



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



GABRIEL GRANATO ALVES ROCHA

**LEAN SEIS SIGMA PARA O PLANEJAMENTO E GESTÃO DA
MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO PARA O AUMENTO DA
DISPONIBILIDADE DE FILTROS ROTATIVOS NO SETOR DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2024

Gabriel Granato Alves Rocha
gabriel.granato@aluno.ufop.edu.br

**LEAN SEIS SIGMA PARA O PLANEJAMENTO E GESTÃO DA
MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO PARA O AUMENTO DA
DISPONIBILIDADE DE FILTROS ROTATIVOS NO SETOR DE MINERAÇÃO**

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

Professora orientadora: Irce Fernandes Gomes Guimarães

OURO PRETO – MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672l Rocha, Gabriel Granato Alves.
Lean seis sigma para o planejamento e gestão da manutenção
[manuscrito]: um estudo de caso para o aumento da disponibilidade de
filtros rotativos no setor de mineração. / Gabriel Granato Alves Rocha. -
2024.
64 f.

Orientadora: Profa. Dra. Irce Fernandes Gomes Guimarães.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Manutenção. 2. Indústria mineral. 3. Planejamento. 4. Six sigma
(Padrão de controle de qualidade). 5. Lean manufacturing. I. Guimarães,
Irce Fernandes Gomes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Cristiane Maria da Silva - CRB6-3046



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Granato Alves Rocha

Lean Seis Sigma para o Planejamento e Gestão da Manutenção: Um Estudo de Caso para o Aumento da Disponibilidade de Filtros Rotativos no Setor de Mineração

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

Aprovada em 14 de outubro de 2024

Membros da banca

Dra. Irce Fernandes Gomes Guimarães (Presidente - UFOP) - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Simone Aparecida Simões Rocha - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheira Laura Elisa Ferreira Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Irce Fernandes Gomes Guimarães, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Irce Fernandes Gomes Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/10/2024, às 18:49, 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 **0794574** e o código CRC **5AC3C233**.

À minha família pelo amor, apoio e confiança.

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio de pessoas especiais que, de diferentes formas, contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar forças e sabedoria em todos os momentos dessa caminhada.

À minha mãe, Edilene, minha principal fonte de inspiração e apoio incondicional. Sua dedicação e incentivo constantes foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios deste projeto. Ao meu pai, José Carlos, por sempre acreditar no meu potencial e me motivar a seguir em frente, mesmo nas horas mais difíceis.

Agradeço também à minha orientadora, Irce, pela paciência, orientação e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e apoio foram essenciais para a conclusão deste projeto.

Estendo meus agradecimentos também a toda minha família, por estarem sempre ao meu lado e pelo amor e apoio que me proporcionaram ao longo dessa jornada.

RESUMO

A disponibilidade dos equipamentos para operação no setor industrial e no setor de mineração é fundamental para a produtividade e sustentabilidade das empresas. Nesse contexto, a aplicação da metodologia *Lean Seis Sigma* integrada com as ferramentas do planejamento e controle da manutenção pode proporcionar maneiras de aumentar a disponibilidade dos equipamentos presentes nas indústrias. Através da aplicação da pesquisa-ação em uma planta de filtragem de minério, buscou-se aumentar a disponibilidade dos filtros rotativos presentes no processo. Utilizando a base teórica do Lean Seis Sigma para identificar os problemas que deveriam ser solucionados no setor de manutenção da empresa e orientar a aplicação das ferramentas de planejamento e controle da manutenção, foi possível aumentar significativamente a disponibilidade dos filtros rotativos e, por consequência, sua produtividade. Este trabalho demonstra, de forma prática, o alcance do objetivo proposto de aumentar a disponibilidade dos equipamentos e apresenta de maneira clara os meios utilizados.

Palavras-chave: Tempo de inatividade, Lean Manufacturing, Lean Seis Sigma, Planejamento e controle da manutenção, Gestão da Manutenção, Indústria de mineração, DMAIC.

A B S T R A C T

The availability of equipment for operation in the industrial and mining sectors is fundamental to the productivity and sustainability of companies. In this context, the application of the Lean Six Sigma methodology integrated with maintenance planning and control tools can provide ways to increase the availability of equipment present in industries. Through the application of action research in an ore filtration plant, we sought to increase the availability of rotating filters present in the process. Using the theoretical basis of Lean Six Sigma to identify the problems that should be solved in the company's maintenance sector and guide the application of maintenance planning and control tools, it was possible to significantly increase the availability of rotating filters and, consequently, their productivity. This work demonstrates, in a practical way, the achievement of the proposed objective of increasing the availability of equipment and clearly presents the means used.

Keywords: Downtime, Lean Manufacturing, Lean Six Sigma, Maintenance Planning and Control, Maintenance Management, Mining Industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análise de coorrência das palavras-chave	13
Figura 2: Conexões da Palavra-Chave Gestão	14
Figura 3: Quantidade de artigos por ano de Publicação	15
Figura 4: Filtragem no Processo de Pelotização do minério de ferro.....	17
Figura 5: Setores e Tecidos dos Filtros Rotativos	18
Figura 6: Formação do pellet feed nos tecidos filtrantes.....	19
Figura 7: Vista explodida dos componentes dos filtros.....	19
Figura 8: Tipos de Manutenção	20
Figura 9: Histórico de Evolução da Manutenção	21
Figura 10: Curva da Banheira.....	23
Figura 11: Lean Seis Sigma atuando na melhoria do processo	24
Figura 12: Etapas e objetivos do DMAIC	24
Figura 13: Exemplo de aplicação do diagrama de Ishikawa	25
Figura 14: Exemplo de um Gráfico de Pareto	26
Figura 15: Representação da regressão linear	26
Figura 16: Exemplo de um histograma.....	28
Figura 17: Representação da regressão linear	29
Figura 18: Ciclo Pesquisa-ação	30
Figura 19: Ciclo DMAIC.....	31
Figura 20: Organização da Pesquisa-ação	32
Figura 21: Comparativo entre pesquisa-ação e Seis Sigma.....	33
Figura 22: Fluxograma simplificado do processo de filtragem.....	35
Figura 23: Gráfico de Pareto dos eventos de parada	36
Figura 24: Manutenção de Troca Total dos tecidos	37
Figura 25: Avarias comuns nos Tecidos.....	38
Figura 26: Manutenção de Troca individual de Tecido.....	38
Figura 27: Mapeamento do Processo das manutenções de trocas de tecidos	40
Figura 28: Boxplot do indicador de horas operadas	41
Figura 29: Diagrama de Ishikawa.....	42
Figura 30: Matriz de esforço e impacto	43
Figura 31: Atividades realizadas com filtros parados	44
Figura 32: Layout da planta de filtragem	44

Figura 33: Histograma de tempo de operação em horas dos tecidos.....	46
Figura 34: Gráfico de Taxa de Falha dos tecidos por horas operadas	47
Figura 35: Curva da banheira, indicação do tipo de manutenção.....	48
Figura 36: Armazém para setores vestidos.....	49
Figura 37: Novo Layout da planta de filtração	50
Figura 38: Antes e depois da diminuição do tempo de setup	52
Figura 39: Tempos de Trocas Totais Antes e Depois.....	53
Figura 40: Método de Previsão para Manutenção de troca total	54
Figura 41: Boxplot do indicador após a implementação das soluções	55
Figura 42: Boxplot de comparação do antes e depois das soluções	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Elementos mais utilizados na notação BPMN.....	27
--	----

LISTA DE SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BPMN	Business Process Model and Notation
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve Control
ISO	Organização Internacional de Normalização
RCM	Reliability Centered Maintenance
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Formulação do Problema.....	11
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Filtragem do minério de ferro.....	17
2.2	Planejamento e Controle da Manutenção.....	20
2.2.1	Tipos de Manutenção.....	20
2.3	Lean Seis Sigma.....	23
2.3.1	Ferramentas do Lean Seis Sigma.....	25
3	METODOLOGIA.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	AMBIENTE DE ESTUDO.....	34
4.2	DEFINE.....	36
4.2.1	Identificação do problema.....	36
4.2.2	Detalhamento das atividades envolvendo as trocas de tecidos.....	37
4.3	MEASURE.....	41
4.3.1	Indicador selecionado.....	41
4.3.2	Indicador atual do processo.....	41
4.4	ANALYSE.....	42
4.4.1	Identificação das causas raízes.....	42
4.4.2	Análises das causas raízes.....	43
4.5	IMPROVE.....	49
4.5.1	Soluções levantadas e implementadas.....	49
4.6	CONTROL.....	55
4.6.1	Resultados obtidos.....	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade introduzir e contextualizar o problema que será abordado pelo estudo e apresentar a relevância da pesquisa e seus respectivos objetivos.

1.1 Formulação do Problema

A capacidade de um sistema produtivo industrial está totalmente ligada à disponibilidade dos equipamentos que o compõem, pois são eles os responsáveis por realizar o processamento dos insumos e gerar o produto final.

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

As empresas geralmente são estudadas como um sistema que transforma, via um processamento, entradas (insumos) em saídas (produtos) úteis aos clientes. Este sistema é chamado de sistema produtivo (Tubino 2017, p. 2).

Na maioria das indústrias, quando os equipamentos apresentam baixa disponibilidade, não é possível atender à demanda do sistema produtivo, gerando altos custos de inatividade de processo, desperdício de matéria-prima e criação de resíduos. Vale ressaltar que, segundo a pesquisa “The True Cost of Downtime 2022”, da Senseye, as empresas envolvidas na Fortune Global 500 tiveram uma perda de 11% do volume anual de negócios, correspondendo a aproximadamente R\$ 1,5 trilhão do faturamento anual, devido à indisponibilidade dos equipamentos em 2021-2022.

A perda de matéria-prima, produtividade e geração de resíduos provenientes da indisponibilidade de equipamentos pode ser evidenciada no setor de mineração selecionado para este estudo. No processo de filtragem de polpa de minério de ferro, a demanda não atendida pelos filtros rotativos é perdida e direcionada para o processo de tratamento. O desperdício da polpa caracteriza-se pela perda de matéria-prima, diminuição da produção de minério de ferro e geração de rejeitos minerais, gerando altos custos decorrentes da inatividade do processo.

De acordo com a nova pesquisa “*Value of Reliability 2023*”, da Asea Brown Boveri, o alto custo da inatividade está cada vez mais limitando as empresas do ramo industrial em um cenário já incerto. Isso engloba tanto os custos diretos, como desperdícios na produção ou peças sobressalentes, quanto os custos indiretos, como reputação e moral. Sendo que as paradas na produção custam em média a quantia expressiva de \$125.000 USD por hora para os negócios industriais mais comuns.

Desse modo, fica evidenciado a importância da disponibilidade dos equipamentos para a eficiência de todos sistemas produtivos, sobretudo nos setores de mineração. A *Caterpillar Global Mining* (2008) destaca que o principal produto para a manutenção de qualquer empresa mineradora são as horas disponíveis que o setor de operações pode utilizar para alcançar suas metas de produção, isto é, o desempenho neste setor é mensurado em termos de disponibilidade.

Portanto, para alcançar maiores índices de disponibilidade dos equipamentos demandados pelas empresas e pelo setor de mineração, surge a oportunidade de realizar uma pesquisa para avaliar a aplicação da metodologia *Lean Seis Sigma*. Essa metodologia apresenta meios de identificar os desperdícios e ineficiências nos processos de gestão da manutenção, juntamente com as ferramentas de planejamento e controle da manutenção, que contribuem para melhorar a eficiência e a produtividade das atividades realizadas na manutenção de equipamentos.

A pesquisa terá como objeto de estudo o sistema produtivo de minério de ferro. O sistema apresenta como insumo de entrada a polpa de minério, que passa pelo processo de filtragem e resulta na produção do minério de ferro *pellet feed*. Durante o processamento da polpa é utilizado os filtros rotativos, onde a disponibilidade desses equipamentos que determinarão a produtividade e eficiência do sistema produtivo.

Diante desse contexto, tem-se a seguinte questão problema:

Como aumentar a disponibilidade dos filtros rotativos no setor de mineração, aplicando a metodologia *Lean Seis Sigma* integrada com ferramentas do Planejamento e Controle da Manutenção?

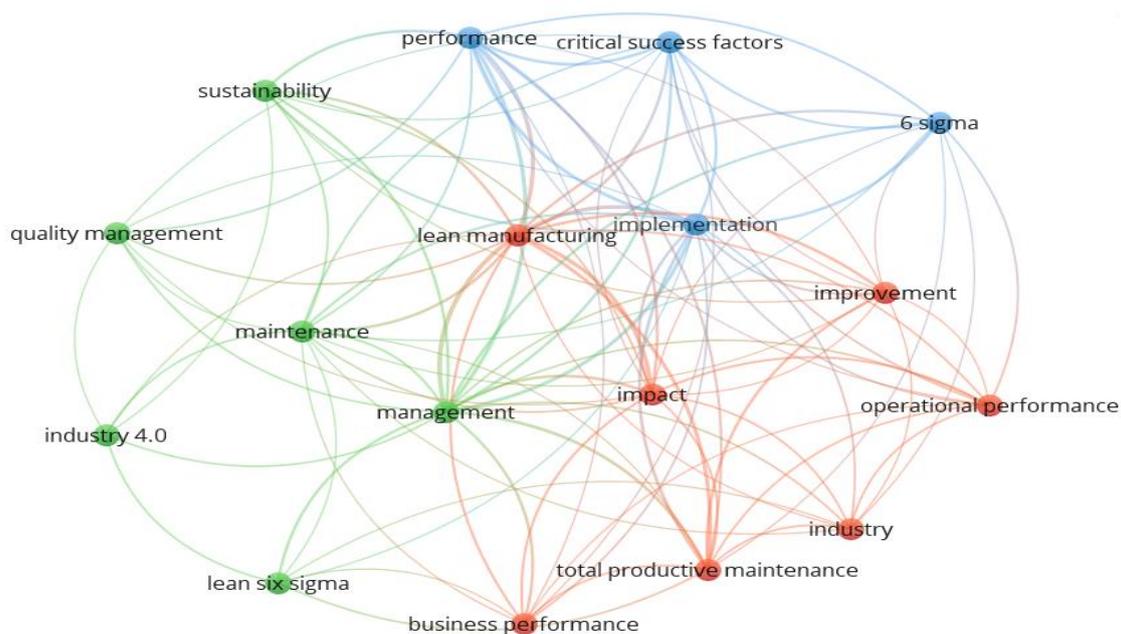
1.2 Justificativa

Para realização da justificativa do estudo, foi conduzida uma etapa de pesquisa bibliométrica com o objetivo de analisar se os temas centrais da pesquisa apresentam relevância no cenário científico e de que modo os assuntos estão sendo correlacionados. Com esse propósito, foi utilizado o repositório do *Web of Science*, cuja base de dados possui viés muito favorável para pesquisas no campo da Engenharia (Mongeon 2015, p. 13).

A pesquisa teve como busca no repositório artigos sem restrição de tempo, selecionados conforme as palavras chaves utilizadas nesse estudo, sendo elas: *Lean seis sigma*, gestão da manutenção, indústria de mineração, tempo de inatividade e planejamento e controle da manutenção. Como resultado da busca foram selecionados 236 artigos que continham os temas centrais procurados.

Com a utilização do programa computacional *VOSviewer*, foi criada uma visualização em rede da coocorrência de palavras-chave encontradas nos artigos selecionados. A rede tem o objetivo de identificar os assuntos que a comunidade acadêmica relaciona com os temas desta pesquisa, assim sendo possível verificar a relevância da problemática apresentada. A visualização da rede obtida no *VOSviewer* pode ser encontrada na Figura 1.

