um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos como forma de organizar a abordagem de todo o conteúdo a ser explorado.

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica de cada objeto de estudo envolvido na análise técnica, como a manutenção, métodos de manutenção, sistema de tratamento de falhas, ferramentas de Manutenção e bombas de deslocamento positivo;

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa para realizar o diagnóstico das causas que acarretam as falhas das bombas de deslocamento positivo. Nesta etapa é detalhada as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados das análises realizadas através da comparação entre a base teórica e os dados obtidos por meio das ferramentas de manutenção voltadas para o tratamento de falhas. Além disso, é desenvolvido um sistema de tratamento de falhas para as bombas de deslocamento positivo.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões referentes à análise realizada e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo é realizada uma fundamentação teórica acerca da manutenção, métodos de manutenção, sistema de tratamento de falhas, ferramentas de manutenção e bombas de deslocamento positivo.

2.1 Manutenção

De acordo com Viana (2002), o termo manutenção, palavra derivada do latim *manus teres*, que significa manter o que se tem, está presente na história humana há eras, desde quando o homem começou a manusear instrumentos de produção. Para Tavares (1998), a história da manutenção acompanha o desenvolvimento técnico industrial da humanidade.

Dessa forma, segundo Xenos (1998), a manutenção surge efetivamente como função do organismo produtivo no século XVI, com a aparição dos primeiros teares mecânicos, época marcada não só pelo abandono do modo de produção artesanal, mas também pelo início de um processo de acumulação de capitais com a coexistência de formas antagônicas e diversas de produção. Portanto, nesse período, de acordo com Viana (2002), surge o conceito de operadores mantenedores, onde o fabricante do maquinário treinava os novos operários para operar e manter o equipamento, não havendo assim uma equipe específica para a manutenção.

Sendo assim, não basta apenas ter instrumentos de produção, é preciso saber usá-los de forma racional e produtiva (XENOS, 1998).

No final do século XIX, após o fim da primeira guerra mundial, a revolução industrial proporcionou a mecanização e, conseqüentemente, o avanço tecnológico dos processos de produção, devido não só à novas técnicas de planejamento de serviços, implementadas por Frederick Taylor, mas também à introdução de linhas de produção por Henry Ford (VIANA, 2002). Tais evoluções nos processos de organização produtiva, provocaram uma expansão na capacidade de produção de bens de consumo da humanidade, já que foi possível uma racionalização nas formas de trabalho, propiciando a otimização do setor industrial, aperfeiçoando funções e reduzindo o tempo de execução de atividades (TAVARES, 1998). Dessa forma, devido aos programas mínimos de produção, criaram-se equipes para efetuar reparos em maquinários no menor tempo possível (OTANI & MACHADO, 2008).

No entanto, para Viana (2002), foi apenas durante a Segunda Guerra Mundial que a manutenção se firmou como necessidade absoluta, já que ocorreram avanços nas técnicas de planejamento, organização e controle das tomadas de decisões. Portanto, com a necessidade da produção de forma rápida, a manutenção veio a compor uma estrutura independente e tão importante quanto à da operação, pois a alta administração industrial necessitava não só corrigir as falhas, mas era necessário evitar que elas ocorressem, ou seja, prevenir as avarias. (OTANI & MACHADO, 2008). Viana (2002, p.5) complementa que: “a manutenção não pode se limitar apenas a corrigir problemas cotidianos, mas deve perseguir sempre a melhoria constante, tendo como norte o aproveitamento máximo dos instrumentos de produção, aliado ao defeito zero”.

O termo manutenção só veio a surgir, de fato, em 1950, nos Estados Unidos, denotando a ideia de manter em bom funcionamento todo e qualquer equipamento, ferramenta ou dispositivo (VIANA, 2002). Nesse mesmo período na Europa, tal termo ocupou aos poucos os espaços nos meios produtivos, em detrimento da palavra conservação (TAVARES, 1998), porém, denotando ainda a mesma ideia.

De acordo com Kardec e Nascif (2013) até o início da década de 1990, era consenso no meio industrial que a manutenção objetivava apenas garantir a disponibilidade dos instrumentos de produção, aliando a isso o baixo custo de trabalho e índices de acidentes compatíveis com a legislação vigente. Ainda segundo o autor, apenas em 1994, que o termo manutenção foi definido pela NBR 5462 como a combinação de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Logo, segundo Viana (2002), o século XX foi um período em que ocorreu significativa expansão na capacidade de produção da humanidade devido às evoluções no campo da tecnologia. Tais avanços, de acordo o autor, ao mesmo tempo em que propiciaram o aumento na produção, também tornaram os bens de consumo facilmente substituíveis por produtos semelhantes, porém, aperfeiçoados tecnologicamente, como é o caso dos aparelhos de televisão.

Além disso, tamanha obsolescência não ficou restrita apenas aos bens de consumo, fábricas inteiras, ou até mesmo um setor industrial completo podem se tornar ultrapassados tecnologicamente em poucos anos, por não acompanharem a exigência do novo mercado consumidor que exige produtos cada vez mais sofisticados (VIANA, 2002).

Atualmente, no século XXI, para um atendimento cada vez mais eficiente das exigências do mercado consumidor, as empresas estão desenvolvendo continuamente os seus processos produtivos (MOUBRAY, 2000).

Para atender tamanha exigência, a manutenção necessita desenvolver cada vez mais os seus métodos e sistemas de gerenciamento para garantir a produção de bens e serviços de alta qualidade, aliados a um baixo custo de produção para garantir a sobrevivência da empresa no mercado, com segurança e respeito ao meio ambiente. (MOUBRAY, 2000)

Recentemente, para Passamai e Castilho (2007), a manutenção não se limita apenas à garantia de disponibilidade dos instrumentos. A mesma se faz presente em todas as etapas das atividades do ciclo de vida dos instrumentos, desde a fase de implementação das instalações, participação do projeto, da montagem e de qualquer outra etapa ligada aos equipamentos. Com isso, segundo o autor, surge o conceito de que a manutenção é responsável pelos ativos da empresa, de maneira ampla.

Dessa maneira, não é possível padronizar os objetivos da manutenção, de forma que possam atender a todas as empresas, pois os mesmos variam de acordo com cada empresa, com seus ramos de atuação, com seu mercado consumidor e, principalmente, com os interesses e diretrizes dos seus controladores (PASSAMAI e CASTILHO, 2007).

No próximo tópico são explicados cada um dos métodos de manutenção, os quais podem ser entendidos, segundo Viana (2002), como as formas que são encaminhadas as intervenções nos instrumentos de produção. Para o autor, os métodos de manutenção são classificados em: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

2.2 Métodos de Manutenção

A Associação Brasileira de Manutenção – ABRAMAN (2001), no documento intitulado “A situação da Manutenção no Brasil”, criou uma terminologia de manutenção para classificar os tipos de manutenção. Tal terminologia é feita com base nos questionários realizados pela associação a cada dois anos nas empresas brasileiras.

Segundo Passamai e Castilho (2007), tais questionários servem ainda como um indicador de desempenho da manutenção brasileira, permitindo assim que as empresas comparem seus indicadores de manutenção com os indicadores disponibilizados pela ABRAMAN.

De acordo com o documento disponibilizado pela ABRAMAN (2001), todos os serviços de manutenção dos equipamentos em três grupos:

- Manutenção Preventiva por Tempo;
- Manutenção Preventiva por Estado;
- Manutenção Corretiva.

Apesar de tais classificações, neste trabalho serão descritas três práticas básicas de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva.

2.2.1 Manutenção Corretiva

Conforme a norma ABNT NBR 5462, de 1994, a manutenção corretiva é definida como a atividade realizada após a ocorrência de uma pane, que é um estado de um item em falha, destinada a colocar um equipamento em condições de executar uma função requerida.

Para Viana (2002), a manutenção corretiva é a intervenção necessária para evitar graves consequências aos instrumentos de produção que já tenham sofrido falha, término da capacidade de um item desempenhar a função requerida (NBR 5462/1994), para assim sanar essas falhas.

De acordo Passamai e Castilho (2007), a manutenção corretiva pode ser subdivida em dois tipos:

- Manutenção corretiva não planejada: ocorre com maior frequência quando um item que está operando vem a falhar, sendo necessário corrigir a falha o mais rápido possível para retomar a produção.
- Manutenção corretiva planejada: a falha é identificada, porém, só é corrigida quando necessário e/ou possível, podendo-se adiar o reparo pois a falha não leva a parada de produção. Dessa forma, a atividade pode ser planejada.

No Brasil, segundo a ABRAMAN (2003), ainda se trabalha com muita manutenção corretiva não planejada e com manutenção preventiva em excesso. Tal afirmação, segundo o autor, pode ser vista na Tabela 1 que evidencia o nível de atuação dos tipos de manutenção em valores percentuais no Brasil entre 1992 e 2003.

Tabela 1 - Nível de atuação no Brasil

Tipo de Manutenção	%
Manutenção Corretiva	28
Manutenção Preventiva	36
Manutenção Preditiva	19
Engenharia da Manutenção	17

Fonte: ABRAMAN (2003).

De acordo com a Tabela 1, entre 1992 e 2003, o tipo de manutenção mais empregada no Brasil foi a preventiva, representando 36% do percentual total. Além disso, o segundo maior percentual é da manutenção corretiva representando 28%. Os outros tipos de manutenção, preditiva e engenharia de manutenção, representam 19% e 17%, respectivamente, do percentual total do nível de atuação da manutenção no Brasil no período estabelecido.

Para Otani e Machado (2008), a busca pela excelência nas práticas de manutenção nas empresas brasileiras deve passar por uma mudança no nível de atuação exposto na Tabela 1. É necessário que haja um aumento na aplicação da manutenção preditiva. Além disso, segundo o autor, é preciso reduzir a manutenção preventiva ao passo que se aumenta a preditiva como forma de garantir a otimização dos processos industriais, possibilitando ainda uma redução de custos com manutenção a longo prazo.

2.2.2 Manutenção Preventiva

“A manutenção preditiva pode ser definida como os serviços realizados em intervalos de tempo predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinados a reduzir a probabilidade de falhas ou a deterioração de um determinado item” (VIANA, 2002, p.10). Em suma, trata-se uma prática de manutenção planejada que permite a preparação dos serviços antes da ocorrência provável do aparecimento das falhas, o que é uma grande vantagem competitiva para as empresas (PASSAMAI E CASTILHO;2007).

Para Viana (2002), este tipo de manutenção planejada oferece várias vantagens para um sistema fabril se comparada com a manutenção corretiva. Segundo Xenos (1998), no ponto de vista do custo de manutenção, a manutenção preventiva é mais cara pois exige a troca de peças e a reforma de componentes antes de atingirem seus limites de vida útil.

Todavia, ainda de acordo o autor, a frequência da ocorrência de falhas diminui e há uma redução nas interrupções inesperadas de produção.

Sendo assim, considerando o custo total de manutenção, a manutenção preventiva acaba sendo mais barata do que a corretiva, pelo fato de se ter o controle das paradas dos equipamentos, ao invés de ficar sujeito as paradas inesperadas por falhas nos instrumentos de produção (XENOS, 1998).

Tal afirmação citada por Xenos (1998) no parágrafo anterior retrata com exímia autenticidade a aplicação dos recursos pessoal de manutenção exposta pela ABRAMAN (2013), na Figura 1. A análise é feita bom base no indicador HH (hora homem).

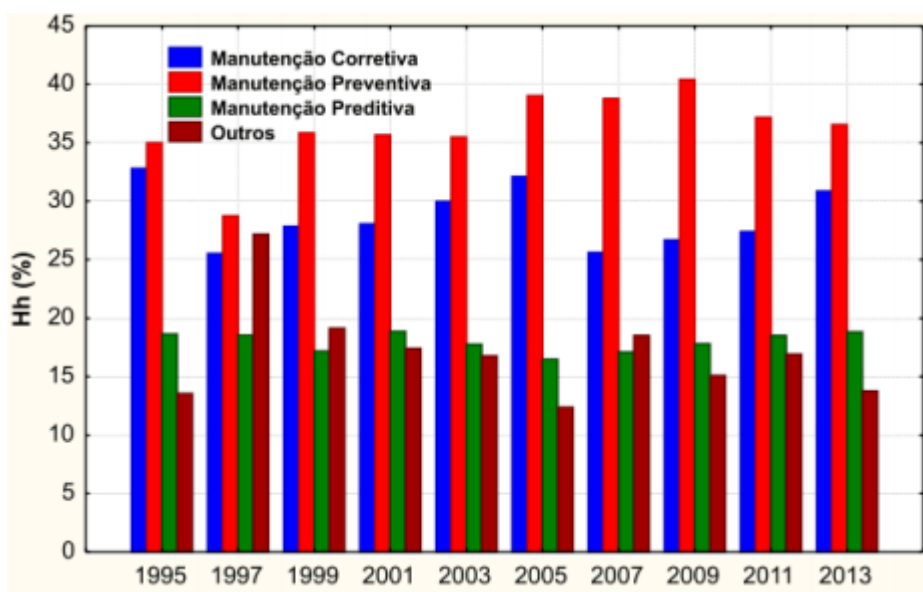


Figura 1 - Aplicação dos recursos na manutenção (%).
Fonte: ABRAMAN (2013).

Analisando-se a Figura 1 é notório como há uma maior aplicação dos recursos na manutenção preventiva no Brasil, em comparação com os outros métodos de manutenção. Segundo Viana (2002), tal aplicação se justifica com base na busca da qualidade de serviço que se pode alcançar com a utilização das atividades preventivas, se comparada, principalmente, com um setor que se baseia basicamente em manutenções corretivas.

2.2.3 Manutenção Preditiva

De acordo com Viana (2002), a manutenção preditiva pode ser entendida como atividades da manutenção preventiva que visam acompanhar os equipamentos ou as peças, por monitoramento, por medições ou controle estatístico de forma a prever a proximidade da ocorrência da falha. Segundo o mesmo autor, esse tipo de manutenção objetiva determinar o tempo mais aproximado da necessidade de intervenção mantenedora, evitando assim desmontagens para inspeção e descarte de componentes antes de atingirem o máximo de sua vida útil.

Com isso, a manutenção preditiva pode ser vista como um meio para melhorar a produtividade de um setor industrial (ALMEIDA, 2019). Tal melhora se justifica, segundo o autor, pela redução na ocorrência de falhas não esperadas, o que gera um aumento na produtividade e qualidade do produto aliado a uma redução de custos.

Conforme Kardec e Nascif (2009), para que a manutenção preditiva seja realizada é necessário o atendimento dos seguintes requisitos:

- O item, sistema ou instalação deve permitir alguma forma de monitoramento ou medição;
- O custo para se realizar a manutenção preditiva deve ser justificado pela importância do equipamento, sistema ou instalação para o processo produtivo da empresa;
- As falhas devem ser originadas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada;
- É necessário se estabelecer um programa para acompanhamento, análise e diagnóstico das variáveis em medição.

Para Viana (2002), existem quatro técnicas preditivas que foram adotadas por parte das empresas nacionais, são elas: ensaio por ultrassom, análise de vibrações mecânicas, análise de óleo lubrificantes e termografia. Cada uma dessas técnicas, quando atendidos os requisitos especificados por Kardec e Nascif (2009), no capítulo acima, podem diminuir a frequência de ocorrência das falhas não esperadas.