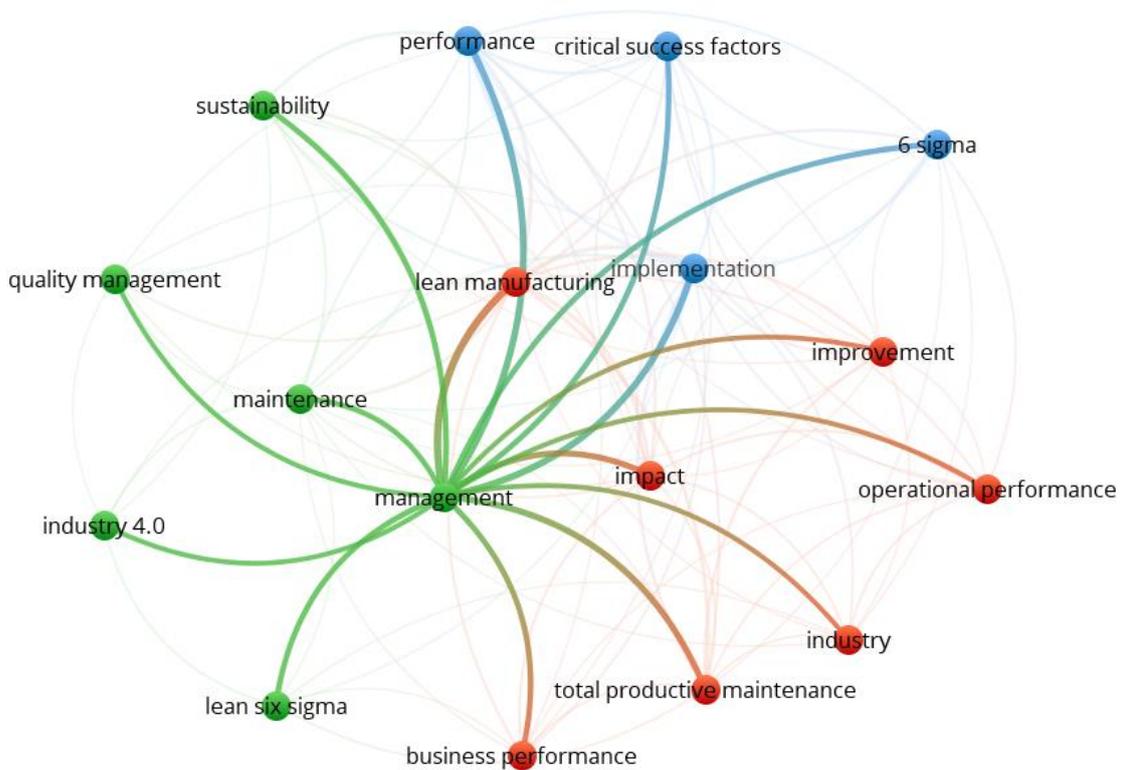
Figura 1: Análise de coorrência das palavras-chave



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Analisando a rede de coocorrência é possível encontrar as relações feitas pela comunidade científica entre a metodologia *Lean Seis Sigma*, gestão, manutenção e desempenho operacional, sendo esses os principais assuntos propostos para realização deste estudo e resolução da questão problema. Vale ressaltar que a palavra gestão apresentou forte conexão entre todas as palavras-chave de coocorrência dos artigos selecionados, indicando como a gestão é um tema central nas pesquisas que abordam os assuntos levantados. A conexão da palavra-chave gestão com as demais palavras-chave pode ser visualizada na Figura 2.

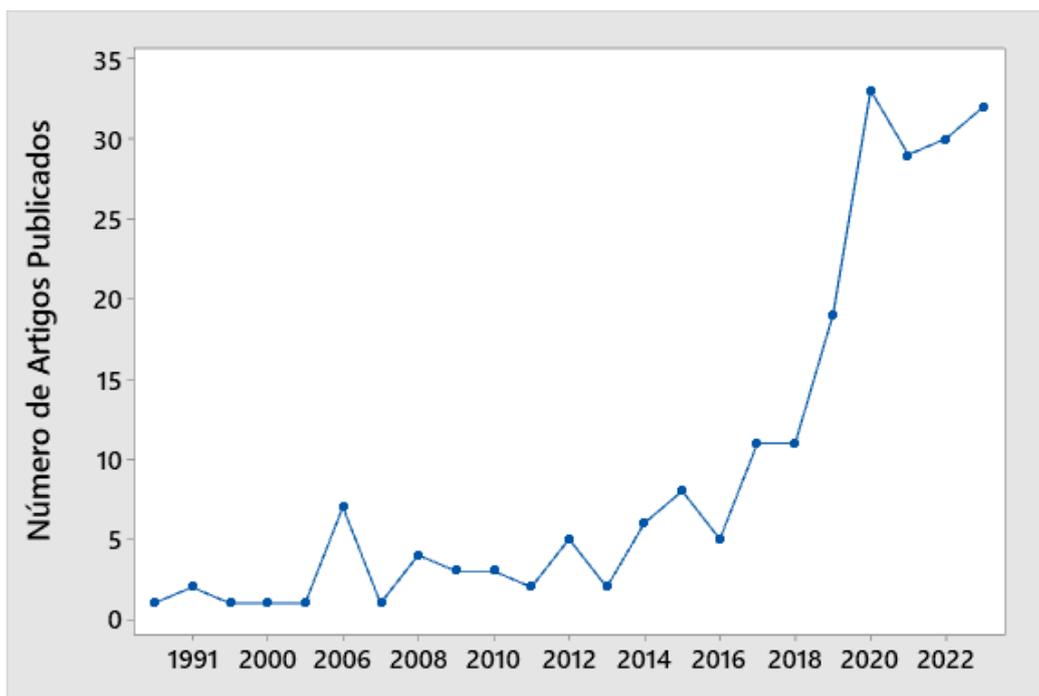
Figura 2: Conexões da Palavra-Chave Gestão



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Complementando a análise de relação das palavras-chaves, foi possível identificar um recente e crescente interesse da comunidade científica sobre os assuntos selecionados para essa pesquisa. Na Figura 3 é apresentado a quantidade dos artigos selecionados por ano de publicação, apresentando um aumento significativo das publicações a partir de 2017, reforçando a relevância dos conteúdos propostos.

Figura 3: Quantidade de artigos por ano de Publicação



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Portanto, a pesquisa aponta um possível interesse da comunidade científica, na base selecionada, sobre os temas propostos para este estudo e que serão utilizados para resolução da questão problema. Além disso, foi indicado uma forte relação entre a metodologia *Lean Seis Sigma* com a gestão da manutenção nas pesquisas feitas pela comunidade acadêmica, sendo aspectos centrais escolhidos para atingir o aumento da disponibilidade dos equipamentos nas indústrias e no setor de mineração.

Assim, a justificativa da pesquisa é construída pelos pontos supracitados, onde a metodologia *Lean Seis Sigma* integrada com as ferramentas do planejamento e controle da manutenção apresenta um potencial de trazer melhorias na gestão da manutenção das indústrias e por consequência aumentar a disponibilidade de seus equipamentos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O estudo tem o objetivo de apresentar como a metodologia *Lean Seis Sigma* integrada com as ferramentas do planejamento e controle da manutenção pode aumentar a disponibilidade de filtros rotativos no setor de mineração.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Utilizar a metodologia *Lean Seis Sigma* para identificar as causas de indisponibilidade dos filtros, criar indicador para mensurar resultados e conduzir aplicação das soluções.
- Aplicar ferramentas do planejamento e controle da manutenção para resolução dos problemas identificados e melhorar a eficiência das atividades de manutenção realizadas nos filtros rotativos.
- Avaliar e mensurar impactos da metodologia *Lean Seis Sigma* e ferramentas do PCM implementadas na disponibilidade dos filtros rotativos.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresentou a seguinte estrutura:

No **Capítulo 1** é apresentado a introdução, contextualizando o problema que será abordado pelo estudo e seus respectivos objetivos.

No **Capítulo 2** é apresentada a revisão bibliográfica, fornecendo o embasamento teórico para realização do estudo.

No **Capítulo 3** é apresentado a metodologia, proporcionando o método de condução e aplicação do estudo no ambiente selecionado.

No **Capítulo 4** é apresentado a aplicação do estudo no ambiente selecionado para o estudo, demonstrando as ferramentas e métodos utilizados.

No **Capítulo 5** é apresentado as considerações finais, evidenciando a resolução da questão problema e os resultados obtidos

Por fim são apresentadas as referências usadas de base teórica para este estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

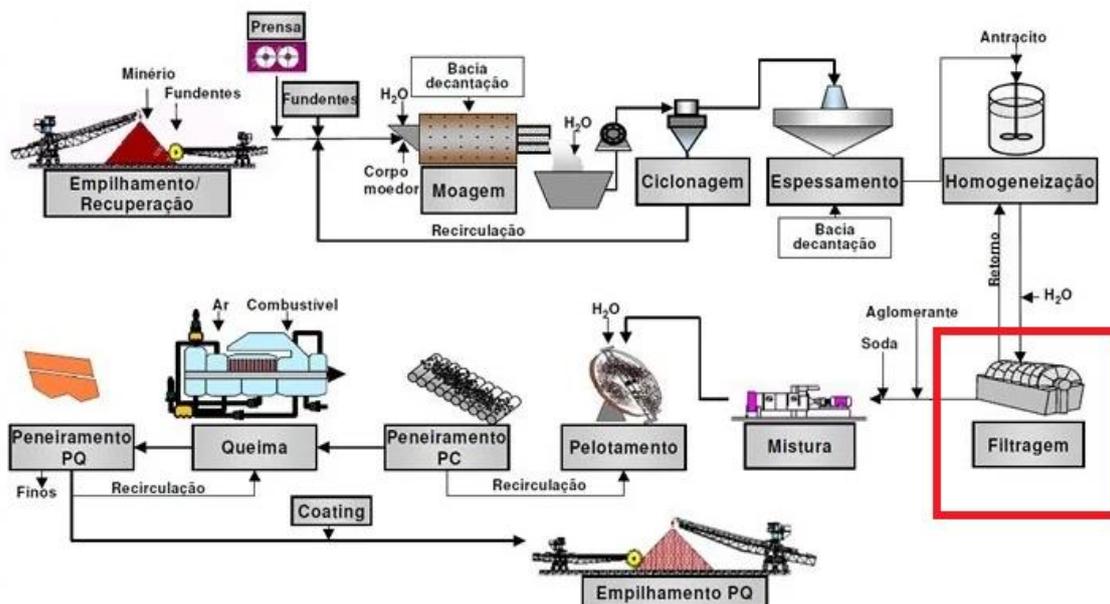
Com o propósito de fornecer sustentação teórica para o tema proposto por essa pesquisa, este capítulo abordará os embasamentos e conceitos utilizados.

2.1 Filtragem do minério de ferro

Uma das operações para o processo de pelletização é a filtragem, com o objetivo de realizar a separação do líquido e sólido da polpa de minério oriunda do processo de moagem. A Figura 4 demonstra um processo típico de pelletização e destaca em qual momento a filtragem é realizada. As pelotas de minério de ferro são feitas a partir do minério de ferro *pellet feed* e utilizada para produção do aço no setor siderúrgico.

Segundo (Chaves 2013, p. 65), a filtragem é um processo de separação dos sólidos presentes em uma suspensão líquida, onde o líquido passa por um meio poroso que retém as partículas sólidas.

Figura 4: Filtragem no Processo de Pelotização do minério de ferro



Fonte: Adaptado de Turrer (2015)

Conforme (Meyer 1980, p. 29) A filtragem do minério de ferro utilizando filtros de disco é amplamente utilizada e recomendada no processo de pelletização. Esses filtros rotativos, graças à sua estrutura em forma de árvore, permitem grandes áreas de filtração em um espaço compacto, capturando o material nos tecidos filtrantes em ambos os lados

dos discos. De acordo com Leite (2011, p.37) os filtros de disco a vácuo são os mais empregados na indústria de bens minerais no Brasil, devido ao seu baixo custo de instalação e manutenção.

2.2.1 Filtros de Disco Rotativos a Vácuo

Os filtros rotativos são basicamente compostos por discos e cada disco é constituído por um conjunto de setores. Os setores são vestidos com tecidos filtrantes conforme a Figura 5, com a função de agregar as partículas de minério da polpa em suas paredes externas.

Figura 5: Setores e Tecidos dos Filtros Rotativos



Fonte: Apresentado pela empresa Alfa Engenharia (2017)

Durante a operação dos filtros, através da rotação dos discos, os setores são mergulhados na polpa de minério de ferro presente na bacia. Com os setores submersos, os tubos do eixo principal fornecem passagem para uma força de sucção criada por bombas de vácuo. A força de sucção tem a função de fazer a polpa passar entre os tecidos filtrantes, assim as partículas de minério ficam retidas na parte externa do tecido, conforme demonstrado na Figura 6, assim produzindo o *pellet feed* de minério de ferro.

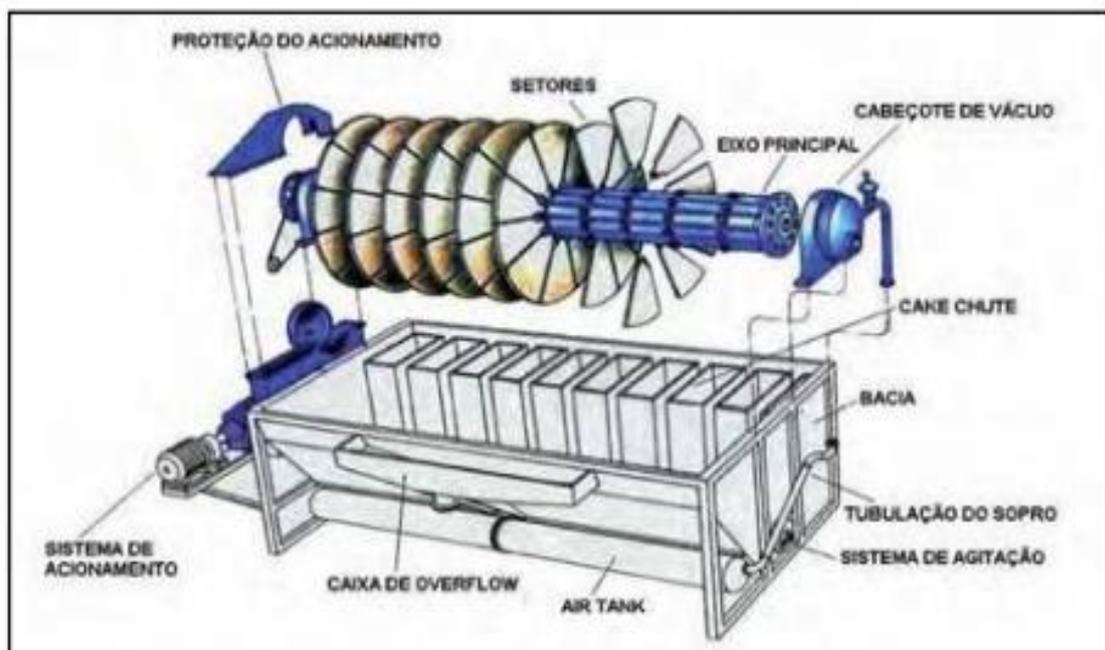
Figura 6: Formação do pellet feed nos tecidos filtrantes



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Posteriormente a formação do *pellet*, os tubos do eixo principal liberam uma força de ar comprimido, com a função de desprender as partículas do minério dos tecidos e direcioná-las para correias transportadoras. Na Figura 7 é possível visualizar os principais componentes dos filtros supracitados.

Figura 7: Vista explodida dos componentes dos filtros



Fonte: Apresentado pela empresa Alfa Engenharia (2017)

2.2 Planejamento e Controle da Manutenção

Segundo Gregório, Santos e Prata (2018, p. 14), a manutenção pode ser definida como um conjunto de práticas e procedimentos administrativos voltados a preservar ou restaurar a condição de um ativo, garantindo que ele continue a desempenhar sua função necessária ao longo do tempo. Para que a função da manutenção seja realizada de forma eficiente, é necessário realizar um planejamento adequado.

Assim surge a necessidade do emprego do planejamento e controle da manutenção para programar intervenções de forma otimizada e minimizar o tempo de inatividade dos equipamentos. Além disso, ao planejar a manutenção, é possível evitar falhas inesperadas, reduzir custos com reparos emergenciais e garantir que os recursos sejam alocados de maneira eficaz.

Para (Damas 2018, p.1) o planejamento e controle da manutenção ou PCM é setor responsável por planejar, organizar e programar as atividades que serão realizadas nas paradas de manutenção dos ativos, sejam eles móveis ou não.

2.2.1 Tipos de Manutenção

Para Almeida (2016, p.43) há 3 tipos principais de manutenção, são eles: corretiva, preventiva, e manutenção centrada na confiabilidade (em inglês Reability Centered Maintenance, sigla RCM). Na Figura 8 são demonstrados os tipos de manutenção e suas relações.