2.3 Ferramentas de manutenção

Com o objetivo de reduzir os custos de manutenção, aumentar a disponibilidade e a confiabilidade dos instrumentos de produção ou até mesmo otimizar os produtos e serviços

disponibilizados por determinada empresa surgiram as ferramentas e metodologias de manutenção (BARROS, 2016). Segundo o autor, algumas das ferramentas e metodologias mais utilizadas no mercado são FMEA (Análise do Modo e Efeito da Falha), RCFA (Análise de Causa Raiz da Falha), ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Checar, Agir), diagrama de Ishikawa, reuniões de *brainstorming*, análise dos 5 Porquês.

2.3.1 FMEA

A técnica FMEA (*Failure mode and effects analysis*) ou análise do modo e efeito da falha é usada para identificar as potenciais falhas de um determinado item (BARBOSA, 2011). Ainda segundo o autor, o FMEA tem a capacidade de identificar os mecanismos de falhas e os seus efeitos sistêmicos, contribuindo para a redução/eliminação dos mesmos.

Conforme Silva *et al.* (1997), para a elaboração de uma análise FMEA são necessárias cumprir as seguintes etapas expostas na Figura 2.

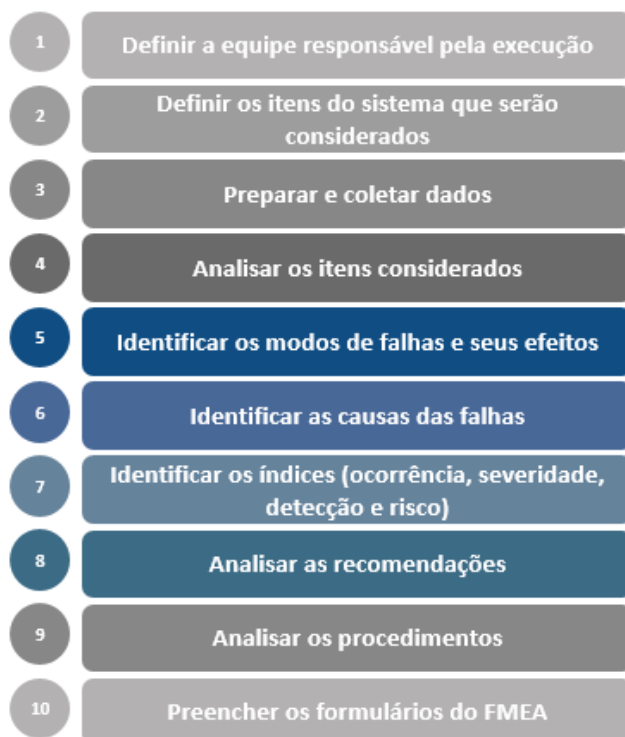


Figura 2 - Etapas para elaboração de uma análise FMEA
Fonte: Adaptado de Silva *et al* (1997).

Cada umas das etapas mostradas na Figura 2, segundo Silva *et al.* (1997), são importantes para auxiliar no diagnóstico de prevenção de falhas e ainda estabelecer prioridade para as ações do projeto com base nas características críticas e significantes levantadas para a causa de cada falha (etapa 8 da Figura 2).

Para Barbosa (2011), algumas das vantagens desse método são a sua ampla aplicabilidade, identificação das falhas dos componentes e seus efeitos no sistema, apresentando os resultados de forma simples. Todavia, conforme o autor, algumas das desvantagens são a possibilidade de apenas identificar falhas isoladas e não uma possível combinação, se não for muito bem controlado existe o risco de demandar muito tempo e recursos, trata-se de uma ferramenta que na ausência de dados métricos pode levar a uma falta de precisão na sua análise. Além disso, segundo Passamai e Castilho (2007), o enfoque da metodologia FMEA se baseia na identificação de modos e efeitos de falhas antes que eles aconteçam, diferentemente do enfoque da metodologia RCFA que busca investigar a ocorrência de falhas que já ocorreram.

2.3.2 RCFA

De acordo com Sharma e Sharma (2010), a metodologia RCFA (Análise de Causa Raiz da Falha) busca evitar a ocorrência de falhas futuras, por meio da definição e solução das causas raízes das falhas ocorridas. Enquanto isso, para Lepree (2008), a metodologia RCFA é responsável por unir as informações acerca das não conformidades encontradas com o foco em possibilitar a análise e posterior eliminação definitiva das falhas, evidenciando ainda se os problemas têm origem em causas humanas, físicas ou ainda ocultas. Ainda segundo o autor, as ações de combate a reincidência das falhas só serão viáveis se for identificado o motivo que levou à ocorrência, caso contrário é preciso analisar e atuar sobre o defeito até que a causa raiz da falha seja identificada.

Conforme Barros (2016), a metodologia RCFA pode ser abordada de diversas formas. Sendo assim, os passos para sua elaboração divergem de modelo para modelo. Segundo o proposto por Passamai e Castilho (2007), a RCFA é composta pela sequência de etapas mostrada na Figura 3.

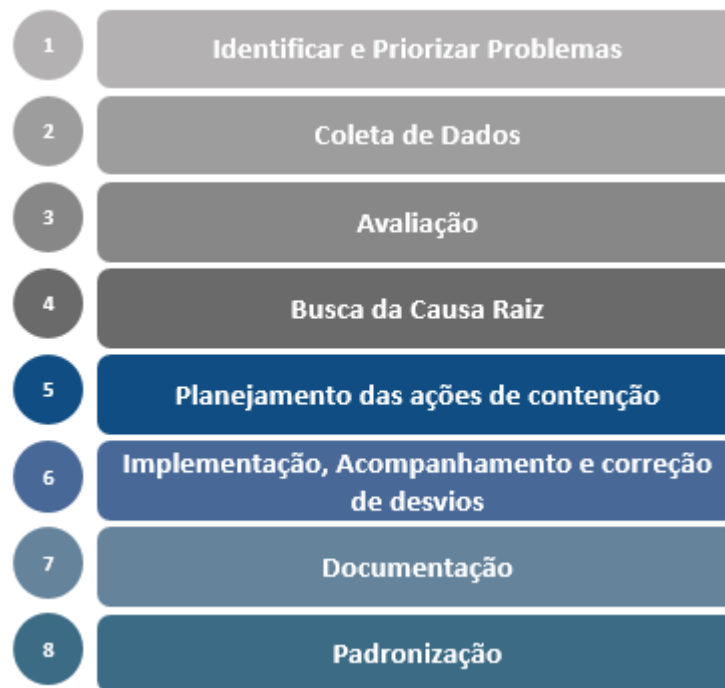


Figura 3 - Etapas para realização da metodologia RCFA
Fonte: Adaptado de Passamai et al (2007).

Para Passamai e Castilho (2007), cada uma das etapas mostradas na Figura 3 são de suma importância para todos os processos de análise de causas fundamentais, sendo elas: Identificar e Priorizar problemas; coleta de dados; avaliação; busca da causa raiz; planejamento das ações de contenção; implementação, acompanhamento e correção de desvios; documentação; padronização. Todas as etapas são explicadas sucintamente no tópico Sistemática de funcionamento da análise de falha.

2.3.3 Ciclo PDCA

Segundo Passamai e Castilho (2007), o ciclo PDCA, visto na Figura 4, foi desenvolvido por Walter A. Shewart na década de 1920, mas foi amplamente difundido por Deming em 1950. Ainda conforme o autor, trata-se de um método simples que busca padronizar informações do controle de qualidade, evita erros lógicos nas análises e facilita o entendimento das informações, ou seja, é uma ferramenta eficiente para apresentar melhoria nos processos de gerenciamento de atividades dentro de uma organização.

Conforme o descrito por Barbosa (2011), o ciclo PDCA é composto por quatro fases:

- Planejar (Plan): Nessa etapa são traçados os objetivos e são reunidas informações para a melhoria;
- Executar (Do): Nessa etapa são realizadas as atividades segundo o planejamento;
- Verificar (Check): Etapa onde são monitorados os resultados obtidos;
- Agir (Act): Nessa etapa são tomadas decisões com base na etapa de verificação, além disso, com os resultados obtidos são traçados novos planos de forma a melhorar a tomada de ações, se necessário.

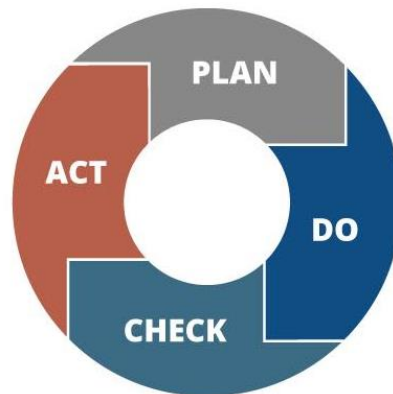


Figura 4 - Ciclo PDCA.
Fonte: Adaptado de Barbosa (2011).

2.3.4 Reuniões de *Brainstorming*

O termo em inglês, *Brainstorming*, significa “tempestade de ideias”. Consiste em uma ferramenta de qualidade onde reúnem-se colaboradores de diversas áreas onde estes dão ideias de forma totalmente livre sobre as possíveis causas da falha em questão, para assim obter o maior número possível de ideias e sugestões sobre o tema em questão (MAGRI, 2009).

De acordo com Werkema (2004), para se obter resultados satisfatórios com a utilização do *brainstorming* algumas regras devem ser seguidas, tais como:

- Deve ser escolhido um líder para dirigir as atividades do grupo;
- Todos os participantes do grupo devem dar sua opinião sobre as possíveis causas do problema analisado;

- Nenhuma ideia pode ser criticada;
- As ideias devem ser registradas em um quadro;
- A tendência de culpar pessoas deve ser evitada.

Para Werkema (2004), seguindo-se os passos citados acima nas reuniões de *brainstorming* é possível analisar o registro da falha por meio das ideias e opiniões dos colaboradores de diferentes áreas de forma eficiente e produtiva.

2.3.5 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de causa e efeito, também conhecido como diagrama de Ishikawa, espinha de peixe, 6M, 7M ou 8M é uma ferramenta simples largamente utilizada para análise de problemas organizacionais (MAGRI, 2009). Conforme Barbosa (2011), trata-se de uma ferramenta de qualidade que objetiva organizar as ideias e montar uma estrutura de suporte no processo de resolução de problemas, além de permitir a identificação e análise das causas potenciais de variação do processo.

De acordo com Passamai e Castilho (2007), o diagrama de causa e efeito permite estruturar de forma hierárquica as causas de determinado problema, apresentar as informações levantadas na fase de *brainstorming* de forma sumarizada e ainda atua como guia para a determinação da causa fundamental do problema. Conforme o descrito pelo autor, as causas de uma falha podem ser agrupadas segundo 6 categorias: Equipamentos, Materiais, Procedimentos ou Métodos, Projeto, Gerenciamento, Capacitação. A Figura 5 mostra um exemplo de diagrama de causa e efeito categorizado segundo os seis tipos principais de falhas.

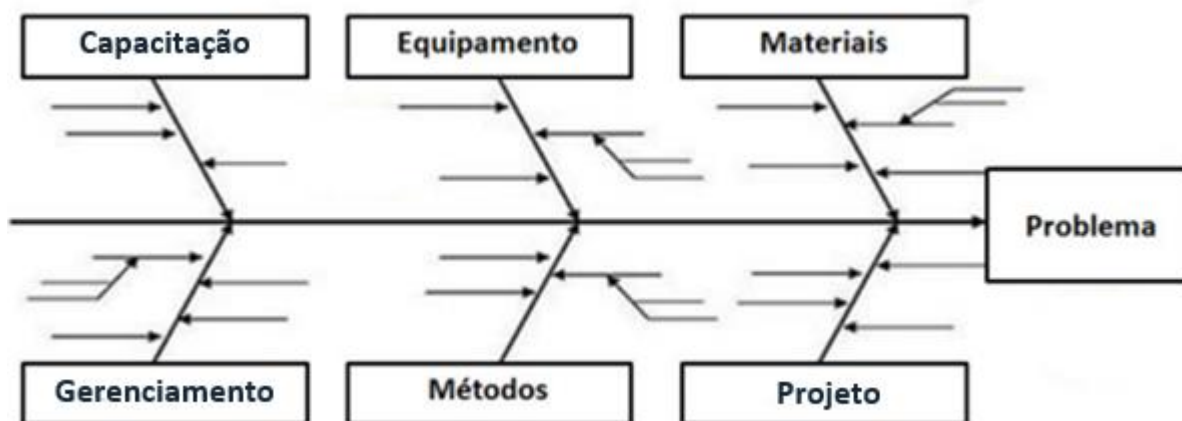


Figura 5 - Diagrama de Causa e efeito
 Fonte: Adaptado de Barbosa (2011).

Segundo Passamai e Castilho (2007), as seis categorias principais de falhas mostradas na Figura 5 podem ser entendidas como:

- Equipamentos: agrupam as causas ligadas à condição dos componentes do equipamento ou sistema em questão;
- Materiais: Agrupam as causas ligadas às falhas no material utilizado nos componentes ou na estrutura do equipamento;
- Procedimentos ou Métodos: Agrupam as causas provenientes de problemas no cumprimento de ações de manutenção e operação, bem como a inexistência ou inadequações de normas, planos, procedimentos ou métodos;
- Projeto: Agrupa causas ligadas às falhas de projeto, ou de especificação errada, ou não seguida de algum componente ou peça;
- Gerenciamento: Agrupa causas ligadas a alterações previstas ou não do processo e ainda problemas causados por erros na alocação de recursos.
- Capacitação: Agrupa causas ligadas a falta de preparo das pessoas envolvidas com o processo.

O diagrama de causa e efeito objetiva ainda eliminar as causas que certamente não são as responsáveis pela ocorrência da falha por meio da verificação de alguns parâmetros, passando para a próxima etapa de análise apenas as causas fundamentais de falha, ou seja, falhas com potencial para ter causado a falha (PASSAMAI E CASTILHO, 2007).

2.3.6 Análise dos 5 Porquês

Segundo Passamai e Castilho (2007), a ferramenta dos 5 Porquês foi criada na década de 1950 pela Toyota e consiste num sistema de perguntas das causas dos problemas. O campo de cada “Por que” deve ser registrado a informação que explica a anterior, como pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 - Fluxograma de funcionamento dos 5 Porquês.
Fonte: Passamai e Castilho (2007).

Analisando-se a Figura 6 é possível compreender o método da análise dos 5 Porquês. Inicialmente, conhecendo-se a falha, são realizadas perguntas referentes as causas fundamentais dos problemas levantados até se chegar à causa raiz da falha. A série de perguntas mostrada na Figura 6 obedece a uma sequência específica onde a resposta de cada “Por que” deve explicar a informação contida no campo anterior.

A ferramenta dos 5 Porquês pode ser considerada a espinha dorsal de uma análise RCFA, trata-se de uma ferramenta que mais se aproxima da causa raiz do problema (BARBOSA, 2011). Ainda segundo o autor, esta ferramenta é de simples uso, fácil ensino e de alta capacidade para identificação das causas raízes que levaram a falha.

2.3.7 Metodologia 5W1H

O método 5W1H é utilizado para a elaboração de um plano de ação para a eliminação de falhas. Trata-se de um formulário de perguntas de forma organizada que ajuda a identificar ações, onde estas ações serão realizadas, o porquê destas ações, quem irá executá-las, quando e como será a execução destas (PREINADO e GRAEML, 2007).

O 5W1H tem essa nomenclatura devido as iniciais de seis perguntas em inglês descritas abaixo e que significam, segundo Preinado e Graeml (2007):

- WHAT (O quê?) – Qual a tarefa? O que será feito? Quais as contramedidas para eliminar as causas do problema?
- WHEN (Quando?) – esta pergunta define o prazo que a ação terá para ser executada. É importante ter prazo de início e término bem definidos.
- WHO (Quem?) – esta etapa define o responsável pela execução da ação.
- WHERE (Onde?) – esta pergunta definirá onde será executada a ação.
- WHY (Por quê?) – esta pergunta tem como objetivo definir o motivo ou a justificativa para a execução da ação planejada.
- HOW (Como?) – esta última pergunta define o detalhamento de como será executada a ação, inclusive podem ser detalhados os recursos a serem utilizados. Qual o método? De que maneira será feito?

2.4 Sistema de tratamento de falhas

O termo falha, segundo a NBR 5462 de 1994, é definido como o término da capacidade de um item desempenhar sua função requerida. Segundo Xenos (1998), existem três grandes categorias de causas possíveis para a ocorrência das falhas nos equipamentos, são elas:

- Falta de resistência;
- Uso inadequado;
- Manutenção inadequada.

A falta de resistência é uma característica inerente do próprio instrumento, ocasionada por erros de projeto, erros na especificação de materiais, deficiência nos processos de fabricação e montagem (XENOS, 1998). Ainda segundo o autor, as falhas provenientes de

falta de resistência resultarão em esforços normais os quais os equipamentos não foram projetados para suportar.

A falha por uso inadequado ocorre, geralmente, pela aplicação de esforços fora da capacidade do equipamento, enquanto a falha por manutenção inadequada decorre da falta de aplicação de métodos de manutenção preventivos ou pela aplicação incorreta desses métodos (XENOS, 1998).

Independente da categoria, toda e qualquer falha gera inconvenientes para as equipes de manutenção, sendo assim, devem ser tratadas como uma situação anormal que necessita de tratamento adequado para evitar reincidência (XENOS, 1998).

2.4.1 Círculo Vicioso das Falhas

Para a eliminação de qualquer falha é necessário, primeiramente, a identificação precisa das causas fundamentais, permitindo assim a elaboração de ações de bloqueio cabíveis para as causas fundamentais e evitando a reincidência destas (XENOS, 1998). Ainda segundo o autor, quando esse princípio não é bem entendido pela equipe de manutenção há a ocorrência do chamado círculo vicioso das falhas, que pode ser visto na Figura 7.

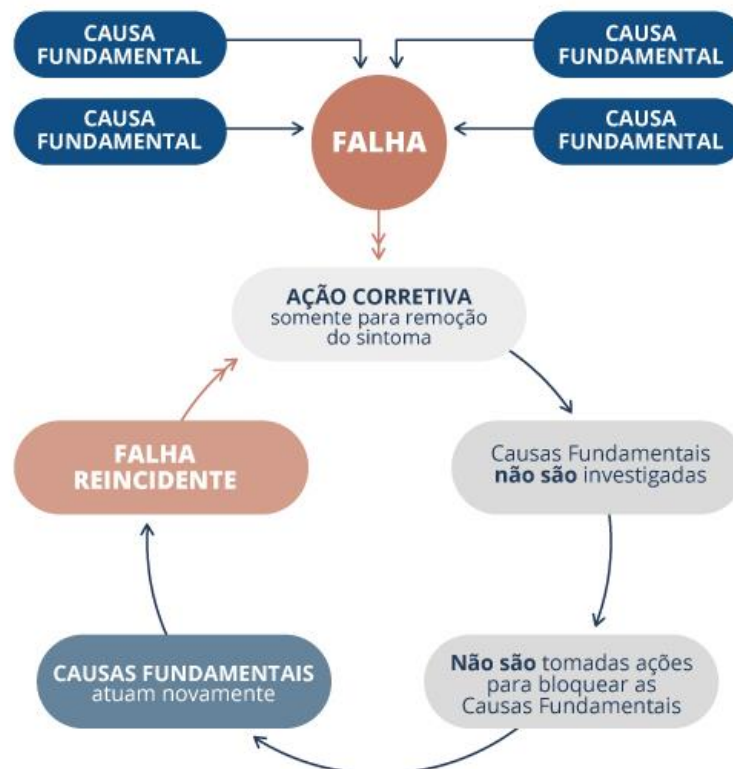


Figura 7 - O círculo vicioso das falhas.
 Fonte: Adaptado de Xenos (1998).

Analisando-se a Figura 7 é possível concluir que se não houver o bloqueio das causas fundamentais, os equipamentos estarão sujeitos a reincidência das falhas. Além disso, segundo Xenos (1998) a soma da falha recorrente à ocorrência de falhas esporádicas – ocasionada por outros tipos de falhas – tenderá ao descontrole da manutenção do instrumento por parte do departamento responsável (XENOS, 1998). Todavia, ainda segundo o autor, muitos departamentos de manutenção tem se limitado apenas a remoção do sintoma da falha, ou seja, se limitam apenas a realizar ações corretivas nos equipamentos. Para Xenos (1998), essa atuação de forma limitada não permite a correta identificação e bloqueio das causas fundamentais das falhas, é necessário estabelecer um sistema de tratamento adequado para impedir a reincidência destas.

Em consequência do descontrole por parte do departamento de manutenção, restará cada vez menos tempo para atuar de forma preventiva nos equipamentos, pois os colaboradores estarão ocupados tratando das corretivas planejadas (XENOS, 1998). Dessa forma, conforme o autor, as equipes de manutenção estarão aprisionadas no círculo vicioso das falhas.

De acordo com Xenos (1998), para romper o círculo vicioso das falhas evidenciado na Figura 7, é necessário colocar em prática um método de tratamento de falhas nos equipamentos com o foco em reduzir a ocorrência destas. Dessa forma, segundo Passamai e Castilho (2007), os sistemas de tratamento de falhas surgem com a finalidade de minimizar ou até mesmo impedir a ocorrência de falhas, agregando ainda o aumento de disponibilidade dos instrumentos de produção e reduzindo os custos de manutenção.

2.4.2 Sistemática de funcionamento da análise de falha

Para Xenos (1998), um sistema de tratamento de falhas é considerado uma estrutura formal para gerenciamento de informações sobre falhas e das ações subsequentes para evitar a reincidência destas. De acordo Passamai e Castilho (2007), todos os processos para análise de causas fundamentais devem seguir os seguintes passos para romper o círculo vicioso das falhas mostrado na Figura 8.

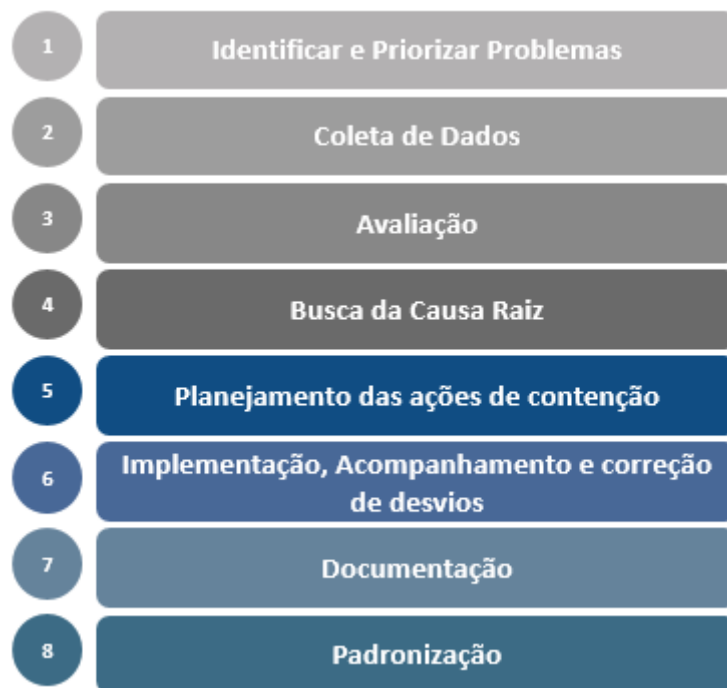


Figura 8 – Etapas para elaboração de uma análise de falhas
Fonte: Passamai e Castilho (2007).

Segundo Passamai e Castilho (2007), a etapa de identificação e priorização do problema estabelece critérios para justificar o estudo da falha e ainda trata de sua criticidade.

Ainda segundo o autor, diversos critérios são utilizados pelas empresas para determinar se uma falha deve ou não passar por uma metodologia de análise de falha, como: custo de manutenção, criticidade do equipamento, PTP (Perda Teórica de Produção), pedido da gerência ou supervisão, dentre outros critérios. Conforme o mesmo autor, dependendo da empresa podem aparecer sozinhos ou como combinação de dois ou mais deles. Tratando-se agora da ordem de prioridade das análises de falhas, caso haja mais de uma análise para ser realizada, as empresas podem seguir os seguintes critérios (PASSAMAI e CASTILHO;2007):

- Executar a análise nos equipamentos de maior criticidade;
- Executar a análise nos equipamentos que causaram maior perda de produção;
- Executar a análise nos equipamentos que demandaram maior custo de manutenção;
- Outros.

Já a etapa de coleta de dados faz uma análise de todos os eventos e condições observadas durante a ocorrência da falha, permitindo assim uma análise posterior com maior fidelidade (PASSAMAI e CASTILHO;2007). Ainda segundo o autor, alguns dados importantes para serem coletados são:

- Atividades relacionadas com a ocorrência;
- O evento que desencadeou o problema;
- Equipamentos, *softwares* e outros recursos associados com a ocorrência;
- Modificações em procedimentos, formações, etc.
- Circunstâncias físicas que possam estar associadas ao problema.

Na etapa de avaliação busca-se identificar os fatores que possivelmente causaram a falha e organizá-los segundo categorias pré-definidas para assim facilitar a compreensão sobre o ocorrido (PASSAMAI e CASTILHO;2007). Segundo o autor, as categorias associadas a fatores causais mais observadas na prática são: equipamentos, materiais, procedimentos ou métodos, projeto, capacitação, gerenciamento. Ainda conforme o autor, para o desenvolvimento da etapa de avaliação é recomendado o uso de ferramentas de manutenção, tais como: reunião de *Brainstorming*; diagrama de Ishikawa.

Na quarta etapa para a elaboração de uma análise de falha, busca da causa raiz, pretende analisar as causas fundamentais, sejam elas vindas da etapa de avaliação ou da etapa de coleta de dados, e identificar, para cada uma delas, a causa raiz da falha, permitindo assim a elaboração de contramedidas cabíveis para impedir a reincidência das falhas (PASSAMAI e CASTILHO;2007). Ainda segundo o autor, nessa etapa é necessário escolher uma ferramenta de análise das causas fundamentais para auxiliar na busca da causa raiz, dentre essas ferramentas, a mais utilizada é a análise dos 5 Porquês.

Com base nos dados obtidos na etapa de busca da causa raiz, será realizado o planejamento das ações de contenção levando-se em consideração as seguintes análises (PASSAMAI e CASTILHO;2007):

- As ações detalhadas são eficientes contra a recorrência do problema?
- As ações detalhadas são factíveis?
- As ações detalhadas permitem ao sistema cumprir sua funcionalidade?
- Existe a possibilidade de introdução de novos riscos ao sistema por meio da implementação destas ações?
- As ações são imediatamente apropriadas e efetivas?

A etapa de implementação, acompanhamento das ações e correção de desvios consiste em aplicar as ações de contenção propostas para eliminar cada causa raiz (PASSAMAI e CASTILHO;2007). Ainda conforme o autor, é necessário que haja o acompanhamento das ações de contenção para que seja realizada a correção de eventuais desvios que não estejam gerando o efeito desejado sobre o sistema.

A penúltima etapa trata da documentação e divulgação de relatórios, procedimentos e práticas geradas no decorrer da análise (PASSAMAI e CASTILHO;2007). Para o autor, não há um padrão para essa divulgação, é necessário apenas que torne evidente o motivo das ações tomadas.

A última etapa destaca as ações que, após implementadas e documentadas, deverão ser padronizadas por meio de procedimentos de manutenção, operação ou desenhos, a fim de possibilitar a implementação dessas ações em itens da mesma classe, grupo ou família de equipamentos ou ainda em instrumentos que possuam o mesmo modo de falha que o equipamento em questão.

Conforme Passamai e Castilho (2007), o ciclo de funcionamento de um sistema de tratamento de falhas, mostrado na Figura 9, obedece ao ciclo de funcionamento PDCA (Planejar, Executar, Checar e Agir). Tal afirmativa é exemplificada na Figura 9.

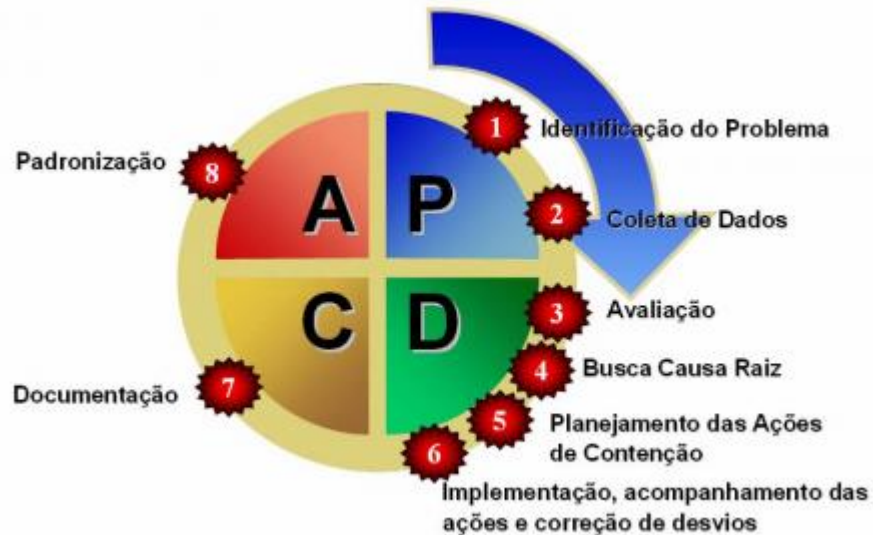


Figura 9 - Sistemática de funcionamento de um sistema de tratamento de falhas segundo a metodologia PDCA.

Fonte: Passamai e Castilho (2007).

Segundo Passamai e Castilho (2007), todo gerenciamento do processo consta em estabelecer a manutenção nas melhorias dos padrões pré-estabelecidos na organização.

2.5 Bombas de deslocamento positivo

As bombas são classificadas como máquinas de fluxo responsáveis por realizar o escoamento de um líquido de um ponto a outro por meio da transformação de energia, sendo o trabalho mecânico uma das formas de energia, na qual o meio operante é um fluido, que interage com um elemento rotativo e não se encontra confinado (ANCINES, 2012). Ainda segundo o autor, o fluido de trabalho, após passar pelos efeitos dinâmicos aos quais é submetido em sua passagem pela máquina, altera seu nível energético.