Figura 8: Tipos de Manutenção

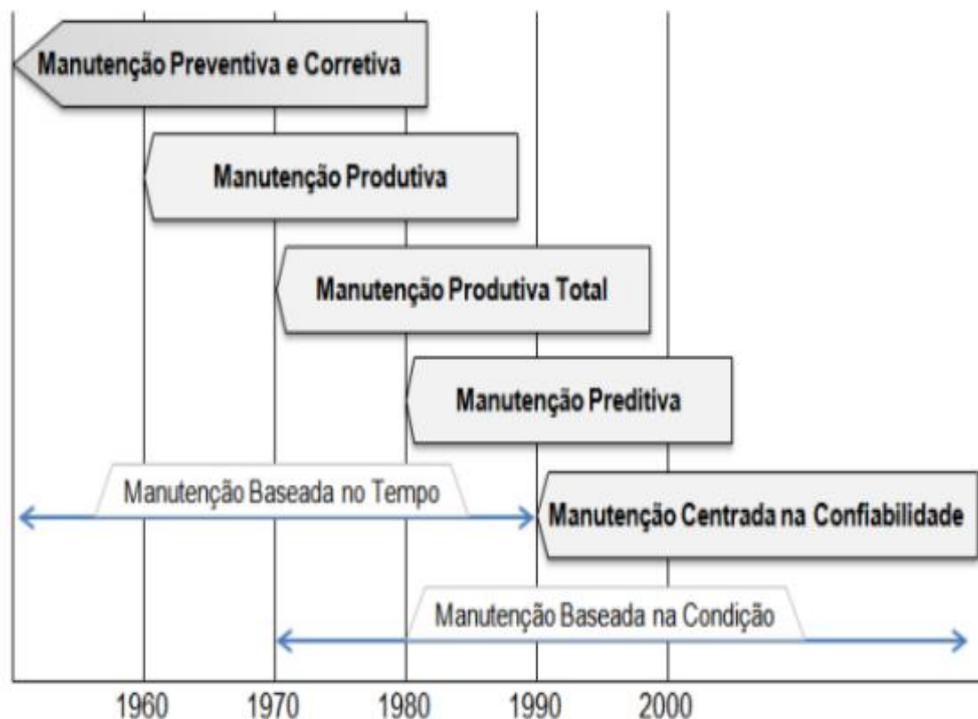


Fonte: Almeida (2017)

Os tipos de manutenção apresentados podem ser classificados por manutenções baseadas no tempo ou baseadas em condição, sendo duas estratégias distintas. As manutenções baseadas no tempo utilizam um cronograma ou planejamento fixo de prazos pré-determinados, já as manutenções baseadas em condição utilizam o monitoramento contínuo e análises de falhas para programar as manutenções conforme a necessidade do equipamento ou componente.

As manutenções baseadas na condição são uma evolução das manutenções baseadas em tempo, sendo possível visualizar na Figura 9 os tipos de manutenções e os seus históricos de evolução.

Figura 9: Histórico de Evolução da Manutenção



Fonte: Lafraia (2001)

2.2.1.1 Manutenção Corretiva

Segundo Almeida (2016, p. 19) na manutenção corretiva, a equipe intervém logo após a ocorrência de uma falha ou em um momento mais conveniente, mas sempre com o acompanhamento contínuo do defeito para evitar que ele se agrave e cause uma falha de grande impacto. Esse tipo de manutenção envolve não apenas a correção imediata do

problema, mas também o monitoramento constante dos sinais de desgaste ou mau funcionamento. Isso permite identificar o melhor momento para agir, reduzindo o risco de danos maiores e garantindo que os impactos sobre a operação sejam minimizados.

De acordo com a NBR 5462 (1994, p. 7) manutenção corretiva é definida como “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.

2.2.1.2 Manutenção Preventiva

A NBR 5462 (1994, p. 7) conceitua manutenção preventiva como aquela “efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item”, enquanto Viana (2002, p.24) Define a manutenção preventiva como qualquer serviço realizado em máquinas que estão funcionando corretamente, sem apresentar falhas, e em condição de pleno funcionamento.

2.2.1.3 Manutenção Preditiva

Gregório, Santos e Prata (2018, p. 14) caracteriza a manutenção preditiva, também conhecida como manutenção baseada na condição, no monitoramento de parâmetros específicos de um ativo com o objetivo de detectar anomalias antes que uma falha aconteça. Complementar a essa definição Marques e Brito (2019, p. 89) diz que a manutenção preditiva desempenha um papel crucial na prevenção de falhas significativas e na extensão da vida útil dos ativos. Por meio dessa abordagem, é possível identificar, desde o início, defeitos que podem se agravar e resultar na interrupção do funcionamento do ativo.

2.2.1.4 Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)

Para Menezes, Santos e Chaves (2015, p. 9) a manutenção centrada em confiabilidade visa determinar a probabilidade de um ativo cumprir sua função, ou seja, se um equipamento instalado em uma planta produtiva não falhará em um período de tempo específico, desde que opere dentro de certas condições de trabalho.

Na manutenção centrada na confiabilidade existem algumas funções matemáticas que podem ser usadas para realizar análises quantitativas, sendo uma das principais a função da taxa de falha dos equipamentos ou componentes. Segundo Lafraia (2001, p.32)

a análise pela taxa de falha $h(t)$ é desenvolvida pela chamada curva da banheira, que representa as três fases de vida do equipamento. Cada fase está associada a um tipo de comportamento da $h(t)$, segundo o fator de forma da distribuição de Weibull associada.

A curva da banheira pode ser encontrada na Figura 10, analisando em qual fase a taxa de falha se encontra é recomendado um tipo de manutenção. Sellito (2005, p. 98) recomenda que na fase T1 caracterizada pelos erros de fabricação e instalação, deverá ser adotada a manutenção corretiva; na fase T2 caracterizada pelos erros de operação, deverá ser adotada a manutenção preditiva e na fase T3, caracterizada pelas falhas de desgaste e final de vida útil, deverá ser adota a manutenção preventiva.

Figura 10: Curva da Banheira



Fonte: REIS, ANDRADE (2009)

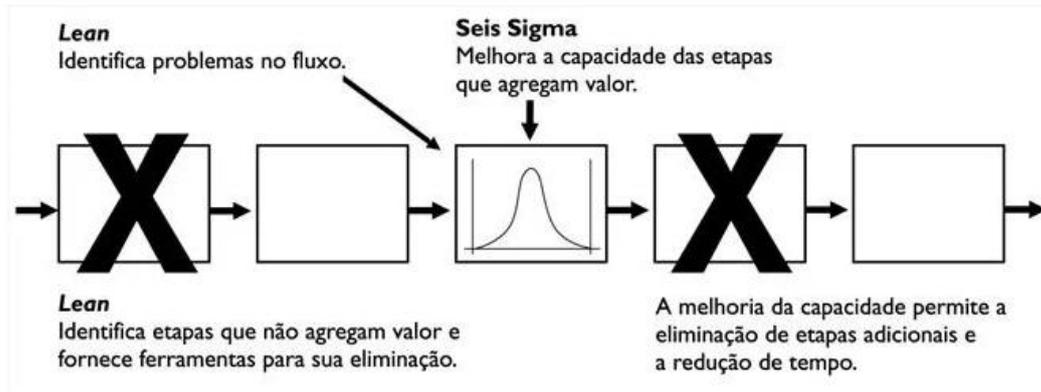
2.3 Lean Seis Sigma

O Lean Seis Sigma é uma metodologia que une duas abordagens para a melhoria contínua de processos, sendo elas o Lean manufacturing e o Seis Sigma. De acordo com Werkema (2012 p.2) a combinação do Lean com o Seis Sigma configura uma estratégia

altamente eficaz. O Lean se fundamenta em uma abordagem de produção que busca eliminar desperdícios, impulsionando a produtividade. O Seis Sigma foca na melhoria de produtos, serviços e processos, através da redução da variabilidade e na geração de valor.

Na Figura 11 é representado como essas duas metodologias atuam juntas para melhoria de um processo.

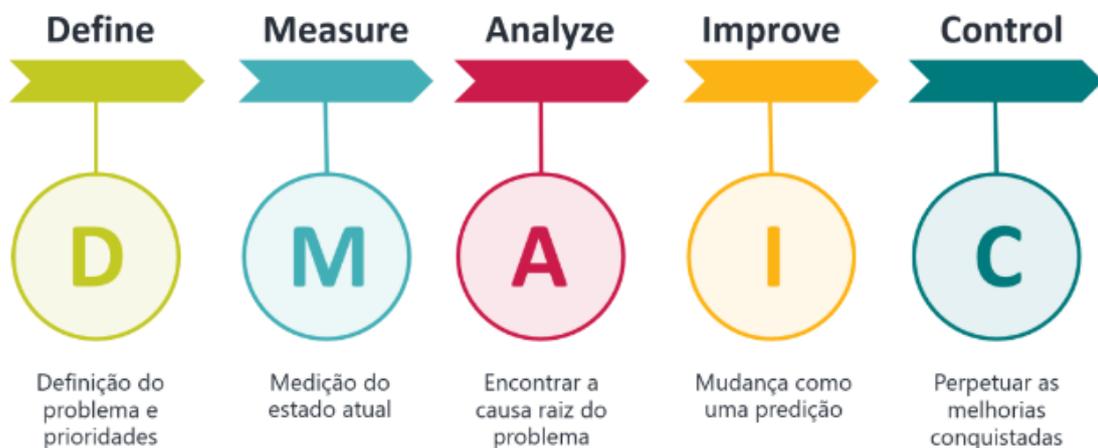
Figura 11: Lean Seis Sigma atuando na melhoria do processo



Fonte: Werkema (2012)

O Seis Sigma utiliza o DMAIC para resolução de problemas, as letras representam os cinco passos: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar. Os objetivos de cada etapa podem ser encontrados na Figura 12.

Figura 12: Etapas e objetivos do DMAIC



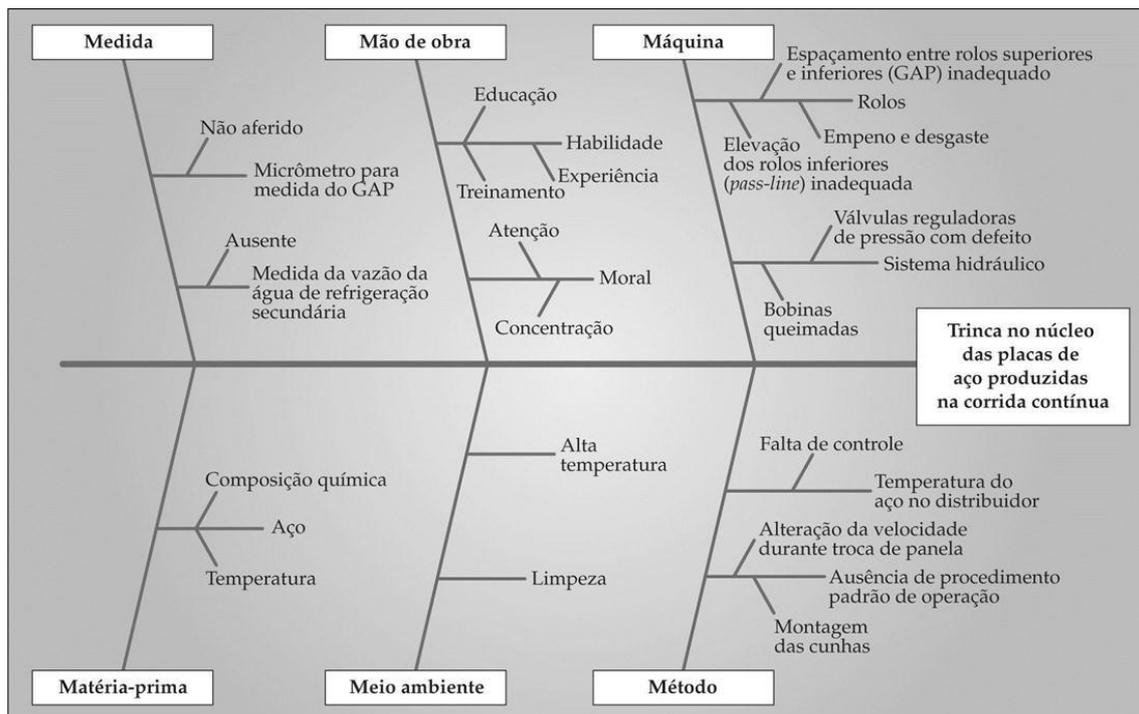
Fonte: Matsumota (2020)

2.3.1 Ferramentas do Lean Seis Sigma

2.3.1.1 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa, segundo Werkema (2014, p. 88) é definido como uma ferramenta usada para demonstrar a conexão entre o resultado de um processo (efeito) e os fatores (causas) do processo que, por motivos técnicos, podem influenciar o resultado em questão. A Figura 13 demonstra um exemplo da aplicação do diagrama.

Figura 13: Exemplo de aplicação do diagrama de Ishikawa

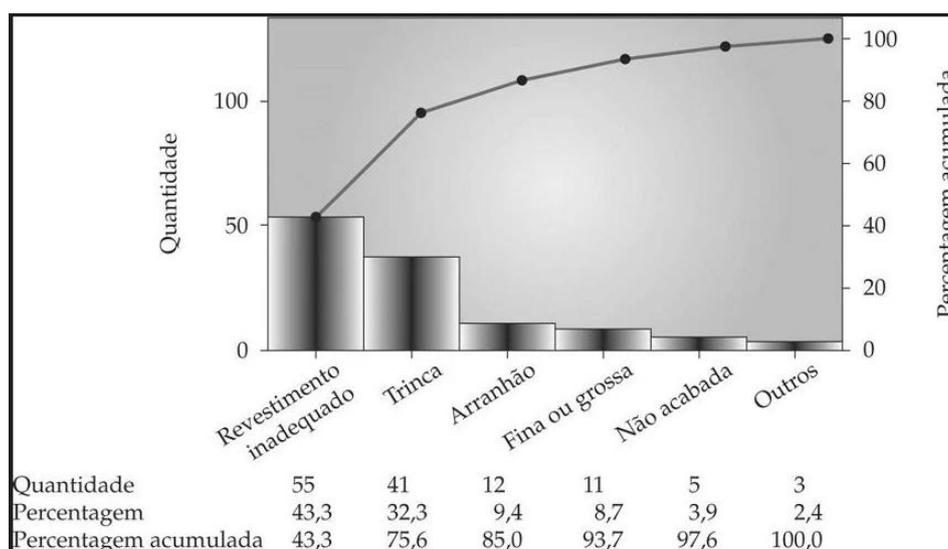


Fonte: Werkema (2014)

2.3.1.2 Gráfico de Pareto

O gráfico de Pareto muitas vezes utilizado para representar que vinte por cento das causas geram oitenta por cento dos problemas, segundo Werkema (2014, p. 70) trata-se de um gráfico de barras verticais que organiza as informações de maneira a evidenciar visualmente a priorização dos temas. Segundo o autor, esse gráfico também pode ser utilizado para detectar problemas e falhas. Na Figura 14 é encontrado um exemplo de gráfico de Pareto.

Figura 14: Exemplo de um Gráfico de Pareto



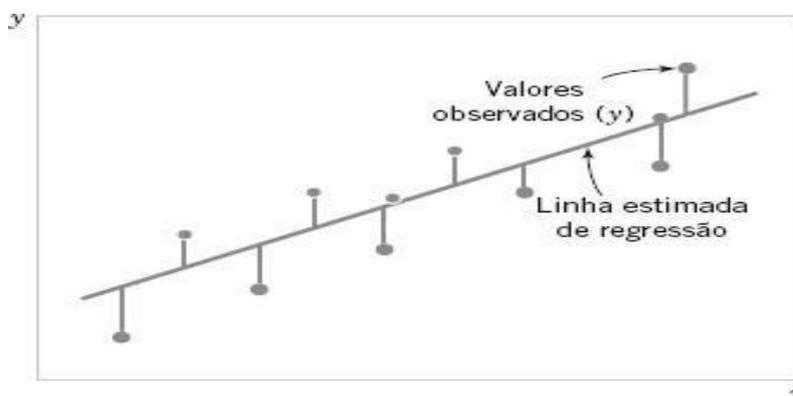
Fonte: Werkema (2014)

2.3.1.3 Análise de regressão linear

As análises de regressão linear são utilizadas para criação de uma equação de reta que relaciona duas variáveis, moldando o comportamento das variáveis pela equação, sendo possível estudar os impactos que uma variável pode causar na outra, ou fazer previsões de seus comportamentos.