Sendo assim, conforme Santos (2007), as bombas de deslocamento positivo são classificadas como máquinas geratrizes, que por definição são máquinas que geram um trabalho mecânico através de um motor elétrico, e transformam esse trabalho em energia hidráulica, tornando possível o recalque do líquido. Ainda segundo o autor, esse tipo de

bomba se difere das demais por permitir um volume deslocado do líquido de forma constante, ou consideravelmente constante.

Além disso, segundo Fonseca (2013), as bombas de deslocamento positivo possuem uma relação inversa entre vazão e a pressão, ou seja, quanto maior for a pressão gerada na câmara, menor será a vazão requerida pela bomba. Devido a essa característica, essas bombas são empregadas para o escoamento de fluidos viscosos (SANTOS, 2007). Conforme Fonseca (2013), as bombas de deslocamento positivo se classificam em dois grupos: as bombas rotativas e as bombas alternativas.

As bombas rotativas, de acordo Santos (2007), são as mais utilizadas dentre as bombas de deslocamento positivo, elas podem ser compostas por: palhetas, pistões radiais, pistões axiais, rotores lobulares, que permitem o deslocamento do fluido no interior da câmara através do movimento de rotação - geralmente trata-se de um movimento constante - como pode ser visto na Figura 10.

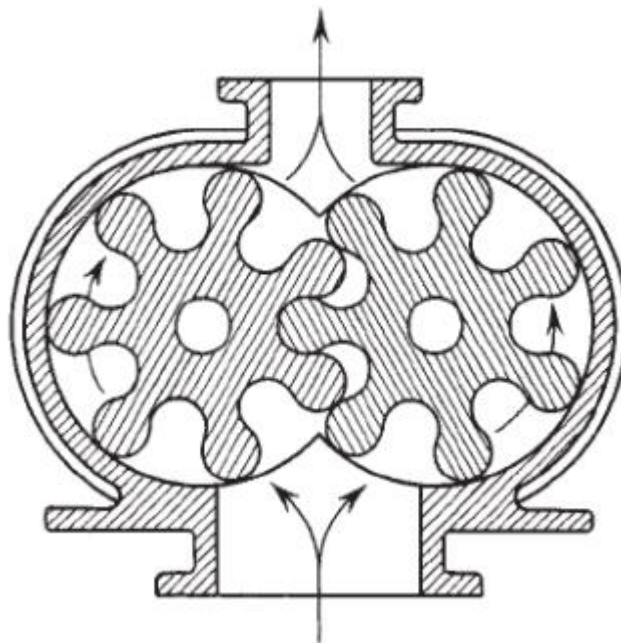


Figura 10 - Bomba de deslocamento positivo rotativa de engrenagens.
Fonte: Santos (2007).

Nesse tipo de bomba, o líquido alcança a descarga por meio de vãos livres entre as engrenagens, como pode ser visto na Figura 10. Além disso, nesses equipamentos também ocorre o processo de vazamento interno entre os dentes das engrenagens, que pode aumentar caso haja um aumento de pressão (SANTOS, 2007). Conforme Foust *et al* (1982), umas das

principais vantagens das bombas rotativas é por serem utilizadas para bombear líquidos de quaisquer viscosidades, especialmente os fluidos de alta viscosidade, como graxas, melados e tintas.

As bombas alternativas são constituídas basicamente de uma camisa de pistão, válvulas de descarga e sucção, pistão ou diafragma, de acordo com a opção construtiva (SANTOS, 2007). Na Figura 11 é mostrada uma bomba alternativa de pistão com diafragma, modelo GEHO TZPM 2000, do fabricante Weir Minerals Netherlands.

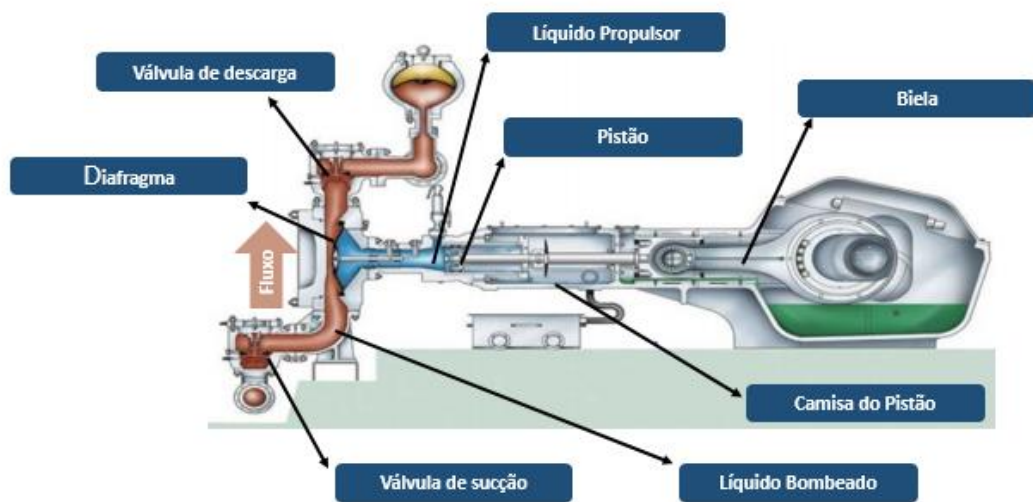


Figura 11 - Desenho de um conjunto de uma bomba GEHO TZPM

Fonte: Adaptado de Weir (2006).

O diafragma de borracha separa o líquido bombeado do líquido propulsor limpo, como pode ser visto na Figura 11. O líquido bombeado não tem nenhum contato com as partes em movimento, como é o caso do pistão, da biela ou da camisa do cilindro (WEIR, 2006). Ainda segundo o fabricante, isto permite a utilização de componentes de baixo índice de desgaste (pistão, haste de pistão, anéis de pistão, revestimento de cilindro) para o bombeamento de líquido ou lama que contenham sólidos sob alta pressão. Segundo a manual da bomba GEHO TZPM 2000, os componentes que estão em contato direto com a lama são classificados como peças de desgaste e peças de reposição e devem ser de fácil acesso para inspeção e reparação. Segundo a Weir (2006), as peças de desgaste - componentes sujeitos a trocas regulares- são as

válvulas de sucção e descarga identificados. Já as peças de reposição - peças sujeitas a trocas quando necessário – são os diafragmas da bomba e o diafragma da válvula de nivelção.

De acordo com Foust *et al* (1982), o funcionamento das bombas alternativas se baseia no aumento e diminuição da pressão no interior da câmara onde o pistão se movimenta para assim bombear o líquido ou lama. No caso das bombas de pistão com diafragma GEHO TZPM 2000, os cursos de sucção e descarga são representados nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

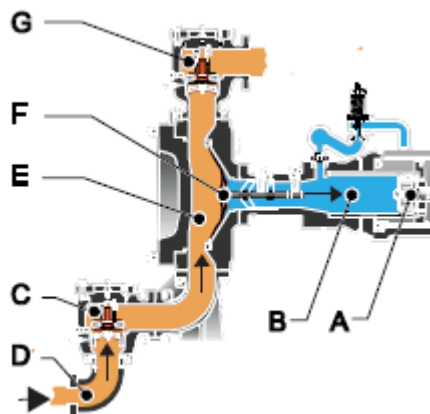


Figura 12 - Princípio de trabalho curso de sucção.
Fonte: Weir (2006).

No curso de sucção mostrado na Figura 12, o pistão (A) vai para trás e descomprime o líquido propulsor(B), dessa forma, o diafragma (F) vai para trás (WEIR, 2006). Ainda segundo o fabricante, a baixa pressão resultante no compartimento de lama (E) força a válvula de descarga (G) a fechar e a válvula de sucção (C) a abrir. Dessa forma, a lama preenche o compartimento de lama (E) da carcaça de diafragma através o tubo de sucção (D).

Já no curso de descarga mostrado na Figura 13, o pistão (A) vai para frente e comprime o líquido propulsor (B) que irá forçar o diafragma (F) para frente (WEIR, 2006). Ainda segundo o fabricante, a pressão alta resultante no compartimento de lama (E) da carcaça de diafragma força a válvula de sucção (C) a fechar e a válvula de descarga (G) a abrir. Dessa forma, a lama sai do compartimento de lodo (E) pelo tubo de descarga (H).

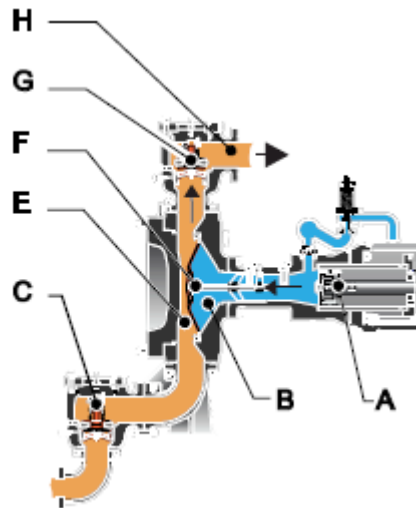


Figura 13 - Princípio de trabalho Curso de descarga.
 Fonte: Weir (2006)

É importante ressaltar que o controle automático (via PLC) da quantidade necessária de líquido propulsor durante os estágios de sucção e descarga entre êmbolo e o diafragma é realizado pelas válvulas HV (denominação GEHO), tais válvulas podem ser vistos na Figura 14.



Figura 14 - Válvulas HV
 Fonte: Weir (2006).

As válvulas HV mostradas na Figura 14 tem a função de regular o volume do líquido propulsor dentro dos limites, proteger os diafragmas contra a sobre fadiga e controlar e limitar o curso dos diafragmas da bomba. Tal função pode ser explicada com mais detalhes observando a Figura 15.

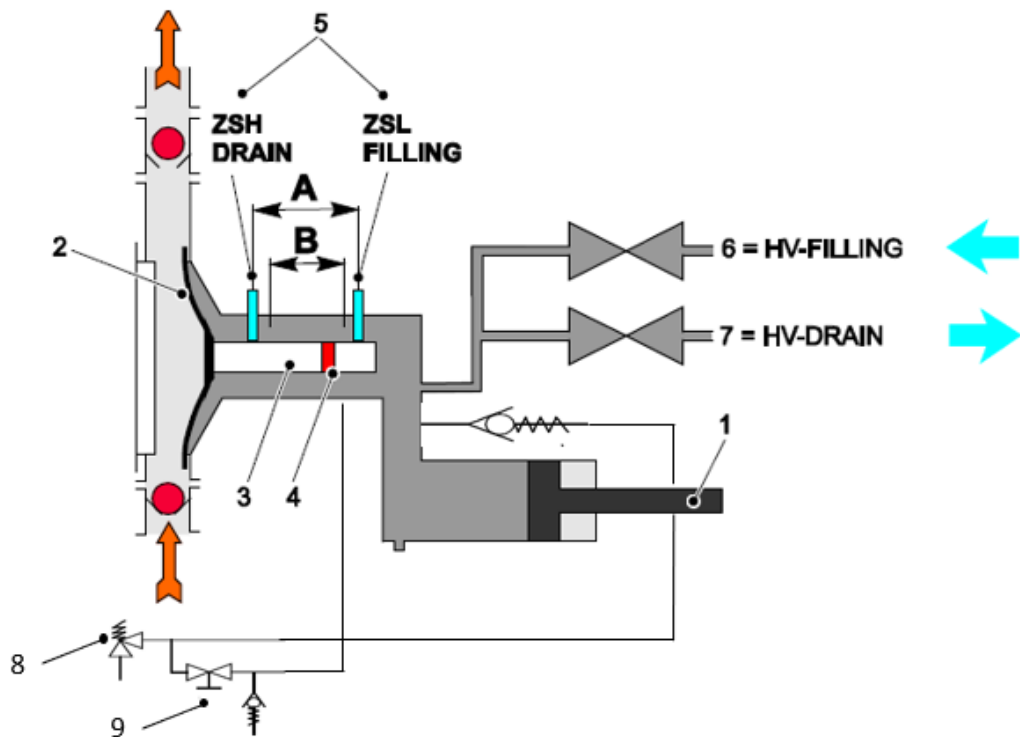


Figura 15 - Sistema de comando automático do líquido propulsor.
Fonte: adaptado Weir (2006).

A Figura 15 demonstra o princípio operacional das válvulas de enchimento (ZSL-FILLING) e de drenagem (ZSH-DRAIN), os pontos marcados na figura representam:

1. Êmbolo
2. Diafragma
3. Haste de controle fixada no diafragma
4. Na haste de controle está incorporado um magneto, para ativar as chaves ZSH-DRAIN + ZSL-FILLING.

5. As chaves ZSH-DRAIN (chave alta – ativa a sequência de dreno automática do líquido propulsor) + ZSL-FILLING (chave baixa – ativa a sequência de enchimento automático do líquido propulsor), ambas servem para limitar o curso do diafragma, onde A significa o limite máximo e mínimo de curso e B denota a faixa operacional normal do curso do magneto durante a operação da bomba.
6. Válvulas "HV-FILLING" para o enchimento automático das câmaras do sistema do líquido propulsor.
7. Válvulas "HV-DRAIN" para a drenagem das câmaras do sistema do líquido propulsor
8. Válvula limitadora de pressão também conhecida como “válvula check” pelos técnicos de área. Trata-se de uma válvula de retenção que serve para proteger o equipamento contra danos de refluxo e fornece alívio de pressão para segurança do sistema.
9. Válvula de ventilação no sistema de limitação de pressão

De acordo com o manual da bomba GEHO TZPM 2000, a vazão total do equipamento é dada pela combinação dos movimentos de três pistões em três posições diferentes, como mostrado na Figura 16.

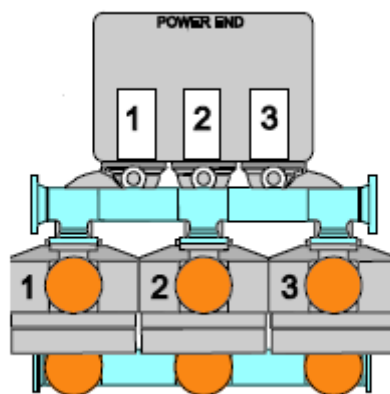


Figura 16 - Identificação dos corpos do diafragma.
Fonte: Weir (2006).

Cada um dos pistões em movimento empurra o líquido propulsor para deslocar o diafragma, bombeando assim a lama (WEIR, 2006). Ainda segundo o fabricante, durante 1 revolução completa do eixo de manivelas, 3 êmbolos fazem no total 3 cursos de sucção do diafragma e 3 cursos de descarga do diafragma.

Os três êmbolos seguem um após o outro num ângulo de 120° graus no eixo de manivelas para evitar assim vibrações excessivas durante a operação do equipamento (WEIR, 2006).

Segundo Santos (2007), caso o volume que não sai da câmara devido a limitações de movimento do pistão – volume morto – não seja considerado, o volume de entrada e saída é praticamente constante.