Para Montgomery (2021, p.211) o modelo de regressão linear simples envolve apenas um regressor ou preditor X e uma variável dependente, ou variável de resposta Y. Considere-se que a relação real entre Y e X segue uma linha reta, e que o valor distribuído de Y para cada valor de X é variável. A representação de um modelo de regressão linear pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15: Representação da regressão linear



Fonte: Montgomery (2021)

2.3.1.4 Mapeamento de processos

O mapeamento de processos segundo Barbrow e Hartline (2015, p. 1) é uma forma destacar as principais etapas e os fluxos de trabalho em um formato visual, facilitando a tomada de decisões pelos gestores. De acordo com os autores, o mapeamento permite identificar os fluxos de materiais, documentos e informações.

O mapeamento de processos é internacionalmente baseado na BPMN ou *Business Process Model and Notati*, para padronizar os elementos visuais dos mapas. Segundo o BPMN (2011, p.8) é uma notação metodológica visual, baseada na utilização de elementos gráficos, para representar de forma sequenciada as etapas do processo produtivo. Os elementos mais comuns em um mapeamento podem ser encontrados na Tabela 1.

Quadro 1: Elementos mais utilizados na notação BPMN

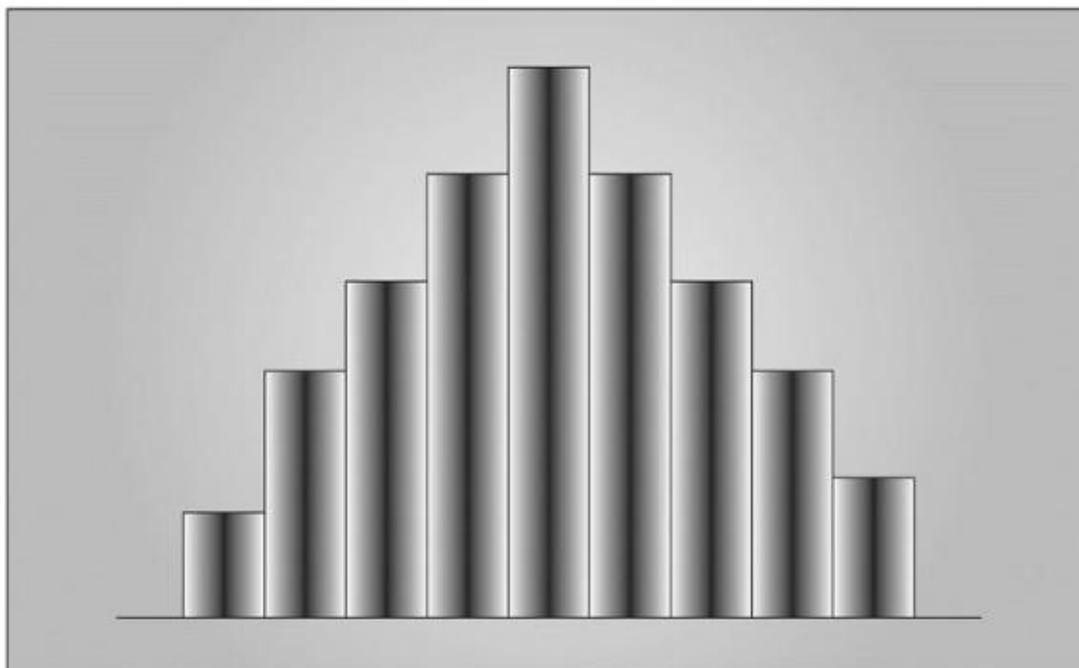
Elemento	Notação
Evento	
Atividade	
Entrada	
Sequência do fluxo	
Fluxo de Mensagens	

Fonte: BPMN (2011)

2.3.1.5 Histograma

Conforme Baldan (2014, p.39) o histograma é uma ilustração gráfica que apresenta a distribuição dos dados em diferentes intervalos, agrupados em faixas de ocorrências e organizados em formato de tabela, com os intervalos dispostos de maneira paralela. Um exemplo de histograma pode ser encontrado na Figura 16.

Figura 16: Exemplo de um histograma



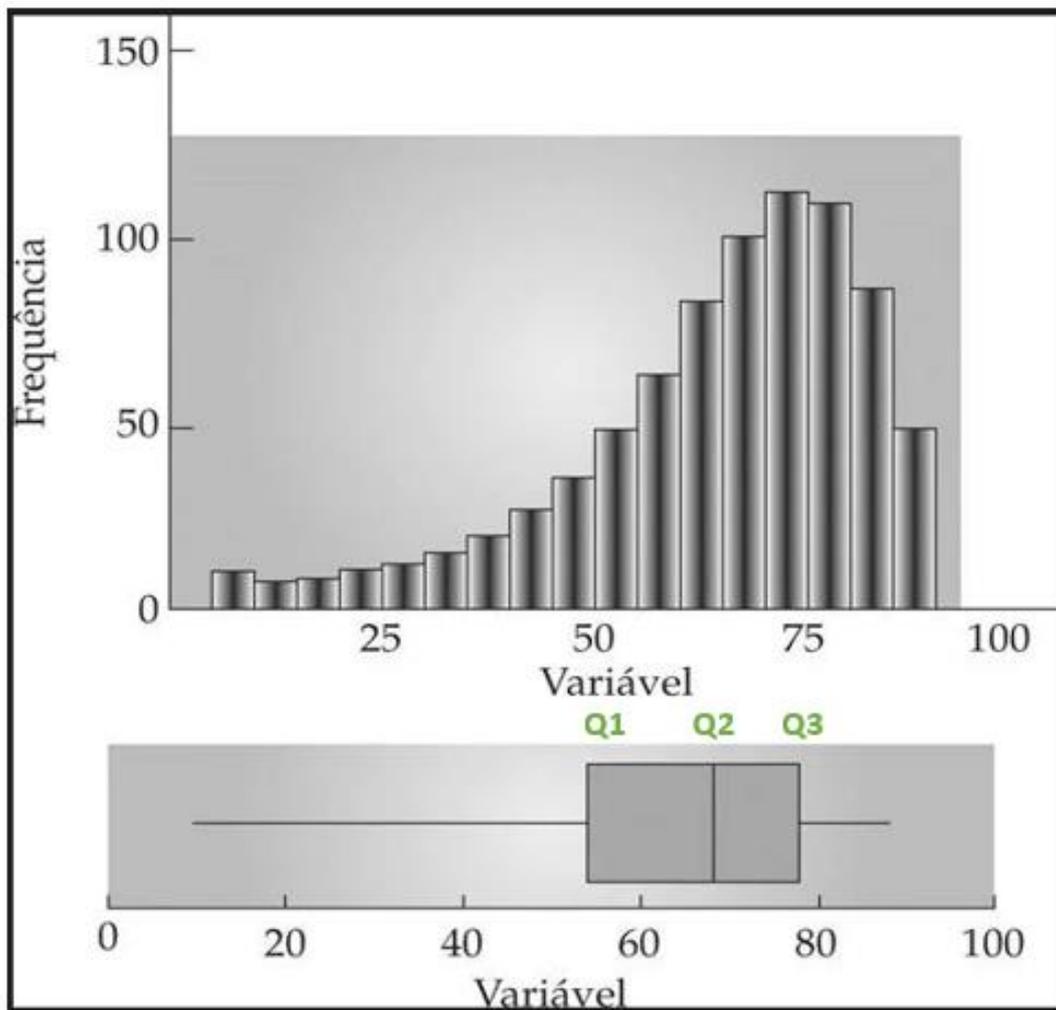
Fonte: Werkema (2014)

2.3.1.6 Boxplot

O boxplot segundo Werkema (2014, p.258) “é um gráfico que apresenta simultaneamente várias características de um conjunto de dados: locação, dispersão, simetria ou assimetria e presença de observações discrepantes (“outliers”)”.

Na Figura 17, é possível analisar a utilização de um histograma para explicar a construção de um boxplot, o retângulo representa a concentração da maioria dos dados. A marcação Q1 significa primeiro quartil, onde 25 por cento dos dados estão abaixo daquela marcação; a marcação Q2 é a mediana e a marcação Q3 é o terceiro quartil, onde 75 por cento dos dados estão abaixo daquela marcação.

Figura 17: Representação da regressão linear



Fonte: Adaptado Werkema (2014)

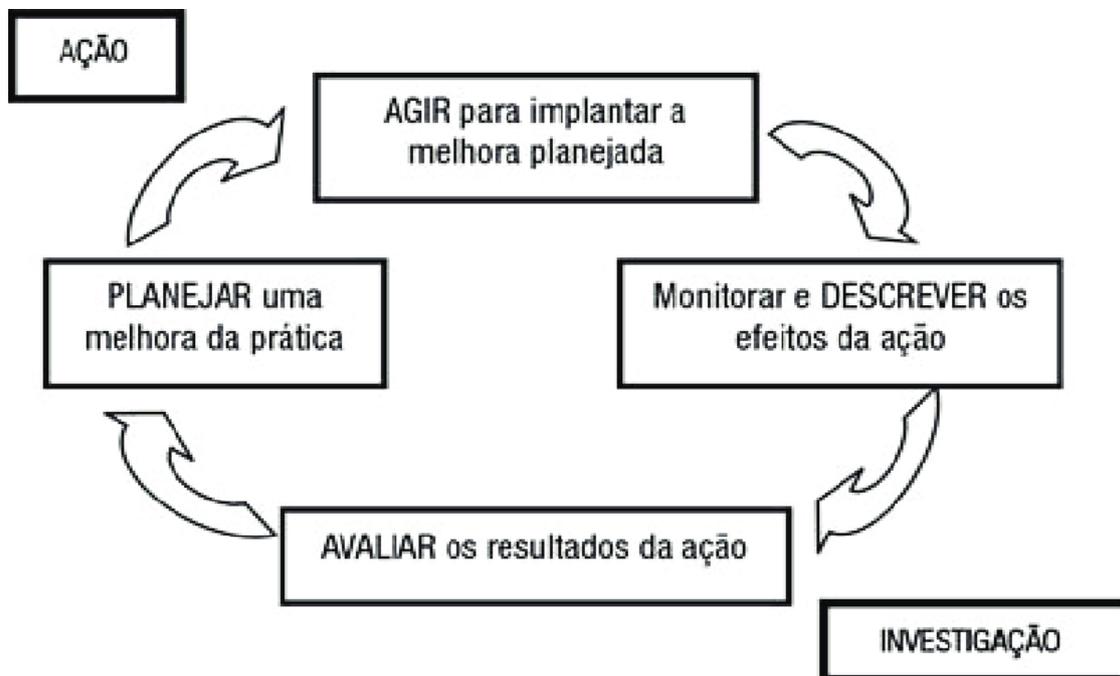
2.3.1.7 Matriz esforço e impacto

Para Coutinho (2019, p.2) a matriz de esforço e impacto é uma ferramenta que prioriza tarefas com base no esforço necessário e no impacto esperado. Ela usa dois eixos principais, vertical e horizontal, para avaliar o impacto e o esforço das ações, essa ferramenta é uma facilitadora na tomada de decisões para realização de ações.

3 METODOLOGIA

Como o objetivo do estudo é analisar e aplicar soluções intervindo diretamente no ambiente de estudo e avaliar os resultados, a pesquisa-ação se torna uma metodologia aplicável. Segundo Tripp (2005, p.321) a pesquisa-ação é um tipo de investigação que emprega métodos de pesquisa reconhecidos para orientar as ações decididas com o objetivo de aprimorar a prática. Ainda conforme o autor, a pesquisa-ação é realizada considerando as principais etapas representadas na Figura 18.

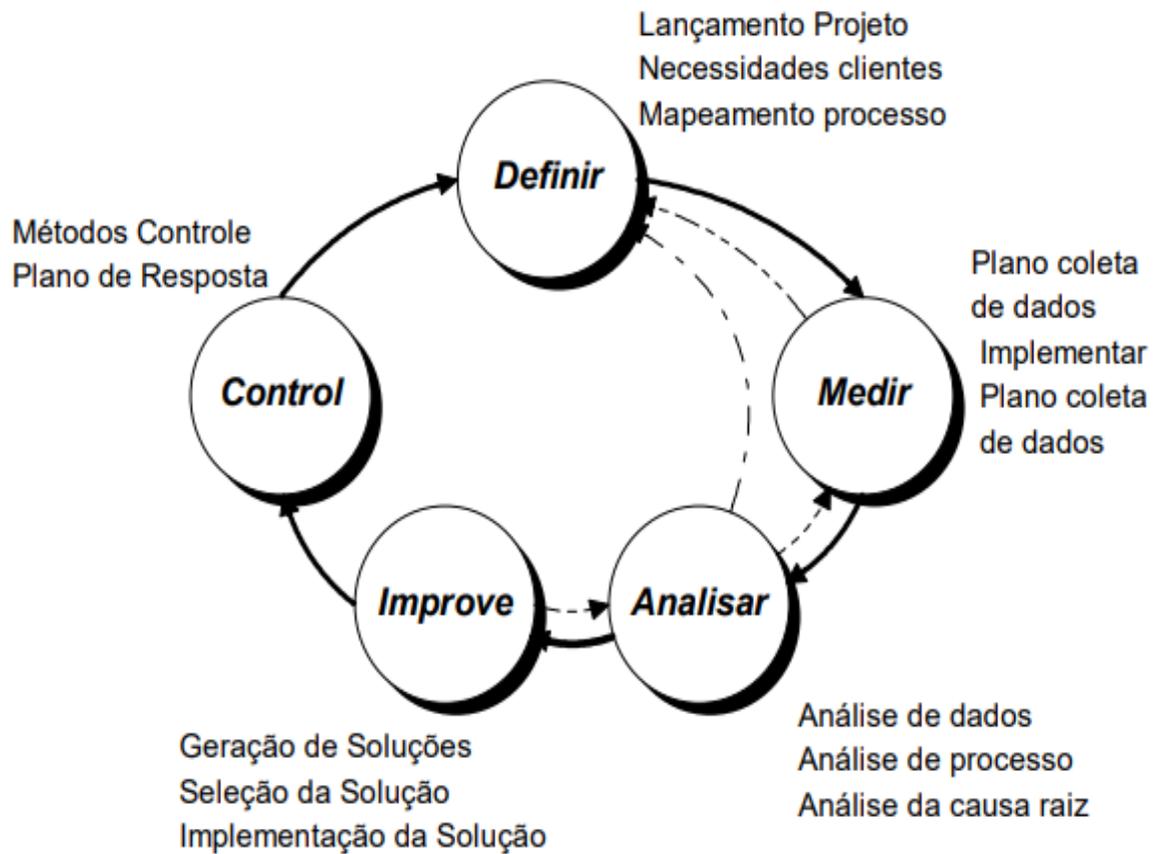
Figura 18: Ciclo Pesquisa-ação



Fonte: Tripp (2005)

De acordo com Tripp (2005, p.445) a Pesquisa-Ação é um “termo genérico para qualquer processo que siga um ciclo no qual se aprimora a prática pela oscilação sistemática entre agir no campo da prática e investigar a respeito dela”. Portanto, como a pesquisa utilizará como base o *Lean Seis Sigma* que utiliza o DMAIC como norteador das ações e implementação das soluções, foi possível integrar as etapas dessa ferramenta nos moldes da pesquisa-ação. Na Figura 19 é encontrado o ciclo com as etapas e atividades comumente realizadas no DMAIC.

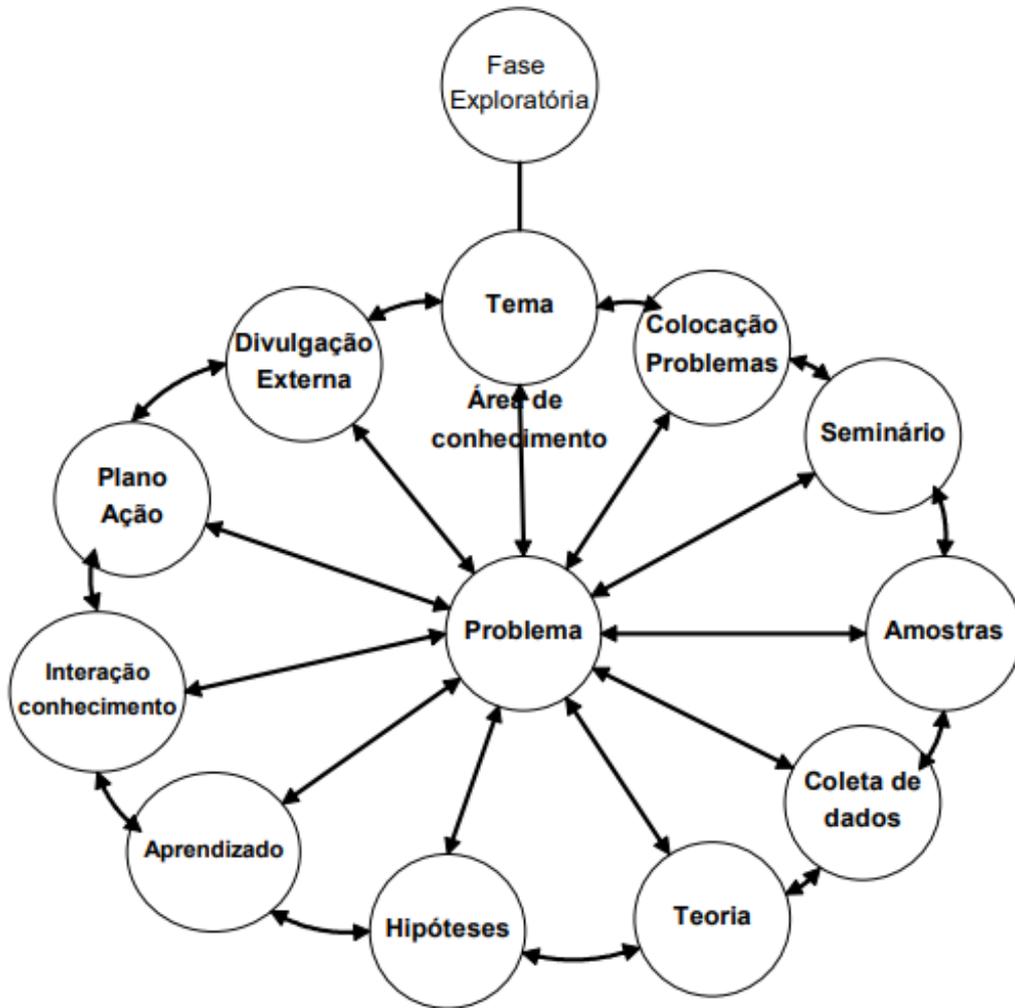
Figura 19: Ciclo DMAIC



Fonte: ECKER (2003)

Para Thiollent (2002, p. 19), a pesquisa-ação tem como proposta o estudo dinâmico de problemas, decisões, ações, negociações e conflitos que surgem entre os agentes envolvidos durante os processos de transformação de uma determinada situação. Esse método de pesquisa destaca-se pela sua característica interativa, na qual os participantes não são apenas objetos de estudo, mas atuam como sujeitos ativos no desenvolvimento das soluções para os problemas identificados. Além disso, Thiollent ressalta que a pesquisa-ação pode ser estruturada e conduzida de forma sistemática, seguindo uma série de etapas organizadas, conforme ilustrado na Figura 20. Essas etapas proporcionam uma abordagem em que teoria e prática se inter-relacionam continuamente, favorecendo a resolução dos problemas.

Figura 20: Organização da Pesquisa-ação



Fonte: Adaptado de HOLANDA; RICCIO (2000)

Assim, conforme os conceitos abordados pelos autores e as análises dos ciclos do DMAIC em relação às atividades realizadas na pesquisa-ação, é possível estabelecer uma correlação entre os ciclos e extrair as etapas e ferramentas que melhor se adaptam ao alcance do objetivo da pesquisa. Na Figura 21, é apresentada a correlação entre o DMAIC do *Lean Seis Sigma* e as etapas comumente usadas na pesquisa-ação, sendo que o presente estudo utilizará como norteador o ciclo e as etapas do DMAIC, aproveitando as fases da pesquisa-ação que melhor atendem às necessidades das análises e soluções no ambiente de estudo.

Figura 21: Comparativo entre pesquisa-ação e Seis Sigma

	Pesquisa-Ação	Seis Sigma
P	Fase Exploratória	Identificação do Problema
	Tema da Pesquisa	
	Colocação dos Problemas	
	Seminário	
	Campo de Observação	Análise do Fenômeno
	Coleta de Dados	
	Teoria	Análise de Processo
	Hipóteses	
	Aprendizado	
	Conhecimento	
D	Plano de Ação	Execução do Plano
C		Verificação Resultado
A	Divulgação Resultados Externa	Padronização
		Conclusão

Fonte: Adaptado de THIOLENT (2002); WERKEMA (2011)

Por fim, a pesquisa-ação foi escolhida porque permite intervir diretamente no ambiente de estudo e avaliar os resultados. Combinada com o *Lean Seis Sigma* e o ciclo DMAIC, ela oferece uma forma organizada de identificar problemas e implementar soluções práticas. Ao unir essas duas abordagens, o estudo consegue adaptar melhor as etapas de análise e ação, garantindo que as melhorias nos processos de manutenção sejam eficazes e atendam às necessidades específicas do ambiente de estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo tem a função de demonstrar a aplicação da metodologia *Lean Seis Sigma* integrada com as ferramentas do planejamento e controle da manutenção em uma planta de filtragem de polpa de minério, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos filtros rotativos.

O capítulo abordará as seguintes fases e seus seguintes objetivos:

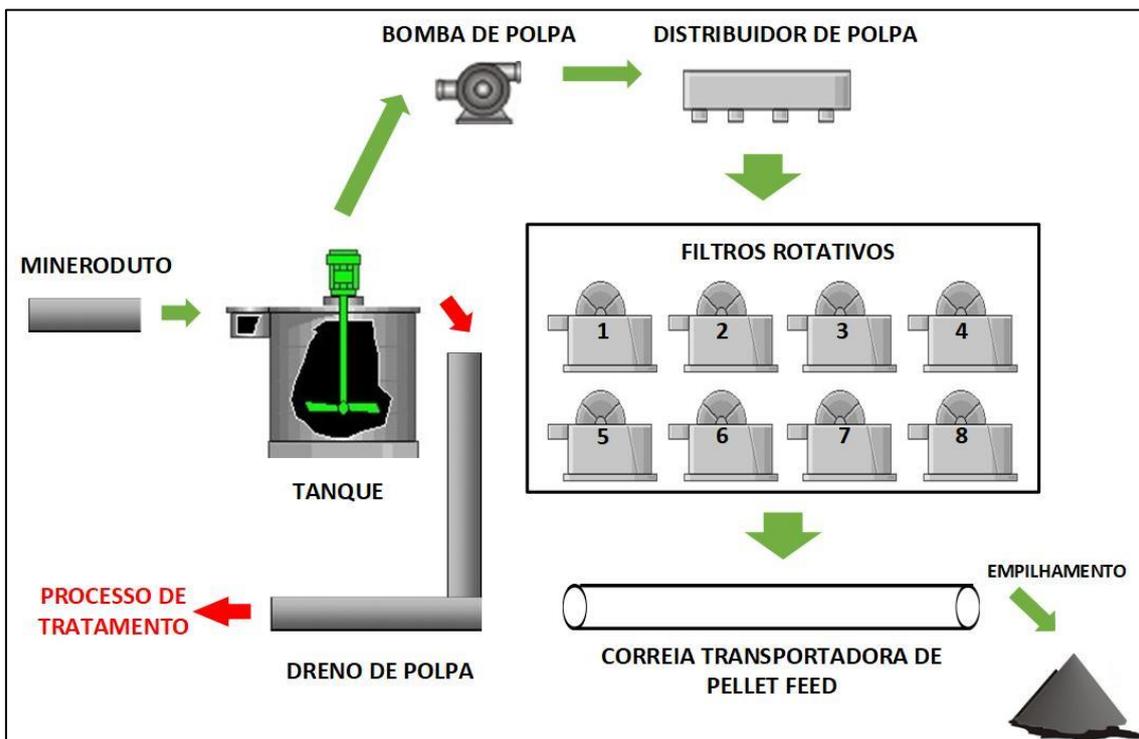
- Ambiente de Estudo: Descrever processo e equipamentos da empresa utilizados como objeto de estudo.
- Define: Identificar e detalhar a principal causa geradora da indisponibilidade dos filtros rotativos.
- Measure: Criar indicador para possibilitar medição de possíveis resultados.
- Analyse: Analisar e identificar as causas raízes do problema identificado na fase do *Define*.
- Improve: Gerar e implementar soluções para causas raízes identificadas no *Analyse*.
- Control: Medir os resultados utilizando o indicador criado na fase do *Measure*.

4.1 AMBIENTE DE ESTUDO

O processo escolhido para aplicação deste estudo é uma planta de filtragem de uma exportadora de minério do Brasil. A planta da empresa selecionada detém oito filtros rotativos que filtram a polpa para produção do minério de ferro *pellet feed*, sendo o minério mais fino comercializado pela empresa.

O processo produtivo funciona basicamente da seguinte forma, a polpa contendo predominantemente partículas de minério de ferro e água é transportada via mineroduto para um tanque. Posteriormente, uma bomba direciona a polpa para um distribuidor que abastece os filtros, que são responsáveis por realizar a separação da água e das partículas de minério. As partículas de minério separadas pelos filtros é o *pellet feed*, sendo destinado para uma correia transportadora que levará o minério até o pátio de empilhamento. O processo descrito pode ser visualizado no fluxograma da Figura 22, representado pelas setas verdes.

Figura 22: Fluxograma simplificado do processo de filtragem



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Um ponto muito comum dos processos produtivos é a dependência da disponibilidade dos equipamentos para atingir maiores índices de produtividade e menores índices de desperdício. O processo escolhido para este estudo não é diferente, sendo esse aspecto o principal motivador para utilizá-lo nesta pesquisa.

No fluxograma da Figura 22, demonstra o processo da perda de polpa através das setas vermelhas. Quando os filtros não estão disponíveis para operar e com a chegada de mais polpa de minério ao tanque, é necessário drenar a polpa para não gerar o transbordo. A polpa drenada é direcionada para um processo de tratamento, ocasionando uma redução na produção de *pellet feed* e desperdício de matéria prima.

Portanto, o processo descrito anteriormente encaixa-se bem nos requisitos para a aplicação desta pesquisa. Nas próximas etapas, será utilizada a metodologia DMAIC do Lean Seis Sigma, integrada com as ferramentas de planejamento e controle da manutenção, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos filtros rotativos.

4.2 DEFINE

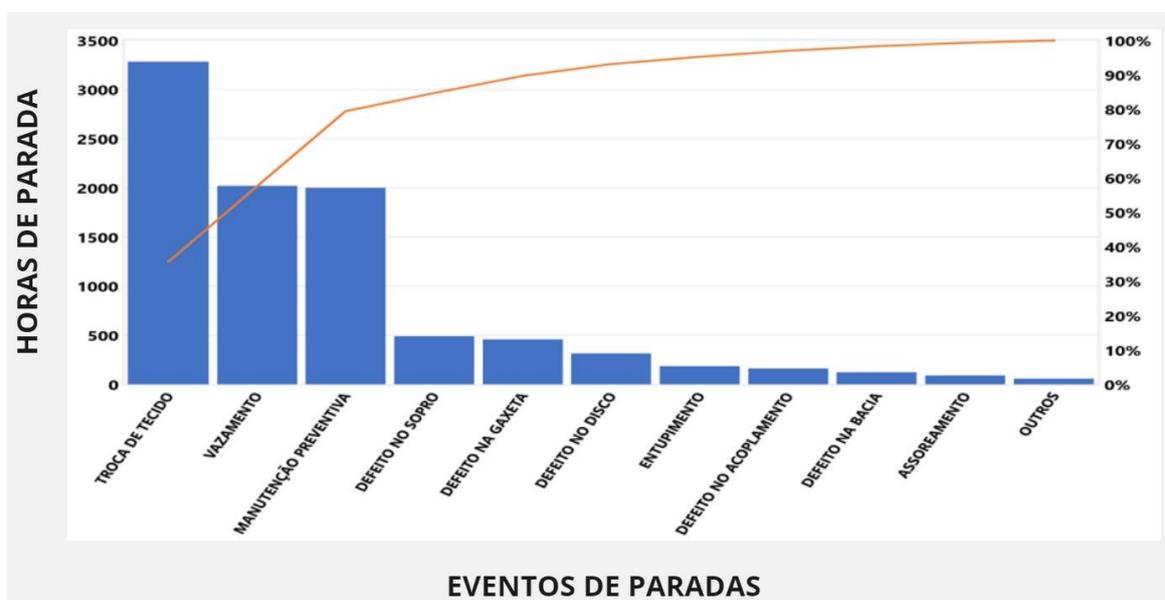
O principal objetivo buscado pela fase do *DEFINE* é identificar e compreender as atividades envolvidas no principal causador da indisponibilidade dos filtros.

4.2.1 Identificação do problema

Para identificação da causa geradora de maior impacto na disponibilidade dos filtros, foram utilizados os dados de apontamento de paradas da empresa. Na coleta desses dados foi pesquisado o total de tempo que os oito filtros ficaram indisponíveis no ano de 2023, separando por causas.

Com os dados coletados, foi utilizado uma ferramenta muito comum na metodologia *Lean Six Sigma* para identificação de causas prioritárias, o gráfico de Pareto. Na Figura 23, é possível visualizar o resultado apontado pelo gráfico, onde a principal causadora da indisponibilidade de operação dos filtros é as manutenções de trocas de tecidos.

Figura 23: Gráfico de Pareto dos eventos de parada



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Portanto, para uma melhor compreensão das atividades que envolvem as manutenções de trocas de tecidos, o próximo passo da fase *define* é detalhar como esse processo de manutenção está sendo realizado atualmente.

4.2.2 Detalhamento das atividades envolvendo as trocas de tecidos

Como demonstrado na revisão bibliográfica, os filtros rotativos utilizam tecidos para separação do minério da polpa. A condição dos tecidos é fundamental para produtividade e confiabilidade da operação, assim sempre que os tecidos apresentam alguma avaria como rasgos ou furos é necessário realizar a troca. Na operação da planta de filtragem selecionada é realizado dois tipos de manutenções para troca de tecidos dos oito filtros rotativos, as manutenções de trocas totais e as manutenções de trocas individuais.

As manutenções de trocas totais têm caráter preventivo, onde é realizado a substituição dos cem tecidos dos filtros quando atingem mil horas de operação. Na Figura 24 é apresentada a manutenção de troca total dos tecidos, demonstrando todos os tecidos novos acoplados ao filtro.

Figura 24: Manutenção de Troca Total dos tecidos



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

As manutenções de trocas individuais têm caráter corretivo, onde os tecidos que apresentam algum defeito antes das mil horas de operação são substituídos. Na Figura 25 é demonstrado o tipo mais comum de avaria antes das mil horas de operação dos tecidos, sendo ela um rasgo central que impossibilita sua utilização.

Figura 25: Avarias comuns nos Tecidos



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

As manutenções de trocas individuais são realizadas apenas nos tecidos que apresentam avarias, sendo os outros mantidos para dar continuidade na operação dos filtros. Na Figura 26 é apresentado um exemplo de troca individual, onde é possível visualizar alguns tecidos novos e alguns tecidos usados que não apresentaram avarias e continuaram em operação.

Figura 26: Manutenção de Troca individual de Tecido



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Desse modo, após identificar os tipos de manutenção que geram maior indisponibilidade dos filtros, é necessário entender quais atividades são realizadas pela equipe de manutenção para identificar pontos a serem melhorados e, assim, diminuir o tempo dessas manutenções. Para esse fim, a metodologia *Lean Seis Sigma* disponibiliza uma ferramenta útil para a determinação das atividades: o mapeamento de processos.