O denominado volume morto causa efeitos negativos e positivos nas bombas de deslocamento positivo (SANTOS, 2007). Segundo o autor, essa parte do líquido que não consegue sair da câmara fica aguardando um novo ciclo de movimento do pistão, essa recirculação do líquido no interior da bomba – denominado de vazamento interno – provoca uma perda no rendimento do equipamento, eficiência está que, segundo Foust *et al* (1982), chega a 95% quando bem ajustada a razão entre a descarga real e descarga baseada no deslocamento do pistão. Todavia, conforme Santos (2007), o volume morto é responsável pela diminuição do atrito nas paredes, o que aumenta a vida útil do equipamento.

Conforme o descrito Foust *et al* (1982), a aplicação das bombas de deslocamento positivo alternativas costuma se dar para o bombeamento de água de alimentação de caldeiras, de óleos e de lama. No caso deste trabalho, o estudo se dará para bombas de deslocamento positivo alternativas de pistão com diafragma do modelo GEHO TZPM 2000 do fabricante Weir Minerals Netherlands e o fluido bombeado é uma mistura de minério de ferro com água.

Baseado na fundamentação teórica desenvolvida, foi possível elaborar um procedimento metodológico que assegure resultados significativos para atender à resposta da problemática contextualizada no capítulo 1.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como finalidade demonstrar os procedimentos metodológicos para realizar o desenvolvimento da pesquisa. É apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, materiais e métodos adotados.

3.1 Tipo de Pesquisa

O principal objetivo da pesquisa é encontrar soluções para um problema, mediante o uso de procedimentos científicos (GIL, 1999). De acordo Minayo (2003), a pesquisa pode ser classificada de duas formas: qualitativa ou quantitativa.

Segundo Minayo (2003), o método qualitativo se baseia na interpretação. Este método procura estudar as conjunturas difíceis de serem descritas numericamente, reunindo todas as informações pela análise, descrição e gravação. Já o método quantitativo se baseia na utilização de métodos estatísticos, opiniões e dados obtidos de acordo com pesquisas, análises numéricas e testes para gerar informações que podem ser quantificadas (SILVA, 2004).

Para Gil (1999), a pesquisa pode ser classificada em exploratória, descritiva e explicativa. A pesquisa exploratória tem a finalidade de esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, com base em levantamento bibliográfico, documental, entrevistas com pessoas que tiveram experiência com o problema pesquisado e estudos de caso. Para Gil (2007), o estudo de caso pode ser definido como sendo um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita detalhar e ampliar o seu conhecimento.

Já a pesquisa descritiva utiliza-se da observação e análise para descrever as características de determinada população ou fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, tendo como principal técnica, a coleta de dados (GIL,1999). Além disso, ainda segundo o autor, a pesquisa pode ser classificada como explicativa, pois identifica os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

Quanto aos procedimentos técnicos, ainda de acordo com Gil (1999), a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas e também por meio de dados que se obtém através de estudo de casos e experimentos.

Com base nas informações apresentadas, este trabalho consiste quanto à abordagem de pesquisa, em uma pesquisa qualitativa (valores subjetivos sem tratamento estatístico), pois busca o entendimento do fenômeno de estudo mediante descrições, interpretações e comparações de campo dos técnicos mecânicos, elétricos, instrumentistas e operadores, sem considerar os aspectos numéricos, ou seja, sem tratamentos estatísticos.

Quanto ao objetivo, trata-se de uma pesquisa exploratória, pois busca proporcionar uma maior familiaridade com o problema em questão através do levantamento bibliográfico, análise do manual da bomba e entrevistas com pessoas que tiveram experiência com o problema para o levantamento de hipóteses de possíveis causas fundamentais da falha.

Este trabalho se caracteriza também como uma pesquisa bibliográfica, pois é fundamentada com base em uma variedade de livros, dissertações, manual do fornecedor da bomba, artigos e internet, com o intuito de enriquecer teoricamente o estudo. Além disso, a pesquisa se enquadra como um estudo de caso, pois busca analisar as diferentes causas fundamentais de falha nas bombas de deslocamento positivo em uma empresa de mineração, visando à elaboração de um plano de ação.

3.2 Materiais e Métodos

Para a análise teórica do trabalho foi realizado um estudo bibliográfico sobre como determinar um sistema de tratamento de falhas, a fim de orientar a tomada de ações para a elaboração da análise. Dessa forma, com o objetivo de entender melhor a problemática envolvendo as bombas de deslocamento positivo foram realizados um conjunto de procedimentos. A Figura 17 representa o procedimento metodológico utilizado para a elaboração da análise de falha.

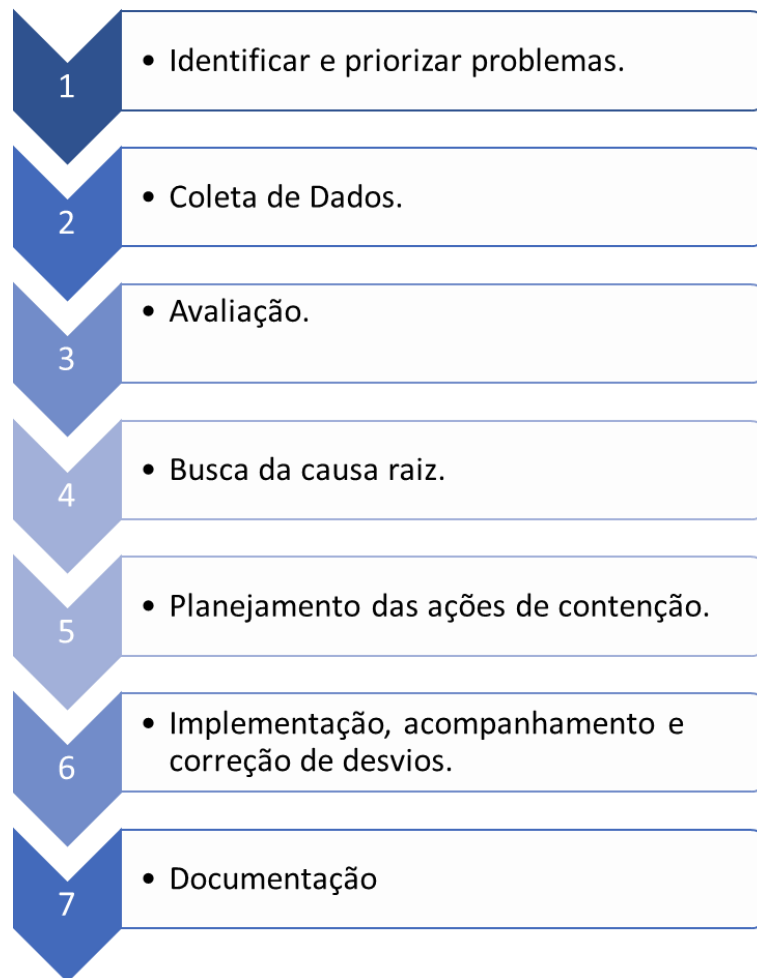


Figura 17 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizados.
Fonte: Pesquisa direta (2020).

A etapa de identificação e priorização do problema, exposta na Figura 17, é feita com base no pedido da gerência da empresa, pois as bombas de deslocamento positivo são ativos críticos para o sistema de bombeamento de minério de ferro, justificando assim a elaboração do sistema de tratamento de falhas.

Após a etapa descrita acima é realizada a coleta de dados através de uma análise retrospectiva dos eventos e condições que culminaram na ocorrência da falha. Além disso, foram levantadas informações pertinentes à elaboração da análise de falha, como: Atividades, equipamentos e softwares relacionados com a ocorrência, modificações em procedimentos de manutenção/operação e as circunstâncias físicas que possam estar associadas ao problema. Tais informações foram colhidas através de reuniões de *brainstorming* com os técnicos de cada especialidade – mecânica, elétrica, instrumentação e operação –, através do manual dos equipamentos disponibilizado pelo fabricante das bombas e pela consulta ao histórico de

manutenção dos equipamentos disponível no sistema SAP – sistema de informações que permite gerenciar as diferentes ações de uma empresa, sejam elas de produção, manutenção, logística, financeiro, dentre outros.

A etapa seguinte ao levantamento de dados é a avaliação dos dados coletados de forma a entender e identificar o que possivelmente causou a falha. Dessa forma, com a utilização do diagrama de causa e efeito pode-se organizar os dados coletados na fase do *brainstorming* em categorias pré-estabelecidas de causas prováveis de falhas, conforme o explicado no tópico 2.3.5. Além disso, por meio do diagrama de causa e efeito são avaliadas as criticidades (alta, média, baixa) de cada possível ocorrência levantada e são determinadas as causas fundamentais da falha.

Finalizada a etapa de avaliação dos dados, é realizada a busca das causas raízes da falha. Nessa etapa são analisadas as causas fundamentais identificadas pelo diagrama de Ishikawa com criticidade alta e média – as atividades de criticidade baixa são avaliadas como causas não prováveis para a ocorrência da falha segundo a experiência dos engenheiros e técnicos da empresa. Para cada causa fundamental é identificada uma causa raiz com base na ferramenta dos 5 Porquês.

Assim, conhecendo-se as possíveis causas raízes que envolvem cada falha fundamental das bombas de deslocamento positivo, é iniciada a etapa de planejamento das ações de contenção. Nessa etapa são analisadas as possibilidades de ações corretivas para cada causa raiz identificada. Vale ressaltar que a etapa de planejamento das ações de contenção é realizada em conjunto com os técnicos e engenheiros da empresa durante a reunião de *brainstorming*. Além disso, para cada possível ação de bloqueio são avaliadas as suas aplicabilidades e efetividades para a contenção do problema. A elaboração dessa etapa envolve gerenciamento de pessoas, recursos e prazos (conforme estabelecido pela gerência da empresa) para sua execução.

A etapa de implementação, acompanhamento das ações e correção de desvios, como o próprio nome define, consiste na aplicação prática das ações de contenção propostas para a eliminação de cada causa raiz, no acompanhamento das ações de bloqueio.

A última etapa a ser realizada é de documentação que consiste na divulgação de relatórios, procedimentos e práticas realizadas no decorrer da análise. Por fim, após a conclusão de todas essas etapas é possível finalizar a elaboração da metodologia de análise de falha RCFA.

3.3 Variáveis e indicadores

De acordo com Gil (1999), uma variável pode ser classificada como sendo uma medida ou classificação. Ou seja, uma quantidade que varia um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis e indicadores adotados.

Variáveis	Indicadores
Manutenção das bombas de deslocamento positivo	<ul style="list-style-type: none">• Software SAP;• Lubrificação;• Limpeza;• Ruídos;• Estado do Pistão;• Estado dos diafragmas;• Estado das válvulas de sucção;• Estado das válvulas de descarga;• Líquido propulsor;• Conexões elétricas;• Conexões em válvulas pneumáticas.
Sistema de tratamento de falhas	<ul style="list-style-type: none">• Descrição das atividades;• Motivo da atividade;

	<ul style="list-style-type: none"> • Ações de bloqueio; • Causas Fundamentais; • Causas Raízes; • Tipos de Falhas. • Tipo de manutenção empregada; • Plano de ação.
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

3.4 Instrumento de coleta de dados

Nesta etapa, visando coletar informações para a elaboração do sistema de tratamento de falhas em bombas de deslocamento positivo foram utilizadas as seguintes técnicas para o embasamento do trabalho:

- Pesquisa bibliográfica;
- Reuniões de *brainstorming*;
- Consulta ao manual da bomba;
- Registros Institucionais (Planilhas e relatórios).

Esta pesquisa é de caráter bibliográfico, qualitativo, explicativo e estudo de caso, como já mencionado nesse capítulo. Para tanto, os dados necessários para os estudos serão adquiridos através de uma pesquisa bibliográfica – etapa fundamental - utilizando livros, teses, dissertações, catálogos, dados disponibilizados por empresas governamentais na internet e outros trabalhos já realizados, que auxiliam no entendimento e elaboração de um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo.

Além disso, outra etapa necessária para a coleta de informações no trabalho em questão são as reuniões de *brainstorming* que possibilitam a determinação das possíveis causas que geraram a falha em estudo através do diálogo com profissionais das áreas

disponibilizado pelo fabricante. Através do manual foram colhidas as seguintes informações mostradas na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Características de Operação da Bomba GEHO TZPM 2000.

Características de operação	
Localização do equipamento	Interior
Líquido a ser bombeado	Lodo, lodo de minério de ferro
Peso específico da mistura	2273 kg/m ³
Diâmetro máximo de sólido	6 mm
Concentração sólida, normal	66%
Concentração sólida, máxima	70%
Temperatura mínima do lodo	n/d
Temperatura operacional do lodo	+25 C
Temperatura máxima de lama	+35 C
Viscosidade máxima	15 cP

Fonte: Weir (2006).

Tabela 5 - Dados e identificação da bomba e do projeto.

Bomba GEHO 6200951 / 1-6	
Tipo de bomba	GEHO TZPM 2000
No. da bomba	GEHO 6200951/1-6
Diâmetro do pistão	290 mm
Tamanho da válvula	API 13
Tamanho do diafragma	47,5 litros
Tamanho do recipiente de ar de sucção	850 litros
Tamanho da válvula de nivelção de sucção	2 x 150 litros
Tamanho da válvula de nivelção de descarga	2 x 150 litros
Curso	508,0 mm.
Taxa de curso	Mínimo 6,1 cpm Máximo 60,7 cpm.
Capacidade	Mínimo 33,75 m ³ /hora Máximo 337.5 m ³ /hora
Pressão Operacional	15700 kPa
Força requerida	Mínimo 150 kW Máximo 1500 kW.

Fonte: Weir (2006).

A Tabela 4 refere-se a questões operacionais do fluido a ser bombeado pelas bombas de deslocamento positivo em questão, sendo muito importante, por exemplo, indicar características como temperatura máxima, concentração sólida normal e máxima, dentre outras. Já a Tabela 5 refere-se a informações construtivas e de projeto das bombas de deslocamento positivo, sendo muito úteis para a identificação de possíveis falhas de projeto, por exemplo.

Outros instrumentos utilizados para a coleta de dados durante as reuniões de brainstorming são as Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Planilha para elaboração do método dos Porquês.

Especialidade	Causa Fundamental	1.Por quê?	2.Por quê?	3.Por quê?	4.Por quê?	5.Por quê?

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

Tabela 7 - Planilha para elaboração do plano de ação 5W1H.

Contramedidas (What)	Justificativa (Why)	Responsável (Who)	Local (Where)	Cronograma (When)	Procedimento (How)

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

A Tabela 6 permite organizar os dados para a elaboração do método dos Porquês afim de se determinar a causa raiz para cada causa fundamental levantada e categorizada como alta e média na Tabela 3. Tal análise é realizada em conjunto com cada um dos colaboradores participantes da reunião de *brainstorming*. Já a Tabela 7 permite elaborar o plano de ação segundo a metodologia 5W1H para cada causa raiz determinada no método dos Porquês. A primeira coluna (What) permite identificar qual a contramedida para cada causa raiz, a segunda coluna (Why) define a justificativa para cada ação, a terceira coluna (Who) define o responsável pela ação, a quarta coluna (Where) define o local onde será executada a contramedida, a quinta coluna (When) define quando será executada a ação e a última coluna (How) define o detalhamento de como será executada a ação.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos pela pesquisa bibliográfica, pelas reuniões de *brainstorming* e pela observação direta do evento, os dados foram tabulados no software Excel, na forma de gráficos e fluxogramas. Além disso, é utilizado o *software* Microsoft Word para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas para realizar a elaboração do sistema de tratamento de falha das bombas de deslocamento positivo. Além disso, foram demonstrados todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além da apresentação da área em que ocorre a presente pesquisa e da forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos das análises propostas, além de mostrar quais foram os resultados das etapas adotadas para a elaboração do sistema de tratamento de falhas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da empresa

A empresa em estudo é produtora são pelotas de minério de ferro, os quais podem ser vistos na Figura 18.