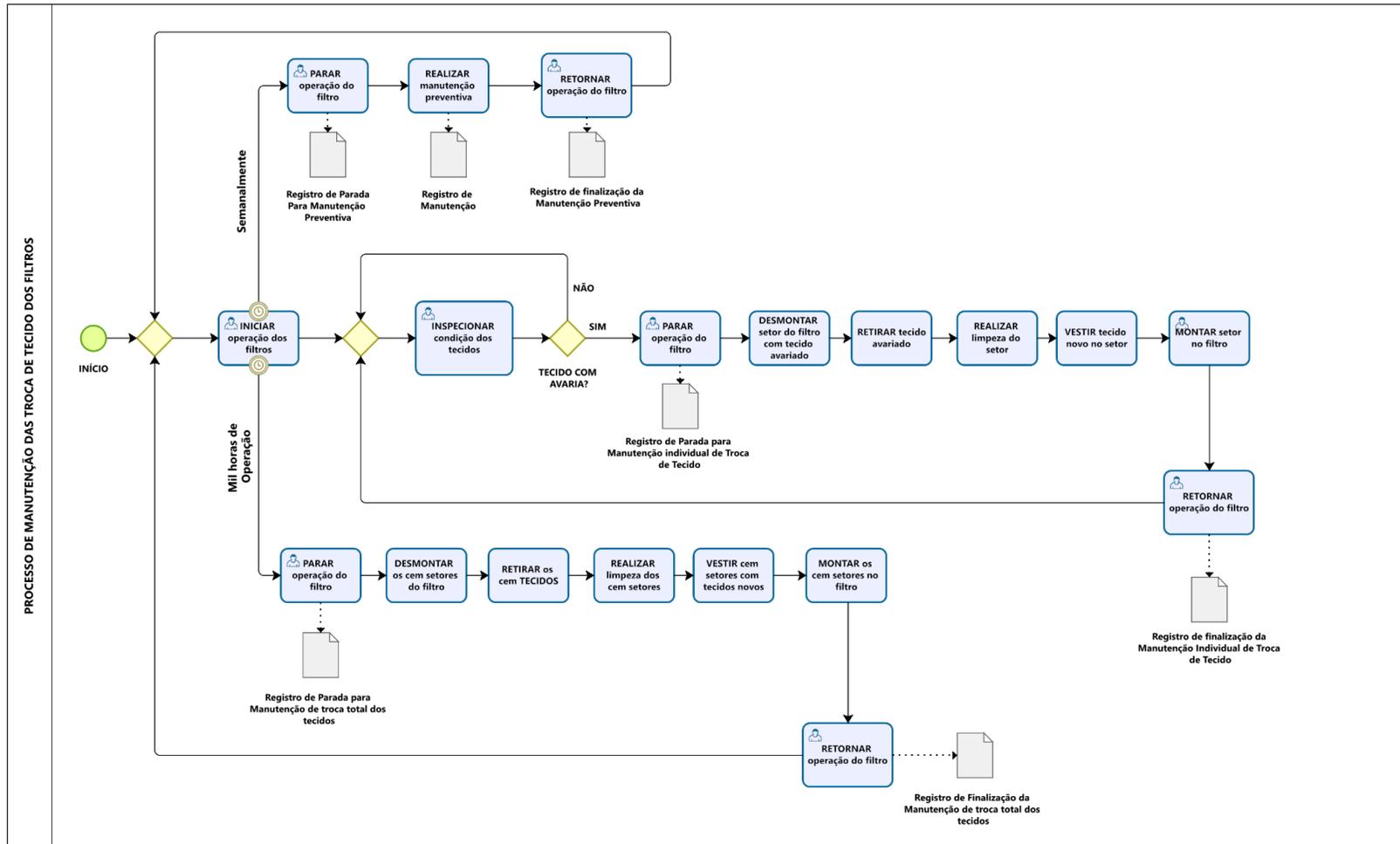
4.2.2.1 Mapeamento do Processo de trocas de tecidos

O mapeamento de trocas de tecidos foi realizado com o objetivo de identificar as atividades executadas pela equipe de manutenção e proporcionar um melhor entendimento do processo, possibilitando a verificação da existência de potenciais melhorias. O mapa das atividades das manutenções, tanto das trocas individuais quanto das trocas totais de tecidos, pode ser encontrado na Figura 27. Para a aplicação dessa ferramenta, foi necessário acompanhar a rotina de execução da equipe de manutenção e identificar os pontos e tarefas relevantes para a finalidade deste estudo.

No mapeamento foi constatado uma grande semelhança na execução das manutenções de trocas totais de tecidos e das trocas individuais, apresentando diferenças apenas na duração e na origem das duas manutenções. As trocas totais exigem mais tempo devido a necessidade de trocar os cem tecidos dos filtros e são realizadas quando o equipamento atinge mil horas de operação, já as trocas individuais são realizadas quando a inspeção identifica algum tecido com avaria.

Outro ponto relevante incluído no mapeamento são as manutenções preventivas, que foram a terceira causa com maior impacto na disponibilidade dos filtros, conforme demonstrado no gráfico de Pareto na Figura 23. Essas manutenções são realizadas semanalmente nas partes elétrica e mecânica dos filtros e não têm relação direta com as trocas de tecidos. No entanto, durante o mapeamento, identificou-se que as manutenções de trocas totais de tecidos e as preventivas podem ocorrer simultaneamente em filtros diferentes, causando a indisponibilidade de dois filtros por longos períodos. Os eventos descritos podem ser encontrados no início do mapeamento na Figura 27, gerados pela atividade descrita como "INICIAR operação dos filtros".

Figura 27: Mapeamento do Processo das manutenções de trocas de tecidos



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

4.3 MEASURE

A Fase do *MEASURE* teve como finalidade determinar um indicador para possibilitar a medição de possíveis resultados alcançados.

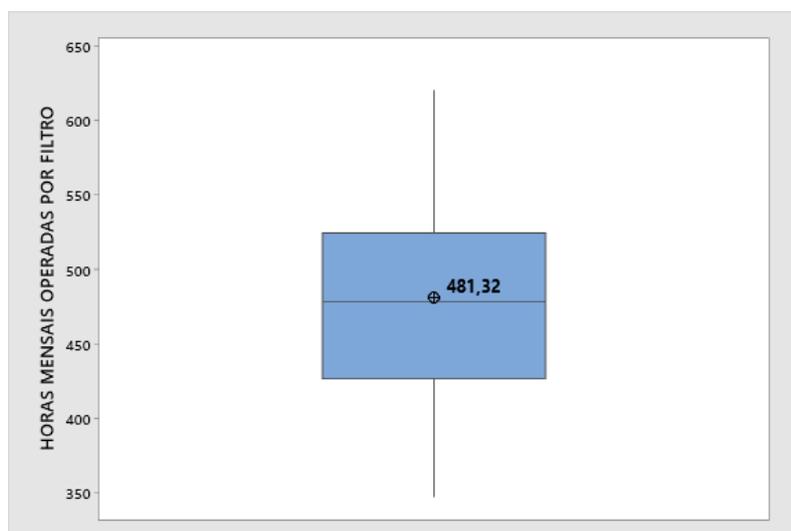
4.3.1 Indicador selecionado

O indicador selecionado foi o tempo de operação mensal de cada um dos oito filtros da planta de filtragem. Esse indicador foi escolhido devido ao fato de que, no processo de filtragem estudado, quanto maior a disponibilidade dos filtros, maior é seu tempo de operação, pois há um alto fluxo de polpa direcionado para a planta de filtragem. Desse modo, caso as soluções implementadas aumentem o tempo de operação mensal dos filtros, isso indicará que a disponibilidade também aumentou. Portanto, o indicador escolhido representará bem os resultados obtidos por esta pesquisa.

4.3.2 Indicador atual do processo

Para a medição do indicador, foram levantadas quantas horas mensais cada um dos oito filtros operou nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril. Com os dados coletados, foi construído um boxplot para visualizar a média de horas operadas mensalmente pelos filtros e verificar se há muitas variações nessas medições. O boxplot pode ser encontrado na Figura 28.

Figura 28: Boxplot do indicador de horas operadas



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Analisando o boxplot, constatou-se que os filtros apresentaram uma média mensal de 481,32 horas de operação e uma baixa variabilidade, já que os dados estão bem concentrados e apresentam pouca dispersão.

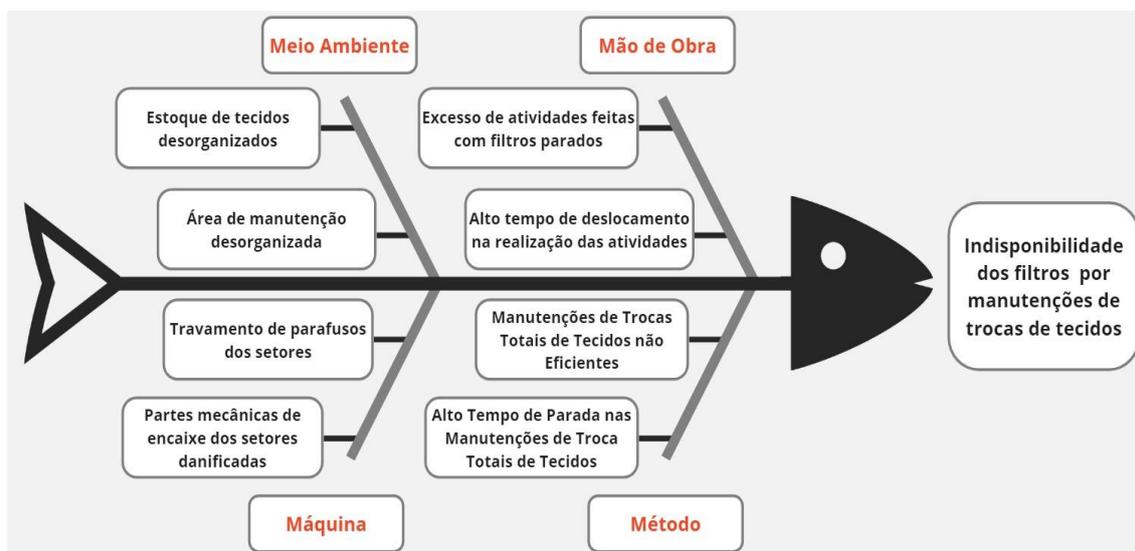
4.4 ANALYSE

A fase *ANALYSE* teve como objetivo identificar e analisar as causas-raiz das indisponibilidades dos filtros geradas pelas manutenções de trocas de tecidos, visando auxiliar na geração de propostas e na implementação de soluções na fase *improve*.

4.4.1 Identificação das causas raízes

Para identificar as causas-raiz, foi utilizada uma ferramenta muito comum na metodologia *Lean Seis Sigma*, o diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito, que é uma das principais ferramentas para essa finalidade. A construção do diagrama e a identificação das causas exigiram o acompanhamento das atividades de manutenção, conversas com as pessoas envolvidas nas trocas de tecidos e a análise do mapeamento do processo realizado na fase *define*. O diagrama e as causas identificadas podem ser encontrados na Figura 29.

Figura 29: Diagrama de Ishikawa

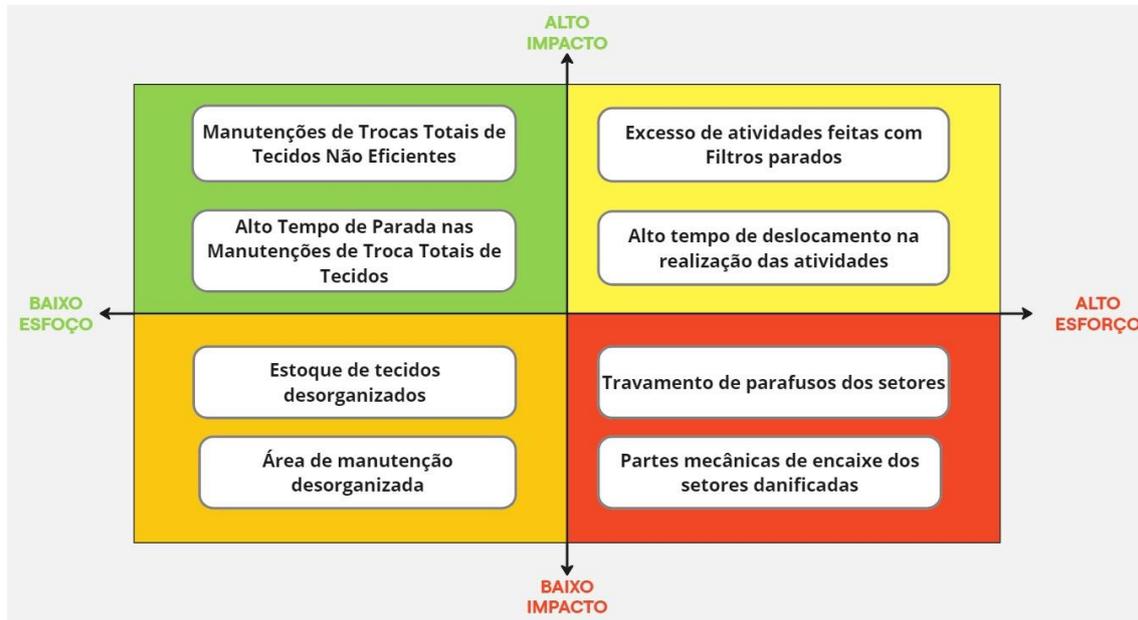


Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Com as causas raízes identificadas, para que as ações apresentem maior eficiência nos resultados, foi montada uma matriz de esforço e impacto para decidir quais causas

deveriam ser analisadas e solucionadas. O resultado da matriz pode ser encontrado na Figura 30.

Figura 30: Matriz de esforço e impacto



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Para selecionar quais causas-raiz seriam analisadas, foi considerado principalmente o impacto que suas resoluções poderiam gerar no aumento da disponibilidade dos filtros. Assim, visando maximizar os resultados, foram selecionadas para análise e resolução as quatro causas-raízes da parte superior da matriz de esforço e impacto, por serem as que apresentam maior impacto na disponibilidade.

4.4.2 Análises das causas raízes

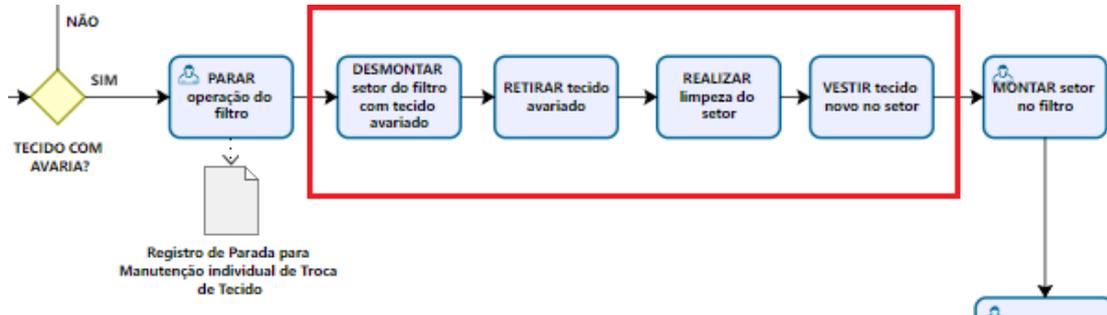
O principal objetivo para realização das análises das causas raízes selecionadas é detalhar melhor seus acontecimentos e possibilitar o encontro de soluções.

4.4.2.1 Excesso de atividades realizadas com os filtros parados

Uma das causas priorizadas para análise foi o excesso de atividades realizadas após a parada dos filtros para as manutenções de trocas de tecidos, tanto nas trocas totais quanto nas trocas individuais. Essa causa pode ser identificada através do mapeamento do processo de manutenção feito na fase do *Define*, anteriormente apresentado.

A Figura 31 é um fragmento do mapeamento do processo e nela é destacado a quantidade de atividades realizadas após a parada do filtro para manutenção de troca de tecido. Quanto maior o número de atividades realizadas com o equipamento parado, menor será sua disponibilidade para operação, sendo crucial melhorar essa condição.