Figura 18 - Pelotas de minério de ferro.
Fonte: Empresa pesquisada (2020)

A empresa atua transformando minerais de baixo teor de ferro em um produto nobre, de alto valor agregado, o qual é comercializado para a indústria siderúrgica mundial. Trata-se essencialmente de uma empresa exportadora.

A empresa possui três concentradores que beneficiam o minério e aumentam o seu teor de ferro. O transporte da polpa de minério de ferro é feito por meio de mineroduto que interliga a mina ao porto.

O estudo em questão se deu na Gerência de Mineroduto (GMI) – o qual é responsável por realizar o transporte da polpa de minério de ferro por uma distância aproximada de 396 quilômetros, no trajeto exemplificado pela Figura 19.

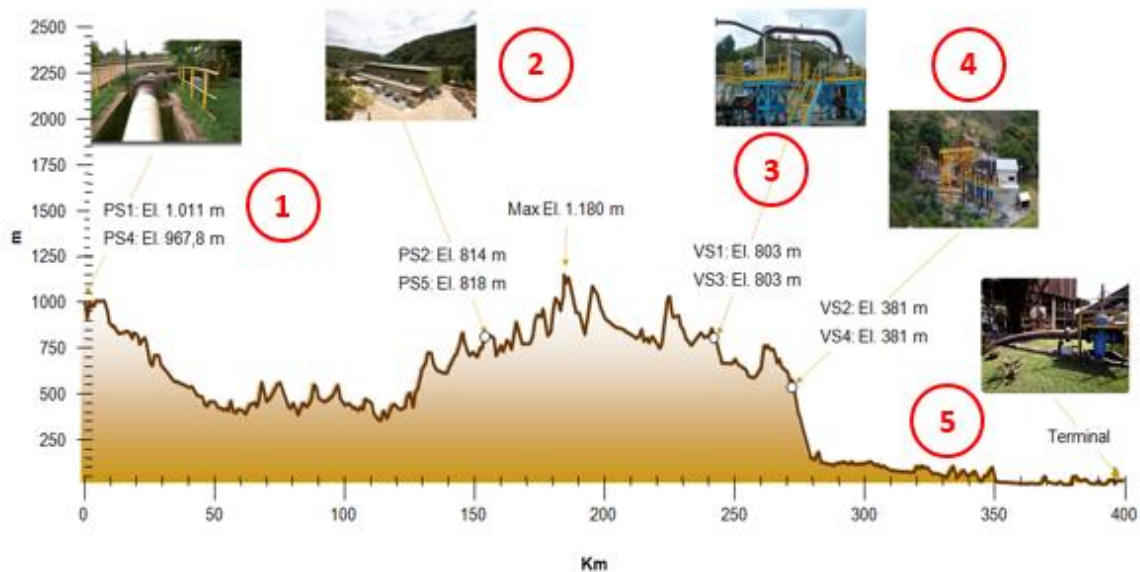


Figura 19 - Faixa de extensão do mineroduto.
 Fonte: Adaptado da empresa pesquisada (2020)

O início do bombeamento se dá nas estações de bombas situadas na cidade de Mariana (MG), ponto 1 da Figura 19. Na cidade de Matipó (MG) – ponto 2 - ficam as estações de bombas responsáveis por impulsionar a polpa para que ele consiga vencer a elevação de 1.180 metros da Serra do Caparaó. Logo após, há duas estações de válvulas, uma em Guaçuí (ponto 3) e outra em Alegre (ponto 4), ambas no Espírito Santo, que reduzem a velocidade do minério. Essa viagem tem duração de, aproximadamente, 60 horas, com uma velocidade média de seis quilômetros por hora. A tubulação, construída de chapas de aço API 5 LX – 60, é praticamente toda enterrada a cerca de 1,5 metros de profundidade e protegida contra corrosão, através de revestimento de fita de PVC e um sistema de proteção catódica por corrente impressa.

O trajeto do mineroduto passa por uma faixa de servidão, que é uma pista com 35 metros de largura. Para sinalizar sua passagem, foi instalado marcos que contêm um número de telefone DDG 24 horas (0800) para atendimento em caso de emergências. A cada início de ano, é elaborado um programa de manutenção ao longo da faixa de servidão, com o objetivo de recuperar os danos causados pelas chuvas e atender necessidades de proprietários.

A gerência de Mineroduto (GMI) é subdividida em três departamentos principais: Departamento de Operação, Departamento de Manutenção e Departamento de Integridade do Mineroduto, como pode ser visto na Figura 20.

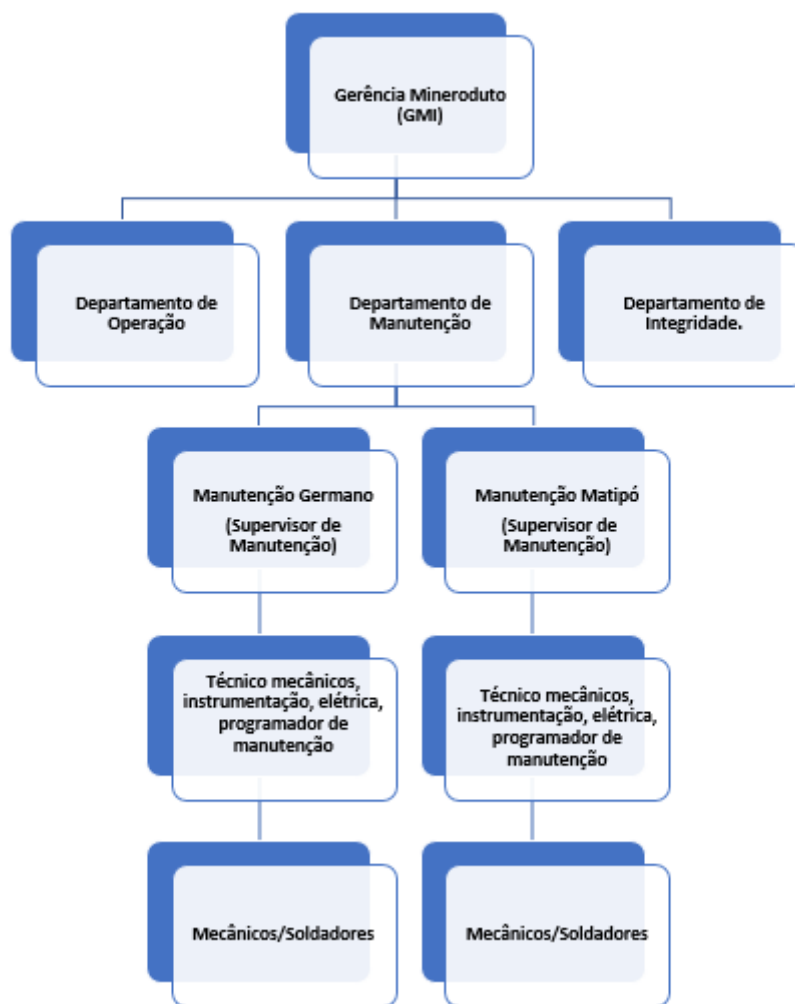


Figura 20 - Organograma GMI.
 Fonte: Pesquisa Direta (2020).

O Departamento de Manutenção da GMI, para o qual o trabalho é realizado, tem a função de garantir a disponibilidade de todos os ativos das estações de bombas e estações de válvulas da empresa. Para tal, faz uso de planos de manutenção criteriosos, inspeções programadas, elaboração de relatórios de desempenho dos equipamentos e análises de falhas dos ativos. Em caso de surgimento de falhas, é aberta uma ordem de serviço para a equipe de manutenção afim de que a mesma possa realizar a manutenção corretiva, conferindo ao equipamento boa funcionalidade.

4.2 Descrição das bombas de deslocamento positivo

As bombas alternativas de pistão com diafragma GEHO foram desenvolvidas especificamente para o manuseamento de líquidos contaminados com sólidos, na forma de lodo, lama ou pasta, nomeadamente quando envolver a utilização de materiais abrasivos ou agressivos.

Na empresa em questão, tais bombas são responsáveis pelo bombeamento da polpa de minério de ferro produzida na Usina de Beneficiamento em Minas Gerais até as Usinas de Pelotização no Espírito Santo. A Figura 21 mostra uma imagem frontal de uma bomba da estação de bombas 4 (EBIV) sem as tampas da carcaça do diafragma.



Figura 21 – Bomba Geho TZPM 2000 na estação de bombas 4.
Fonte: Pesquisa direta (2020).

Na Figura 21 os números 1, 2, 3 e 4 indicam os Dampeners, dispositivos que atuam nos picos de pressão, para reduzir a força que a bomba sofre durante o bombeamento. Os números 5, 6, 7 indicam os blocos de sucção onde ficam as válvulas de sucção, enquanto os números 9, 10 e 11 indicam os blocos de descarga onde ficam as válvulas de descarga – vale ressaltar que a pressão de descarga das bombas é de 160 kgf/cm². A indicação de número 8

representa o estojo da bomba, dispositivo de fixação entre a tampa e o bloco do diafragma. Já a indicação de número 12 mostra o diafragma, que é o dispositivo que separa o líquido bombeado do líquido propulsor limpo.

O trabalho em questão é realizado para as bombas de deslocamento positivo da estação de bombas EBIV, nesta estação há três bombas. Quando as três bombas atuam simultaneamente elas operam numa faixa de 61% a 67% de sua velocidade para atender a vazão desejada de polpa de minério de ferro. Caso uma das bombas necessite de manutenção as outras duas irão operar numa faixa de velocidade entre 91% e 100% da sua capacidade, dependendo da vazão requerida. Tais dados podem ser observados analisando-se a Tabela 8.

Tabela 8 - Controle de velocidades das bombas Geho TZPM 2000.

Vazão – m³/h	Velocidade mínima – m/s	Velocidade – Bombas - %	
		Duas bombas operando	Três bombas operando
615	1,40	91	61
635	1,46	94	63
675	1,55	100	67

Fonte: Weir (2006).

Por estarem ligadas diretamente ao processo de produção da empresa, as bombas de deslocamento positivo são consideradas equipamentos críticos devendo ter alta disponibilidade para operação, o que exige uma manutenção bastante eficaz.

4.3 Diagnóstico do sistema de tratamento de falha

4.3.1 Elaboração do sistema de tratamentos de falhas

As bombas de deslocamento positivo, situadas na estação de bombas IV, apresentaram elevada vibração ao realizarem o bombeamento com água durante a fase de pré-comissionamento da empresa de mineração. Devido à recorrência da falha e uma busca ao rompimento do círculo vicioso das falhas, visa-se à elaboração de um sistema de tratamento de falhas, seguindo as etapas apresentadas a seguir.

4.3.2 Registro da ocorrência da falha

A detecção da falha foi feita pela equipe de operação durante a fase de pré-comissionamento das bombas. As bombas de deslocamento positivo apresentaram comportamento anormal ao bombearem água, tal comportamento poderia comprometer a integridade do ativo e acarretar possíveis falhas, como a quebra de componentes. O fluxograma apresentado na Figura 22 mostra o caminho percorrido pela informação na empresa em estudo, desde a detecção pelo operador até a equipe de manutenção.

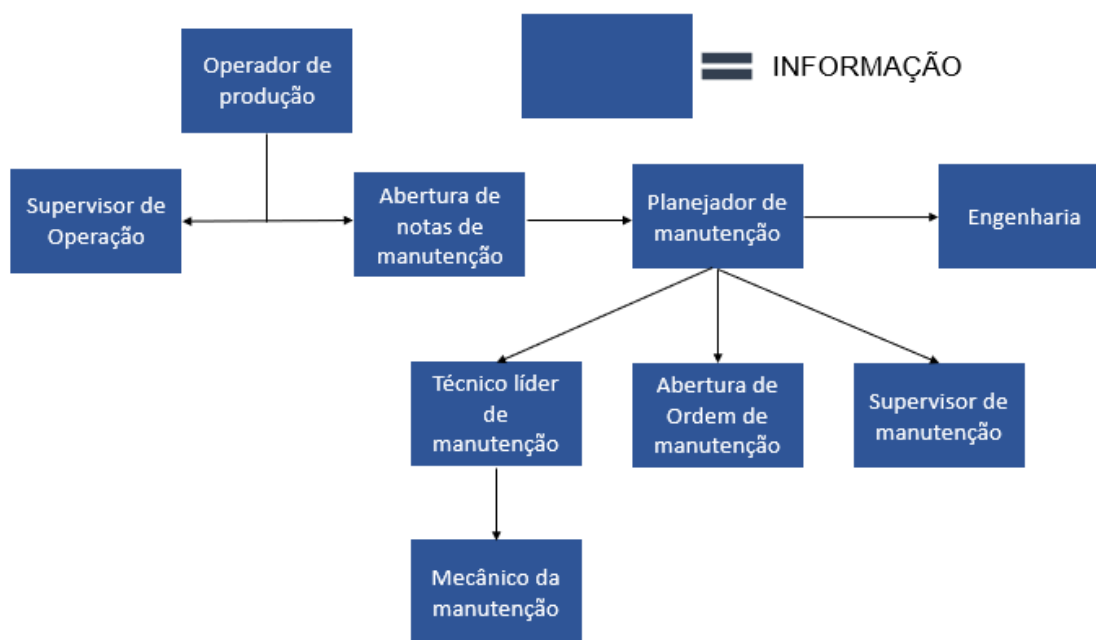


Figura 22 - Fluxograma de informações para relato de falha.

Fonte: Pesquisa direta (2020).

Como mostrado na Figura 22, após a detecção da falha o operador fez a abertura de notas de manutenção no software SAP. Por meio do próprio software, tais notas de manutenção foram encaminhadas para a equipe de manutenção, para o planejador de manutenção, que repassou tais informações para os técnicos responsáveis, para o supervisor de manutenção e para o setor da engenharia de manutenção da própria GMI, a qual é responsável pela elaboração de uma análise de falha e criação de plano de ação para evitar a recorrência do modo de falha. A Figura 23 mostra uma das notas de manutenção abertas pela operação do mineroduto.

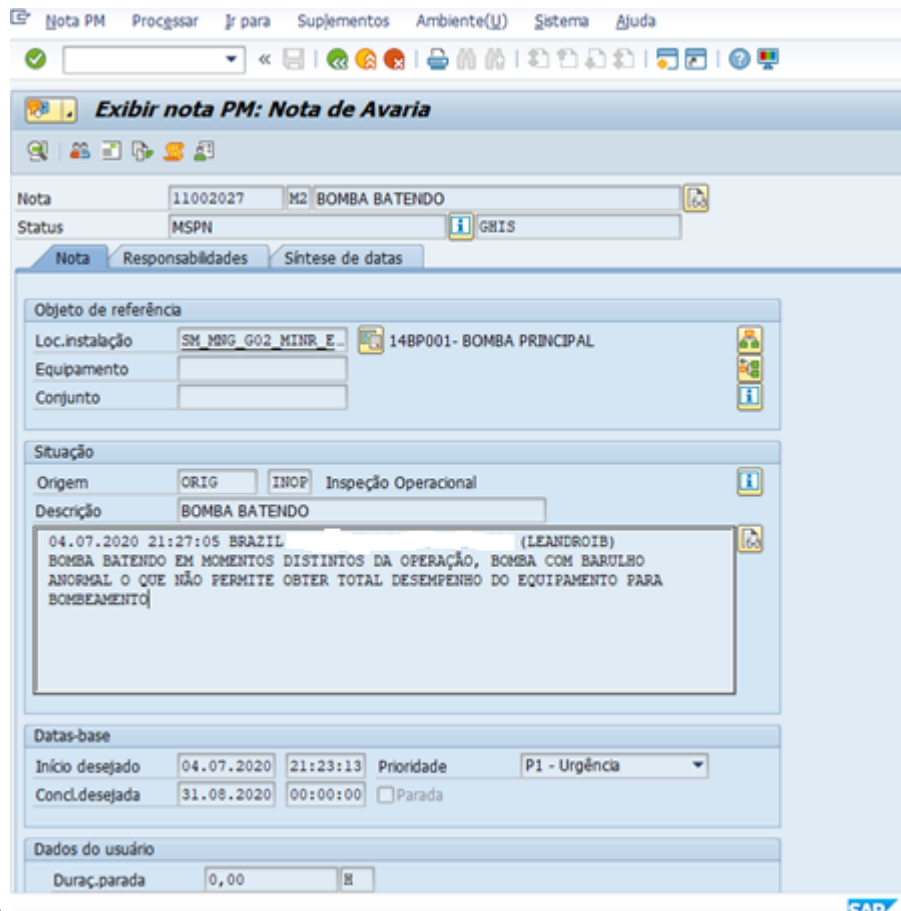


Figura 23 - Nota de manutenção para a bomba 214BP001.

Fonte: SAP(2021).

Como mostrado na Figura 23, a nota de manutenção com o título “bomba batendo” e o local de instalação referente ao equipamento 214BP001 (bomba principal) refere-se ao modo de falha em estudo e foi a partir dessa nota que se iniciou a necessidade da elaboração da análise de falha.

4.3.3 Investigação das causas fundamentais da falha

Após a detecção do modo de falha feita pelo operador, a equipe de manutenção juntamente com a equipe de operação realizou uma reunião de *brainstorming* para a investigação das possíveis causas da falha. A Tabela 9 mostra as informações levantadas durante essa fase.

Tabela 9- Dados coletados na fase de brainstorming.

BRAINSTORMING			
Especialidade	Categoria da Falha	Descrição	Criticidade
INS	Equipamentos	Falha nos instrumentos (Mau contato nos cabos dos sensores, eletroduto flexível danificado dos instrumentos)	Média
MEC	Equipamentos	Falhas na montagem das HV's	Alta
INS	Equipamentos	Falhas no ar de acionamento das HV's	Alta
MEC	Equipamentos	Falha no sistema de sede/válvula dos blocos da sucção/descarga	Alta
ELE	Equipamentos	Falha no sistema de controle das Bombas Principais (automação/CLP)	Média
MEC	Equipamentos	Falha na camisa de pistão/gaxeta	Média
OPR	Métodos	Verificar calibração dos sistemas de DAMPERS	Alta
MEC	Equipamentos	Analisar vazamentos nos diafragmas (possível furo)	Baixa
OPR	Métodos	Baixa pressão de sucção/descarga das bombas principais	Alta
OPR	Métodos	Operação com água (pressão requerida é menor, gradiente de temperatura diferente da operação com polpa)	Alta
MEC	Equipamentos	Falha no sistema de check válvula (válvula de alívio) do sistema de propilente (líquido propulsor)	Média
MEC	Capacitação	Falta de assistência técnica do fornecedor	Baixa
OPR	Capacitação	Condição de operação anormal	Alta
MEC	Capacitação	Falta de treinamento para a manutenção	Média
MEC	Capacitação	Falha na execução do procedimento de prime	Média

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Inicialmente na Tabela 9 é mostrada a coluna das especialidades que participaram da reunião de *brainstorming* e que serão responsáveis pelas tratativas traçadas no plano de ação, são elas: mecânica (MEC), elétrica (ELE), instrumentação (INS) e operação (OPR) - vale ressaltar que a participação do supervisor de manutenção e do engenheiro de manutenção são para agregar mais informações e conhecimento técnico, mas a tratativa do plano de ação será executado pelos técnicos. Além disso, na coluna de criticidade serão avaliadas o grau de severidade (alta, média e baixa) de cada umas das causas levantadas nessa fase, apenas as causas avaliadas com criticidade alta e média serão consideradas causas fundamentais para análise na ferramenta dos 5 Porquês.

Como já dito anteriormente, tal avaliação de criticidade é realizada com um caráter subjetivo através da experiência técnica dos participantes do *brainstorming*. A Figura 24 mostra um comparativo do tempo de experiência dos participantes do *brainstorming* no setor do mineroduto.

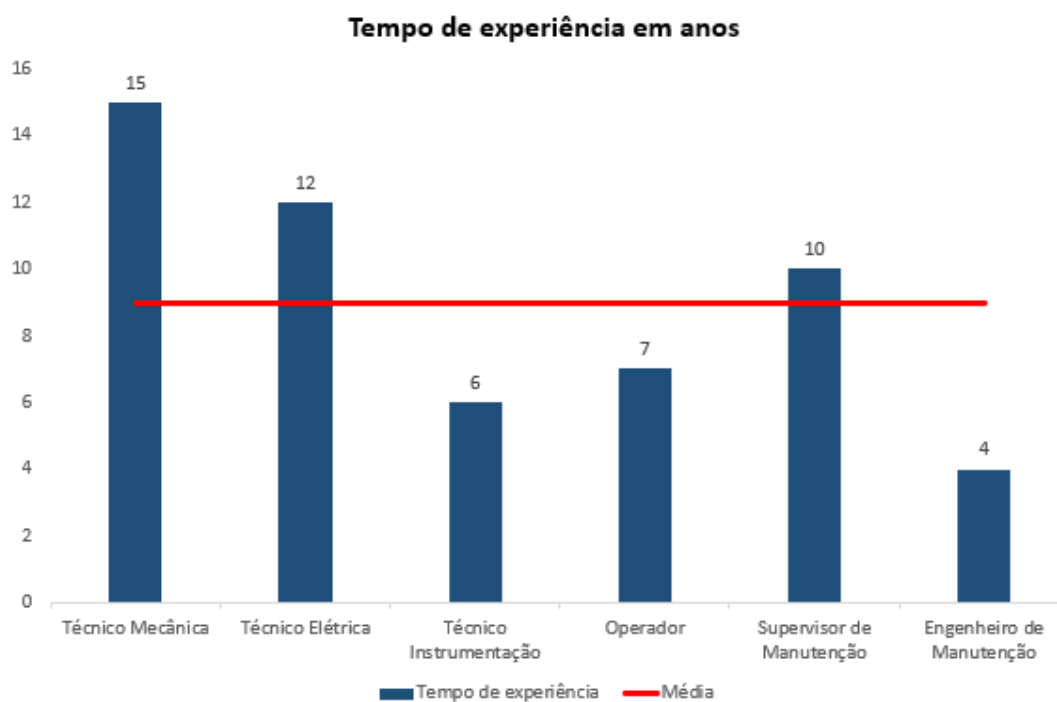


Figura 24 - Tempo de experiência participantes brainstorming.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como é possível notar na Figura 24, os técnicos da mecânica, elétrica e o supervisor de manutenção são os participantes do brainstorming com o maior tempo de experiência no mineroduto, ultrapassando a média de anos de experiência do grupo que é de 9 anos, com o maior destaque para o técnico mecânico com 15 anos de experiência em manutenção de mineroduto. O nível de experiência e conhecimento técnico também pode ser notado na contribuição com o *brainstorming*, das 15 causas prováveis de falha, 8 foram levantadas pelo técnico da mecânica, o que representa 53% do quantitativo de causas sugeridas.

Após a etapa de *brainstorming*, é feita uma avaliação dos dados coletados de forma a entender e identificar as principais categorias de falhas levantadas durante a fase do *brainstorming*, tal categorização é feita pelo diagrama de causa e efeito mostrado na Figura 25.

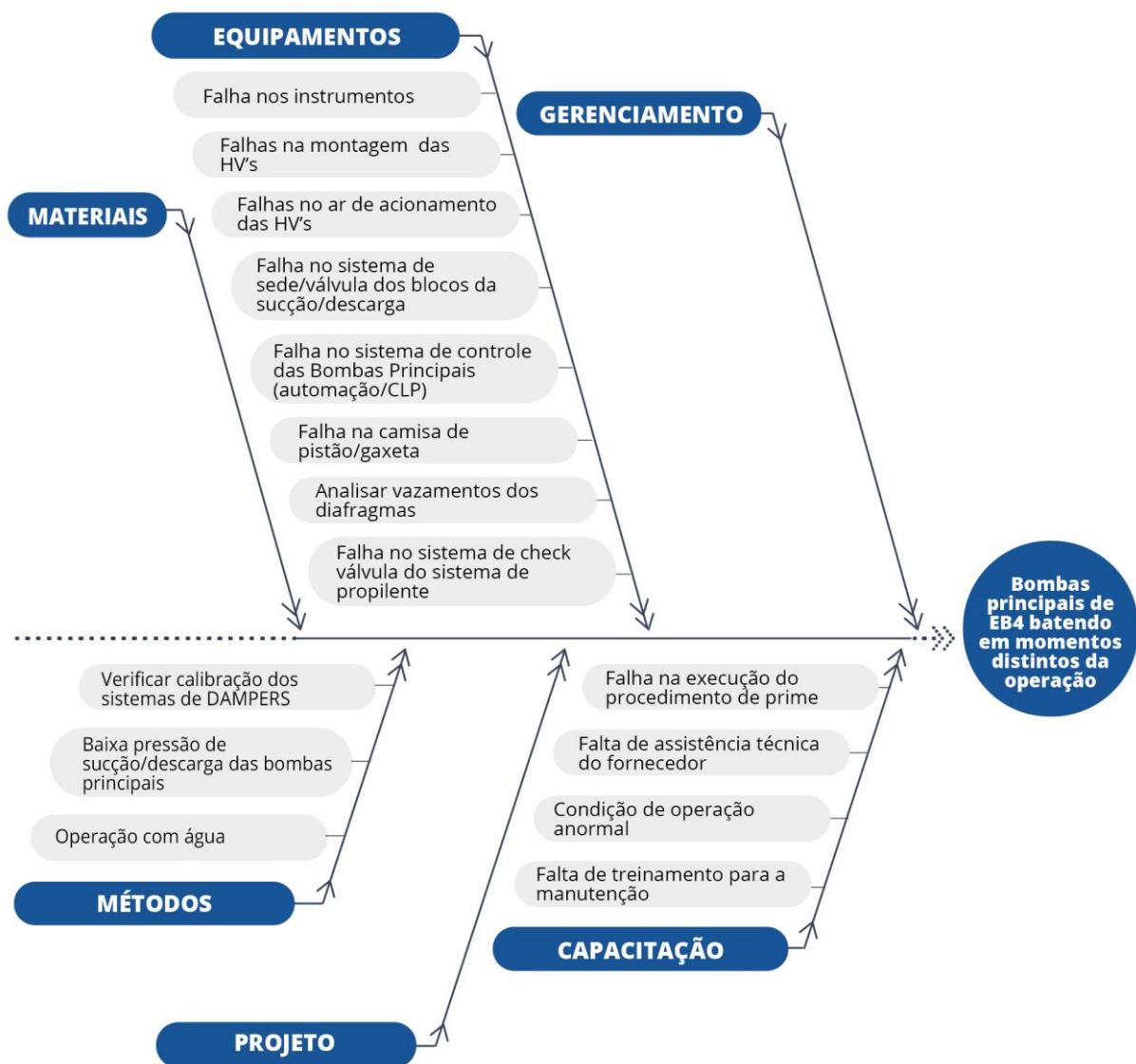


Figura 25 - Diagrama de causa e efeito.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como pode ser visto na Figura 25, dentre as falhas levantadas durante a fase do *brainstorming*, o maior quantitativo se refere a categoria de Equipamentos, ou seja, segundo os participantes da reunião, a maior parte das causas fundamentais da falha podem estar ligadas à condição dos componentes do equipamento ou sistema de bombeamento. Dentre as 15 causas fundamentais de falha levantadas, 8 são da categoria Equipamentos, 5 da categoria Capacitação e 3 da categoria Métodos.

Após a etapa de avaliação dos dados, é iniciada a etapa de busca das causas raízes da falha. Nessa etapa, para cada causa fundamental de criticidade alta e média, será identificada uma causa raiz por meio da ferramenta dos 5 Porquês. Vale ressaltar que devido a uma escolha pessoal dos supervisores da manutenção e da operação, apenas as atividades da manutenção (mecânica, elétrica, instrumentação) serão abordadas no plano de ação em questão. Na Tabela 10 pode ser vista a elaboração do método dos Porquês para cada uma das causas fundamentais levantadas para mecânica, elétrica e instrumentação.

Tabela 10 - Elaboração do método dos 5 Porquês.

Especialidade	Causa Fundamental	1.Por quê?	2.Por quê?	3.Por quê?	4.Por quê?	5.Por quê?
INS	Falha nos instrumentos (Mau contato nos cabos dos sensores, eletroduto flexível danificado dos instrumentos)	Cabos danificados ou mau contato nos bornes da caixa de ligação	Falta de proteção dos cabeamentos (falta de eletroduto flexível) e afrouxamento por vibração/oxidação dos bornes.			
INS	Falhas no ar de acionamento das HV's.	Vazamento de ar nos conectores ou mangueiras do conjunto HV.				
ELE	Falha no sistema de controle das Bombas Principais (automação/CLP)	Cartões do controlador defeituosos.				
MEC	Falhas na montagem das HV's	Falta de conhecimento do procedimento de montagem do conjunto HV.	Falta de treinamento com o fabricante da bomba Geho.			
MEC	Falha no sistema de sede/válvula dos blocos da sucção/descarga	Quebra de batente/mola do conjunto de válvulas dos blocos de sucção/descarga.				
MEC	Falha na camisa de pistão.	Desgaste da camisa de pistão/Falha na				

		recuperação da camisa				
MEC	Falha no sistema de válvula check do sistema de propelente (líquido propulsor)	Desgaste da parte de vedação da válvula check				

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como pode ser visto na Tabela 10, cada umas das causas fundamentais da falha em estudo são organizadas na coluna “causas fundamentais”. O responsável pela tratativa de cada causa raiz está especificado na coluna “especialidade”. Para cada causa fundamental é encontrada uma causa raiz pelo método dos 5 Porquês. Para a execução desse método foi necessário a participação de todos da reunião *brainstorming* e o resultado comparativo entre causa a fundamental da falha e a causa raiz pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Causas raízes encontradas com base na ferramenta dos 5 Porquês.