Figura 31: Atividades realizadas com filtros parados



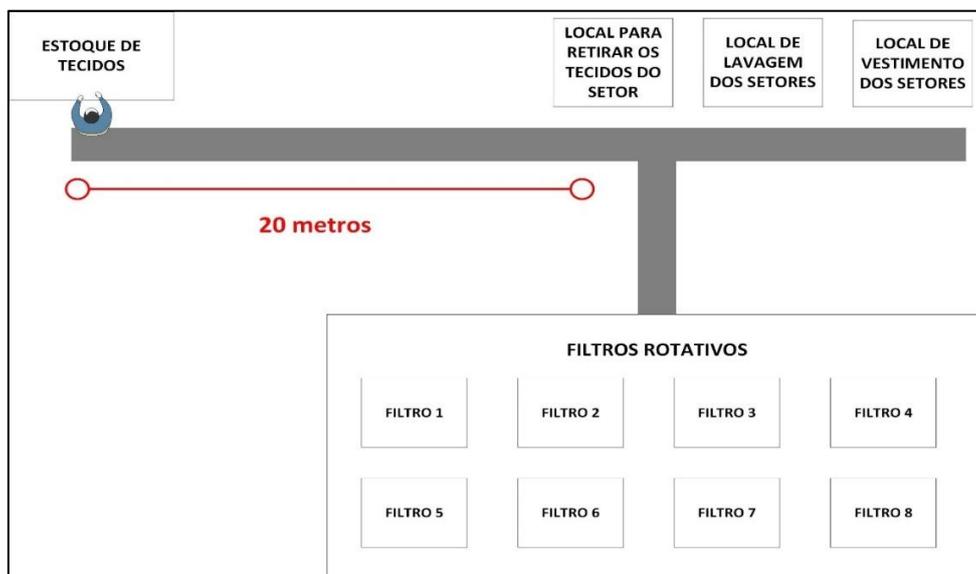
Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Portanto, para que a disponibilidade dos filtros aumente, as etapas destacadas deverão ser planejadas e executadas antes dos filtros serem parados e bloqueados para intervenção da equipe de manutenção.

4.4.2.2 Alto tempo de deslocamento na realização das atividades de manutenção

Na Figura 32 é apresentado o *layout* de cada área onde é realizado as etapas das manutenções de trocas de tecidos na planta de filtragem da empresa estudada.

Figura 32: Layout da planta de filtragem



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Durante o acompanhamento das atividades de manutenção das trocas de tecidos foi possível observar um alto tempo perdido com deslocamento para busca de tecidos ao estoque para serem vestidos nos setores. Como não existe um local apropriado para colocar os tecidos ou setores já vestidos próximos aos filtros, é necessário regularmente buscar os tecidos novos no estoque para serem vestidos nos setores.

Como é possível observar no *layout* da Figura 32, o estoque de tecidos fica a vinte metros de distância das demais áreas de manutenção, assim criando um desperdício muito abordado pela metodologia *Lean Seis Sigma*, o desperdício de movimento. Essa causa se torna ainda mais grave levando em consideração que os filtros não estão disponíveis para operação durante a execução desses movimentos.

4.4.2.3 Manutenções de trocas totais de tecidos não eficientes

Como citado anteriormente, as manutenções de trocas totais de tecidos têm caráter preventivo, onde são trocados os cem tecidos dos filtros quando atingem mil horas de operação. Essa manutenção tem o objetivo de dar maior confiabilidade ao equipamento, porque caso não fosse realizado a troca total, vários tecidos chegariam ao final de vida útil ao mesmo tempo e assim gerando várias manutenções de trocas individuais de tecidos seguidas e em um curto espaço de tempo. Muitas trocas individuais de tecidos são extremamente prejudiciais para a disponibilidade dos filtros, pois é preciso parar a operação dos equipamentos várias vezes.

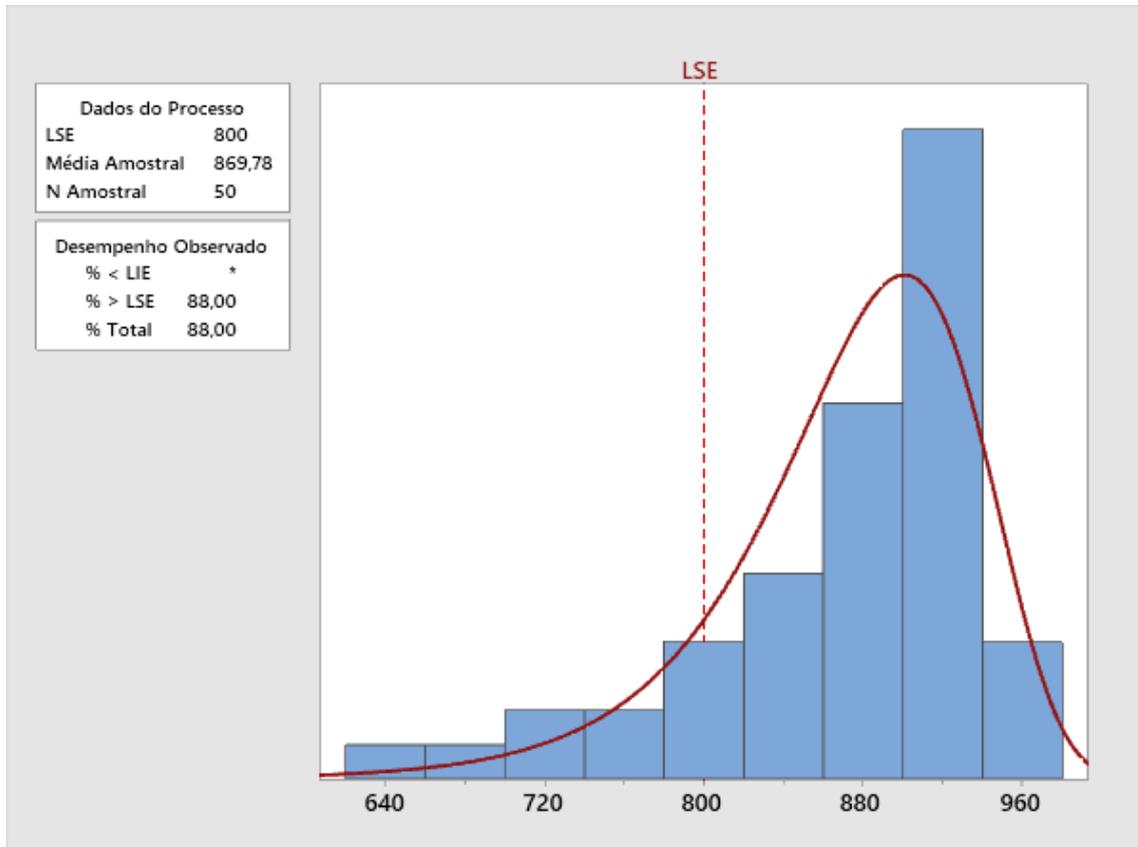
Durante o levantamento das causas raízes foi observado um excesso de manutenções de trocas individuais de tecidos, algo que não deveria ocorrer caso as manutenções de trocas totais estivessem sendo realizadas de forma eficiente. Portanto, é possível supor que as trocas totais estavam sendo feitas em momentos equivocados, sendo necessário analisar o motivo dessa causa.

Para analisar o melhor momento para troca total dos tecidos foi recorrido aos recursos da manutenção centrada na confiabilidade (RCM). Primeiramente, foi necessário coletar amostras de tempo de operação até a falha dos tecidos, sendo coletadas 50 amostras. Cada amostra é representada por um tecido e quanto tempo de operação ele levou para demonstrar alguma avaria.

Com os dados das amostras coletadas, foi construído um histograma no software *Minitab*, com a finalidade de descobrir a média de tempo de vida útil dos tecidos e em

qual período em horas operadas está concentrado o maior número de falhas dos tecidos. O histograma pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33: Histograma de tempo de operação em horas dos tecidos

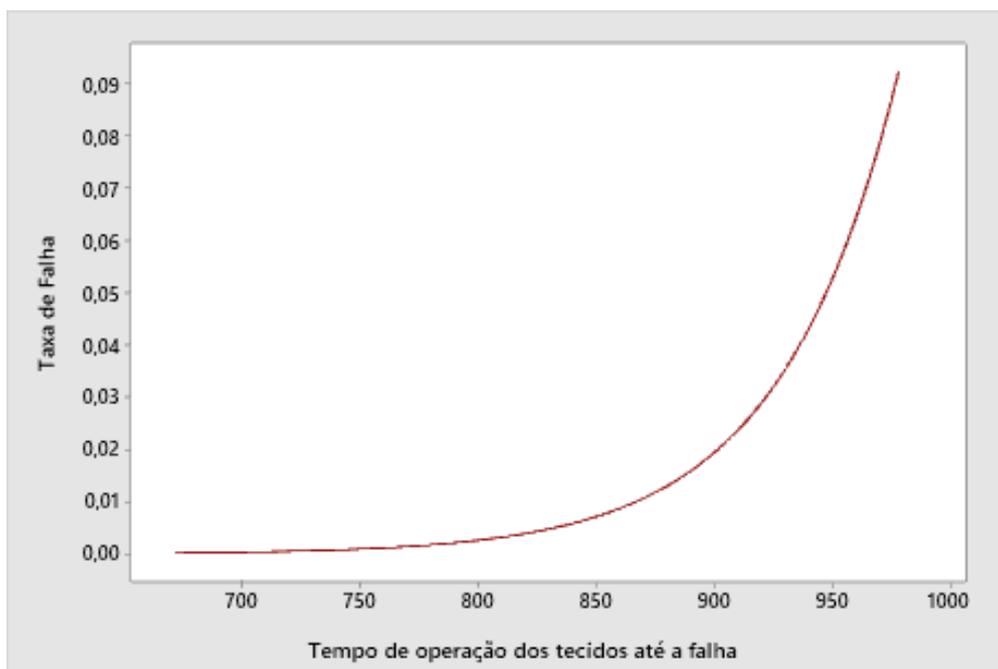


Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Analisando o histograma, foi possível perceber que a grande maioria dos tecidos apresentou falhas entre 800 e 960 horas de operação, período que corresponde a 88% das amostras. Outro ponto interessante é a média de tempo de operação dos tecidos, que foi de 869 horas. Além disso, não foi encontrada nenhuma amostra de tecido que tenha durado mil horas de operação.

Para enriquecer ainda mais a análise de sobrevivência das amostras de tecidos coletadas, foi construído, no Minitab, um gráfico da função da taxa de falha. O gráfico, encontrado na Figura 34, mostra uma grande taxa exponencial de falhas após 800 horas de operação, com uma alta probabilidade de nenhum tecido alcançar mil horas de operação.

Figura 34: Gráfico de Taxa de Falha dos tecidos por horas operadas

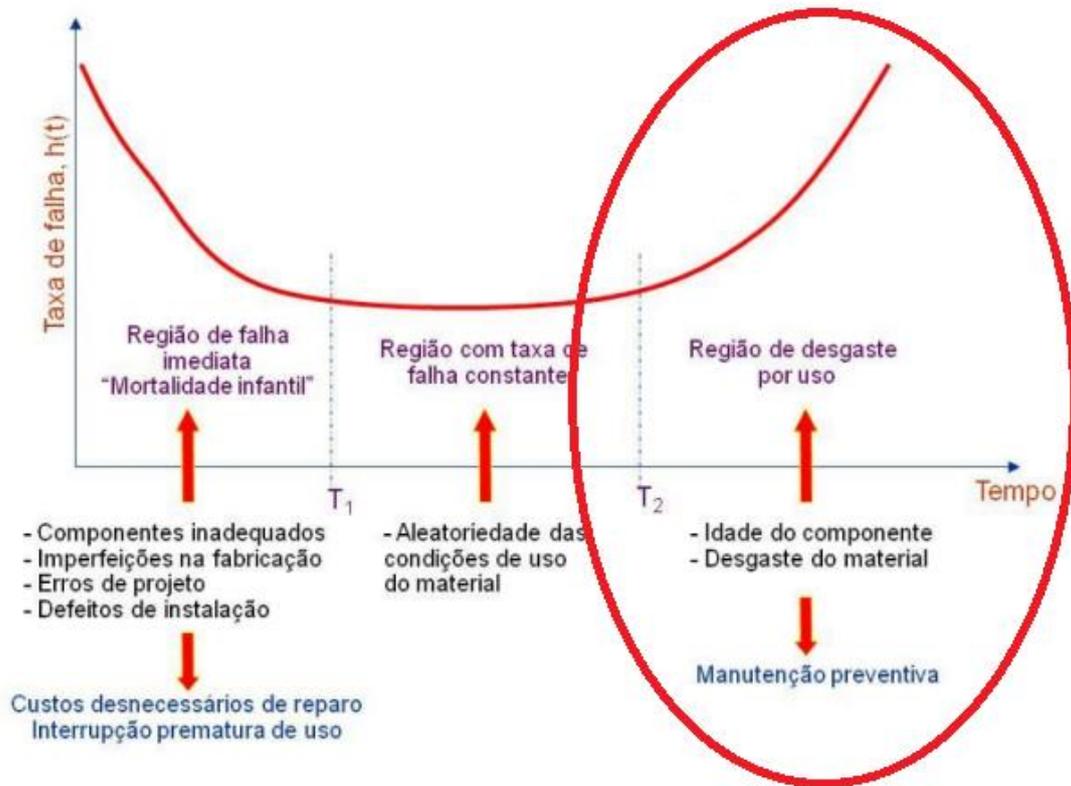


Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Na Figura 10, a referência bibliográfica deste estudo apresenta a curva da banheira, amplamente utilizada na manutenção centrada na confiabilidade. Essa curva foi empregada para determinar o tipo de manutenção mais adequado para a manutenção de troca total dos tecidos e o momento ideal para sua aplicação. Ao analisar o gráfico da taxa de falha e a curva da banheira na Figura 35, identificou-se que a manutenção recomendada é a preventiva, com o objetivo de corrigir os desgastes e atender ao fim da vida útil dos tecidos.

O tipo de manutenção identificado já era adotado como método para as trocas totais de tecidos. No entanto, ao observar o histograma e o gráfico da taxa de falha dos tecidos, verificou-se que realizar as manutenções preventivas após mil horas de operação é um momento tardio, pois a maioria dos tecidos apresenta avarias antes desse período. Isso compromete a eficiência da manutenção preventiva de troca total de tecidos e gera um excesso de manutenções para trocas individuais.

Figura 35: Curva da banheira, indicação do tipo de manutenção



Fonte: Adaptado de (REIS; ANDRADE, 2009)

Portanto, com base nas análises de manutenção centrada na confiabilidade, será necessário antecipar o momento das manutenções de trocas totais para minimizar os tempos de parada causados por trocas individuais de tecidos, aumentando, assim, a disponibilidade dos filtros para operação.

4.4.2.4 Alto tempo de manutenção nas trocas totais de tecidos

A quarta causa raiz identificada e analisada foi o alto tempo necessário para a execução das atividades de trocas totais de tecidos, algo já esperado, visto que essas manutenções envolvem a substituição de todos os cem tecidos dos filtros. O problema é agravado pelo desperdício excessivo de movimento durante as trocas. Para reduzir o tempo de indisponibilidade dos filtros durante essas manutenções, será essencial resolver a causa raiz relacionada ao longo tempo de deslocamento nas atividades de manutenção e propor soluções que minimizem o tempo de parada nas trocas totais de tecidos

4.5 IMPROVE

A fase do *IMPROVE* teve como objetivo principal levantar e implementar soluções para causas raízes, tendo como foco atingir a meta de horas operadas dos filtros estipulada na fase do *Measure*.

4.5.1 Soluções levantadas e implementadas

Em seguida será apresentado as soluções do planejamento e controle da manutenção que foram levantadas e implementadas.

4.5.1.1 Redimensionamento do layout

Conforme as análises realizadas, o alto tempo de deslocamento durante as atividades de manutenção ocorria devido à necessidade de a equipe se deslocar várias vezes até o estoque para buscar os novos tecidos a serem instalados. Para evitar esses deslocamentos, foram criados dois armazéns com capacidade para estocar 80 setores cada, permitindo que 160 setores sejam previamente preparados antes das manutenções de trocas de tecidos. Um exemplo dos armazéns criados pode ser visualizado na Figura 36.