Causa provável	Causa raiz
Falha nos instrumentos (Mau contato nos cabos dos sensores, eletroduto flexível danificado dos instrumentos)	Falta de proteção dos cabamentos (falta de eletroduto flexível) e afrouxamento por vibração/oxidação dos bornes.
Falhas no ar de acionamento das HV's	Vazamento de ar nos conectores ou mangueiras do conjunto HV.
Falha no sistema de controle das Bombas Principais (automação/CLP)	Cartões do controlador defeituosos
Falhas na montagem das HV's	Falta de treinamento com o fabricante da bomba Geho.
Falha no sistema de sede/válvula dos blocos da sucção/descarga	Quebra de batente/mola do conjunto de válvula dos blocos de sucção/descarga
Falha na camisa de pistão/gaxeta	Desgaste da camisa de pistão/Falha na recuperação da camisa.
Falha no sistema de válvula check do sistema de propelente (líquido propulsor)	Desgaste da parte de vedação da válvula check.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como pode ser visto na Tabela 11, para cada causa fundamental foi encontrada uma causa raiz, assim, conhecendo-se as possíveis causas raízes é iniciada a etapa de planejamento das contramedidas. Nessa etapa são analisadas as possibilidades de ações corretivas para cada causa raiz identificada, tal ação também é tomada em conjunto com os integrantes do brainstorming.

4.4 Proposta do sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo

A fim de assegurar que as causas raízes das falhas determinadas pela ferramenta dos 5 Porquês sejam eliminadas por definitivo, faz-se necessário a elaboração de contramedidas. A Tabela 12 apresenta um plano de ação (5W1H) para cada causa raiz determinada pela ferramenta dos 5 Porquês.

Tabela 12 - Plano de ação 5W1H

Contramedidas (What)	Justificativa (Why)	Responsável (Who)	Local (Where)	Prazo (When)	Procedimento (How)
Instalar eletrodutos flexíveis nos cabeamentos dos sensores e verificar conexões da caixa de ligação.	Evitar mau contato nos sensores e possíveis paradas dos equipamentos.	A	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	21/08/2020	Instalar eletroduto e reapertar conexões dos mesmos.
Verificar linha de transmissão de ar das HV's e solenoides.	Evitar perda de ar na linha de transmissão e evitar parada dos equipamentos	A	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	14/08/2020	Reapertar conexões de ar e inspecionar possíveis furos na linha
Testar cartões de entrada e saída o CLP da bomba. Em caso de defeito, trocar.	Evitar parada dos equipamentos	B	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	21/08/2020	Verificar atuação dos cartões no painel da bomba.
Realizar treinamento	Tal treinamento irá	C	Estação de	30/11/2020	Treinamento sobre

com fabricante da bomba para bomba geho.	agregar para o conhecimento técnico da equipe.		bombas 4		procedimentos de manutenção em geral.
Inspecionar sedes de válvula e verificar procedimento de montagem das sedes de válvulas	Evitar parada dos equipamentos por sedes com mau acabamento ou por instaladas incorretamente.	D	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	27/11/2020	Abrir todos os blocos de sucção e descarga e verificar acabamento das sedes e também rever procedimento de manutenção
Inspecionar as camisas de pistão.	Garantir a disponibilidade dos equipamentos	E	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	04/09/2020	Abrir a unidade de pistão das bombas e inspecionar possíveis danos no acabamento da camisas de pistão
Inspecção na vedação das válvulas check	Garantir a disponibilidade dos equipamentos	E	Bombas principais 214BP001 214BP002 214BP003	25/09/2020	Abrir unidade das válvulas check e verificar desgaste ou encaixe errado das vedações.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como pode ser visto na Tabela 12, a primeira coluna identifica a ação de contramedida que será executada, na segunda coluna é identificado o motivo/justificativa para a execução da ação planejada, a terceira coluna identifica o responsável pela execução da contramedida, a quarta coluna define o local onde a ação será executada, a quinta coluna estabelece o prazo para a execução da atividade e por fim, a última coluna identifica como a ação será executada, ou seja, define o detalhamento de como a ação será implementada.

Dessa forma, a Tabela 12 apresenta uma sugestão de um plano de ação (5W1H) de manutenção para as bombas de deslocamento positivo que estão apresentando defeito. Com a aplicação das ações contidas no plano de ação, espera-se, de maneira segura e eficaz, eliminar a falha nas bombas de deslocamento positivo, a fim de evitar paradas não programadas e garantir maior produtividade para a empresa.

A Figura 26 mostra as etapas necessárias para a elaboração do sistema de tratamento de falhas.

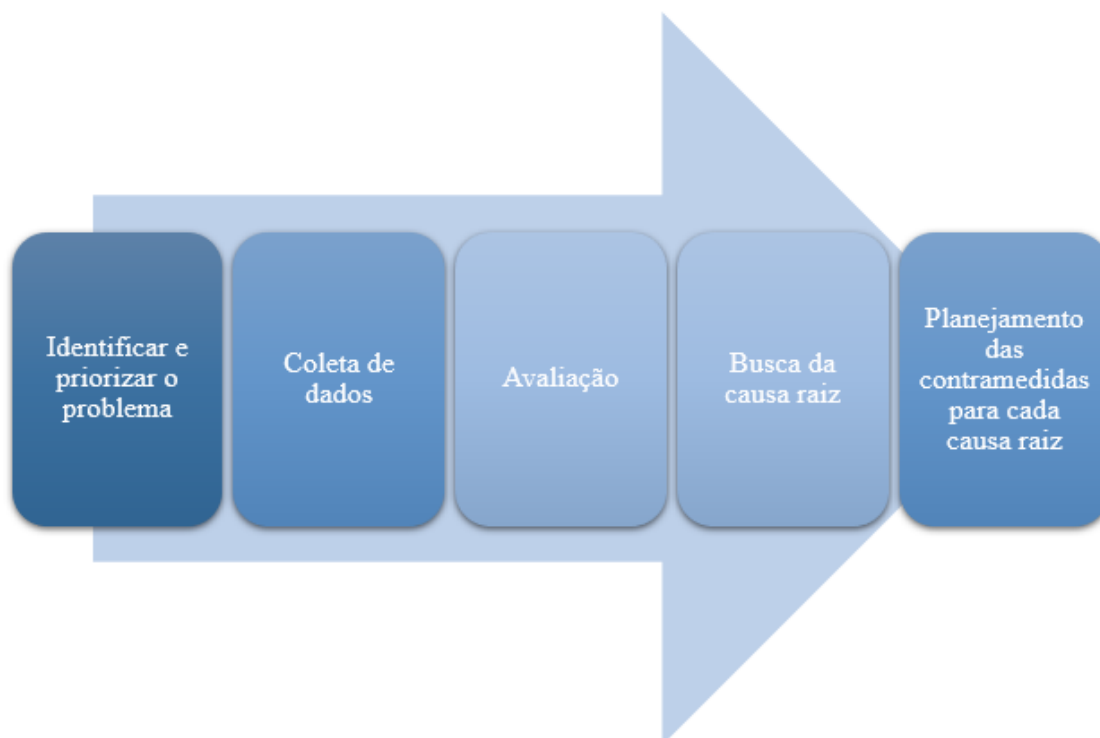


Figura 26 - Etapas para elaboração do sistema de tratamento de falhas.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Dessa forma, cada uma das etapas expostas na Figura 26 é crucial para a elaboração de uma análise de falha segundo a metodologia RCFA. Inicialmente a etapa de identificar o problema é feita com base na observação direta em campo e por meio da abertura de notas técnicas pela equipe da operação. Já a priorização do problema é feita com base no pedido da gerência, pois as bombas de deslocamento positivo são ativos críticos, o que justifica a elaboração do sistema de tratamento de falhas. A etapa de coleta de dados é feita com base na análise retrospectiva dos eventos e condições que culminaram na ocorrência da falha. No caso em questão foi necessário analisar atividades, equipamentos e *softwares* relacionados com a ocorrência, além de possíveis desvios nos procedimentos de manutenção/operação. Para a etapa de coleta de dados a realização de reuniões de *brainstorming* permitiu um maior direcionamento técnico para as possíveis causas da falha. A etapa de avaliação permite entender e identificar o que possivelmente causou a falha. Nessa etapa foi utilizado o diagrama de causa e efeito para organizar os dados coletados em categorias pré-estabelecidas e ainda avaliar a criticidade (alta, média, baixa) de cada possível ocorrência levantada na fase

do *brainstorming*. Após a avaliação das causas fundamentais das falhas – neste trabalho avaliou-se as causas fundamentais identificadas pelo diagrama de Ishikawa com criticidade alta e média - pode-se partir para a etapa de busca das causas raízes - no trabalho em questão utilizou-se a ferramenta dos 5 Porquês para identificar uma causa raiz para cada causa fundamental. Por fim, conhecendo-se as possíveis causas raízes que envolvem cada falha fundamental das bombas de deslocamento positivo, é iniciada a etapa de planejamento das contramedidas por meio do plano de ação 5W1H.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

O objetivo desse trabalho é propor a elaboração de um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo de uma empresa do setor de mineração. Para tanto, foi realizada uma pesquisa exploratória alinhada a um estudo teórico sobre as ferramentas de manutenção para gerar embasamento das tomadas de decisões. As etapas do trabalho, tais como a descrição da empresa, a caracterização do equipamento, o registro da ocorrência da falha, a investigação das causas fundamentais da falha e a elaboração do plano de ação, permitiram a elaboração de uma proposta de um sistema de tratamento de falhas para as bombas de deslocamento positivo para a empresa em questão. É importante destacar que mesmo com as ações de contenção propostas, o modo de falha pode voltar a reincidir. Desta forma, apenas uma análise periódica dos registros de falhas levará a identificação dos problemas das bombas de deslocamento positivo. Diversas falhas são triviais enquanto poucas são significativas. Dessa forma, é importante analisar os registros das falhas e gerar uma comunicação mais efetiva entre as equipes da manutenção e operação para a resolução mais ágil e econômica dos problemas que vierem a surgir. Com a elaboração da proposta é possível concluir que, para o desenvolvimento de um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo, é necessário inicialmente identificar o problema, coletar dados e avaliá-los por meio de reuniões de *brainstorming* com colaboradores que trabalhem diretamente com o equipamento. Em seguida, é necessário estabelecer as causas raízes para cada causa fundamental levantada na fase de avaliação e em seguida traçar planos de ação para conter a causa raiz determinada. Dessa forma, espera-se eliminar/reduzir a falha nas bombas de deslocamento positivo e evitar paradas não programadas e garantir maior produtividade do equipamento.

5.2 Recomendações

Após propor o desenvolvimento de um sistema de tratamento de falhas para bombas de deslocamento positivo, recomenda-se a algumas propostas para estudos futuros:

- Fazer melhorias futuras para o sistema de tratamentos de falhas das bombas de deslocamento positivo, segundo a metodologia PDCA.
- Propor estudos de elaboração de planos de manutenção preventiva, visando à revisão dos planos de manutenção das bombas de deslocamento positivo.
- Elaboração de um plano de ação mais robusto que englobe tanto a manutenção quanto a operação do mineroduto.

6 REFERÊNCIAS

ABRAMAN – Documento Nacional – **A situação da Manutenção no Brasil**. Brasil: Rio de Janeiro, 2001.

ABRAMAN - Documento Nacional – **A situação da Manutenção no Brasil**. Brasil: Porto Alegre, 2003.

ABRAMAN - Documento Nacional – **A situação da Manutenção no Brasil**. Brasil: Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>> Acesso em 10 set. 2019.

ANCINES, C. A. **Determinação experimental e numérica das curvas de funcionamento de bombas centrífugas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5462: **Confiabilidade e mantabilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BARBOSA, C. M. S. L. **Desenvolvimento da análise RCFA na ColepCCL**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

BARROS, T. L. **O uso da ferramenta RCFA para solucionar e diminuir falhas em uma máquina de prensa de uma indústria têxtil**. Anais do VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 2016.

BOZOLLA, A. R. **Bombeamento de Polpa de Minério de Ferro via Mineroduto**. Artigo técnico RB studio 016. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/290137679/Bombeamento-de-Polpa-de-Minerio-de-Ferro-via-Mineroduto/>>. Acesso em: 23 de agosto. 2020.

BRANCO, F. G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, 2002.

FONSECA, J. G. **Descrição do sistema elevatório de abastecimento de água no município de Mossoró – RN**. Universidade Federal do Semi-Árido – UFERSA, 2013.

FOUST, A.S., WENZEL, A.L., CLUMP, W.C., MAUS, L., ANDERSON, B.L. **Princípio das Operações Unitárias**. Segunda Edição. Rio de Janeiro, 1982.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2009.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função estratégica**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2013.

LAMB, A. M.; NETO, S. L. H. C.; LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; GOLDMEYER, D. B. **Modelo de Planejamento e Controle da Manutenção Para Empresas de Saneamento Básico**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 2013.

MAGRI, J. M. **Aplicação do método QFD no setor de serviços: estudo de caso em um restaurante**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

MOUBRAY, John. **Manutenção Centrada em Confiabilidade** (Reliability-centred Maintenance) - Edição Brasileira, São Paulo, SPES, 2000.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Revista Gestão Industrial, v. 4, n. 02, p. 01-16, 2008.

PASSAMAI, B. D; CASTILHO, G. B. **Nova metodologia de análise de falha em empresa de refrigerante – proposta e estudo de caso**. Espírito Santo, UFES, 2007.

POSSO, R. K. **Análise dos Fatores de Influência na Aplicação do “FMEA de Processo” em Produtos Estampados e sugestão de melhoria**. Curitiba: UTFPR, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais), Campus de Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

PREINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da Produção (Operações Industriais e de Serviços)**. Curitiba: UnicenP, 2007.

SANTOS, S. L. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE, 2007.

SHARMA, R. K; SHARMA, P. **Methodology and Theory System Failure Behavior and Maintenance Decision Making Using RCA, FMEA and FM**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. v.16, 2010.

SILVA, C. E. S.; TIN, J. V.; OLIVEIRA, V. C. **Uma Análise da Aplicação da FMEA nas Normas de: Sistema de Gestão pela Qualidade (ISO9000 e QS9000), Sistema de Gestão Ambiental (ISO14000) e Sistema de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho (BS8800 – futura ISO18000)**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 17., 1997. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2ª ed. São Paulo: 2002, Atlas.

TAVARES, Lourival. **Administração Moderna de Manutenção**. Novo Pólo Editora – New York, 1998.

VIANA, H. R. G. **PCM- Planejamento e Controle de Manutenção**. Qualitymark Ed, Rio de Janeiro. 2002.

WEIR, M. N. Manual de Instalação, Manutenção e Operação da bomba GEHO TZPM 2000. Holanda: Netherlands, (2006).

XENOS, H. G. Gerenciando a Manutenção Produtiva. 1ª edição. Rio de Janeiro: INDG, 1998. 302 p.