Figura 36: Armazém para setores vestidos



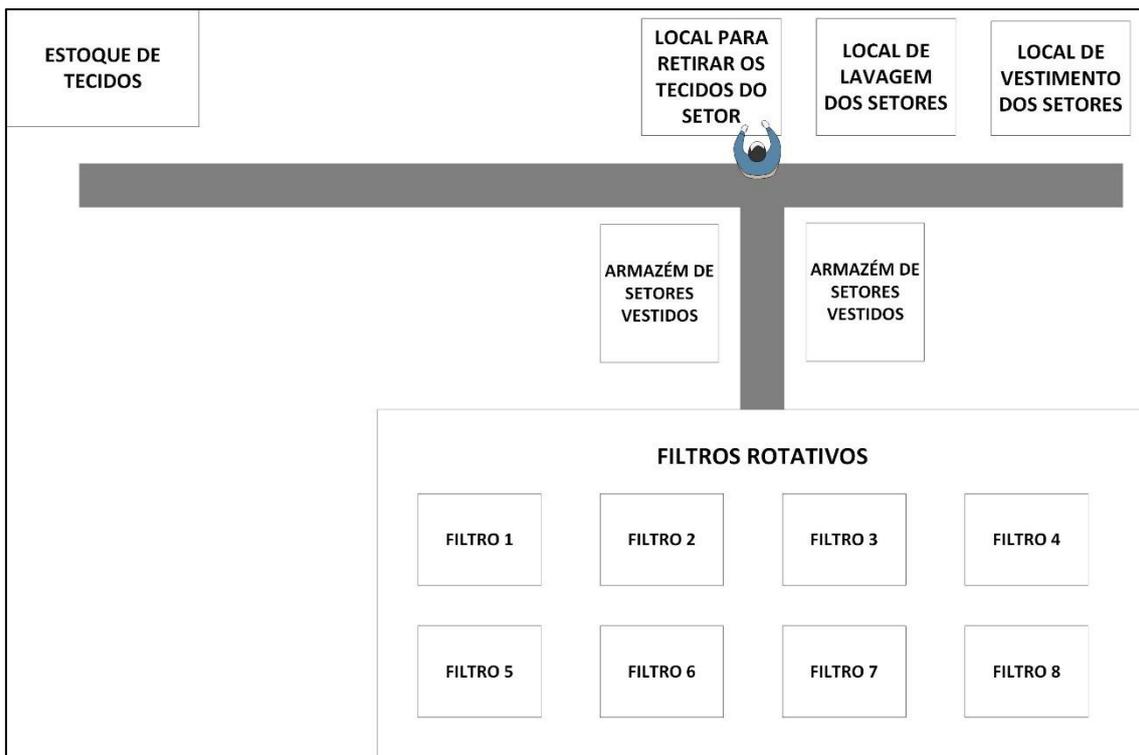
Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

A empresa já detinha 200 setores de filtros sobressalentes, que não eram utilizados previamente devido não ter o local apropriado para estocarem. Assim, com a criação dos

armazéns foi possível utilizar esses recursos para o melhor planejamento e controle das manutenções de trocas de tecidos.

Outra solução implementada para auxiliar na diminuição do tempo de deslocamento foi posicionar os armazéns próximos aos filtros e próximos às áreas onde são realizadas as demais etapas das manutenções. Na Figura 37 é encontrado o novo layout da planta de filtragem, contendo a localidade dos armazéns.

Figura 37: Novo Layout da planta de filtragem



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Desse modo, com essas soluções implementadas é possível realizar as manutenções de trocas de tecidos com maior eficiência, já que os tempos de deslocamento das equipes de manutenção diminuirão. Com isso, os filtros ficarão menos tempo parados para execução das atividades de manutenção e por consequência sua disponibilidade para operação aumentará.

4.5.1.2 Diminuição das atividades de manutenção com filtros parados

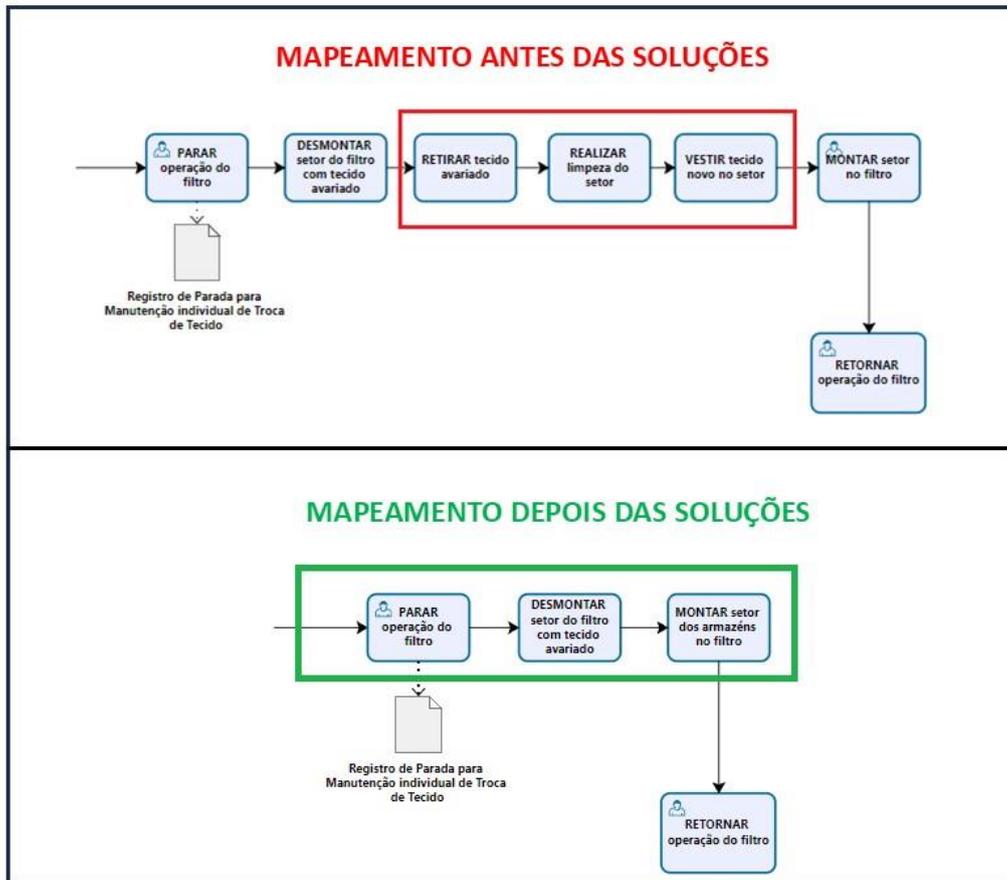
Os armazéns de estocagem de setores também possibilitaram a redução das atividades de manutenção com filtros parados, pelo fato de ser possível deixar 160 setores previamente vestidos. Observando a Figura 36, que apresenta a estrutura dos armazéns, é possível visualizar que ele utiliza o sistema de gestão a vista. Esse sistema é muito utilizado na metodologia *Lean Seis Sigma*, onde as cores vermelha, amarela e verde alertam as equipes de manutenção sobre o número de setores previamente vestidos. Com esse sistema de cores, cria a possibilidade de manter sempre um bom nível de estoque de setores prontos para utilização.

Essas medidas foram tomadas baseadas na ferramenta do planejamento e controle da manutenção que envolve a diminuição do tempo de setup, sendo ele o período de tempo em que a produção precisa ser parada para ajustes dos equipamentos. Segundo Foroni (2009, p. 3), as operações de setup interno são aquelas que só podem ser executadas com a máquina parada, enquanto o setup externo se refere a operações que podem ser realizadas com a máquina em operação.

Assim, a solução implementada foi transformar as atividades de retirar tecidos avariados, realizar limpeza do setor e vestir tecido novo, em setups externos e não necessitando de serem realizadas com os filtros parados. Na Figura 38, é demonstrado o mapeamento das atividades antes e depois das soluções aplicadas. Sendo observável que não é mais necessário executar as atividades citadas anteriormente em setup interno.

Os resultados dessas mudanças impactaram diretamente a disponibilidade dos filtros, já que foram retiradas três etapas da manutenção que eram realizadas com os filtros parados. Essas atividades eram realizadas para recondicionar um setor que já estava em utilização no filtro, precisando de passar pela etapa de retirada do tecido usado, lavagem do setor e vestimento do novo tecido. Com os armazéns já proporcionando setores com tecidos novos, é preciso apenas desmontar o setor com tecido usado do filtro, montar o setor com tecido novo dos armazéns e voltar a operação do filtro, sendo realizado o recondicionamento dos setores usados com o equipamento já operando.

Figura 38: Antes e depois da diminuição do tempo de setup

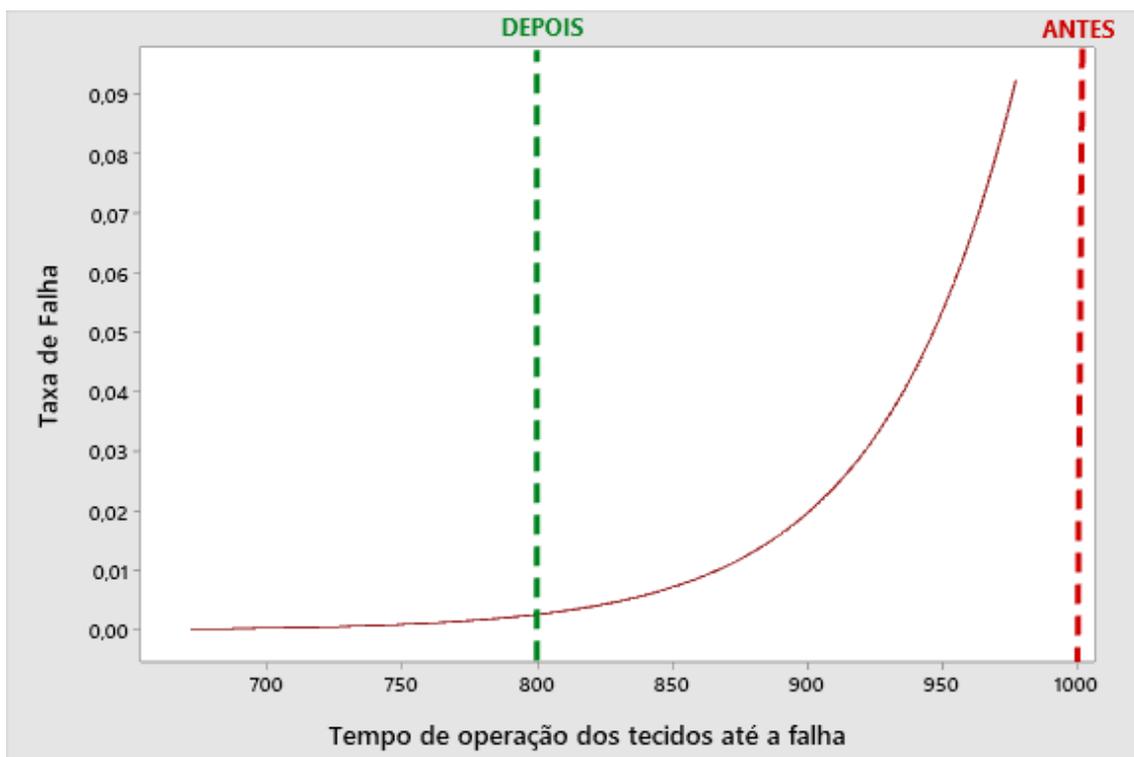


Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

4.5.1.3 Redimensionamento do momento para manutenção preventiva de troca total de tecidos

Durante a fase de análise *Analyse*, foi observado que as manutenções de trocas totais estavam sendo realizadas de forma tardia, com a maioria dos tecidos não durando até mil horas de operação. Para solucionar esse problema, utilizou-se o gráfico da taxa de falha dos tecidos, que permitiu identificar o ponto em que começava a fase exponencial de desgaste e o fim da vida útil dos tecidos. Com base nessa análise, determinou-se que a manutenção preventiva de troca total dos tecidos deveria ser realizada antes desse ponto crítico. Na Figura 39, é apresentado o gráfico da taxa de falha, indicando o novo momento recomendado para a troca total e comparando-o com o momento em que as trocas eram anteriormente executadas.

Figura 39: Tempos de Trocas Totais Antes e Depois



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

A solução implementada visou realizar as manutenções de trocas totais a cada 800 horas, em vez de 1.000 horas de operação dos filtros, minimizando a possibilidade de vários tecidos chegarem simultaneamente ao fim de sua vida útil. Com essa medida, observou-se uma redução significativa nas manutenções de trocas individuais de tecidos avariados, já que a maior taxa de falha ocorre após as 800 horas de operação. A diminuição das trocas individuais resultou em menos paradas dos filtros para substituição de tecidos, aumentando assim sua disponibilidade para operação.

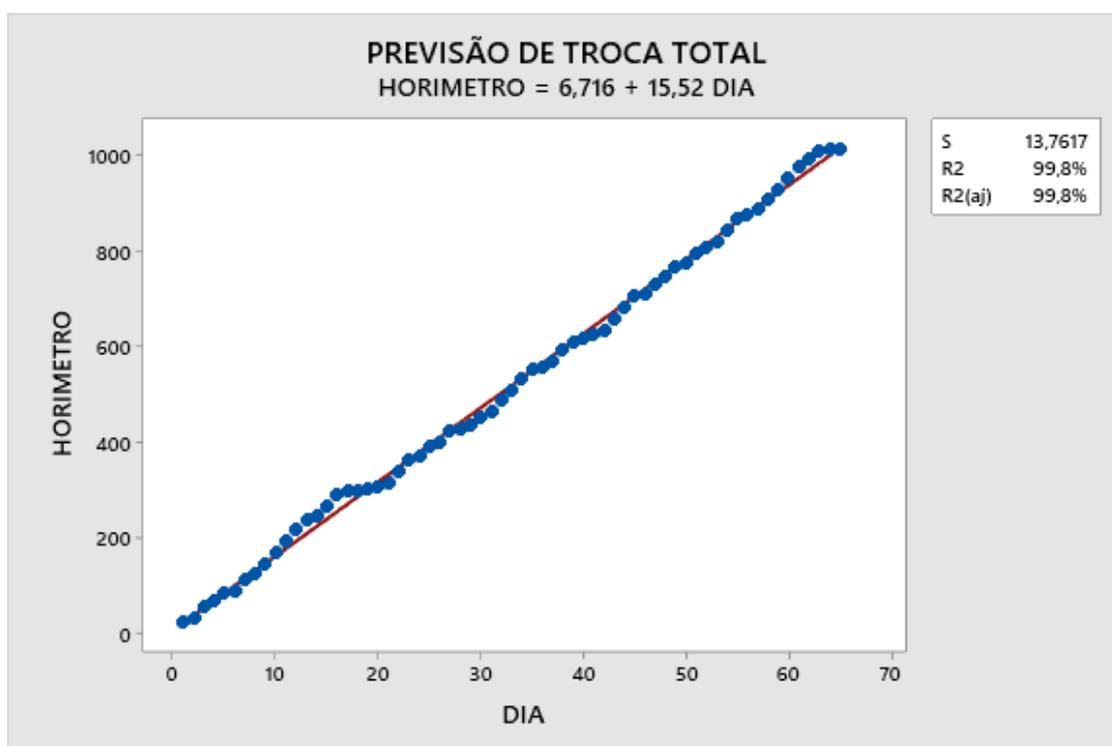
4.5.1.4 Redução do tempo de parada para manutenção de troca totais

Como foi abordado anteriormente, as manutenções de trocas totais de tecidos requerem um grande tempo de execução, devido a necessidade de trocar os cem tecidos dos filtros. Para que essas manutenções não causassem grandes perdas de disponibilidades dos filtros, foi elaborado um método de planejamento dessas manutenções.

Conforme mostrado no mapeamento do processo de manutenções de trocas de tecidos na Figura 27, é necessário realizar semanalmente as manutenções preventivas das

partes elétricas e mecânicas. O objetivo do planejamento foi possibilitar que as trocas totais de tecidos fossem realizadas juntamente com essas manutenções, aproveitando o período em que o filtro já estaria indisponível. Para planejar a execução das duas manutenções no mesmo dia, foi criado um método de previsão para as trocas totais, que são realizadas quando o filtro atinge 800 horas de operação. Com base nos tempos de operação anteriores dos filtros, desenvolveu-se uma regressão linear para prever o dia em que os filtros alcançariam o momento adequado para a troca total de tecidos. O gráfico com a equação desse método de previsão pode ser encontrado na Figura 40.

Figura 40: Método de Previsão para Manutenção de troca total



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Assim, para utilização do método de previsão é inserido na equação linear as horas já operadas dos filtros, sendo extraído quantos dias faltam para o equipamento alcançar as 800 horas. Com a previsão da data que os filtros precisam realizar as manutenções de troca totais de tecidos, possibilitou planejar em conjunto as manutenções elétricas e mecânicas, diminuindo assim drasticamente os tempos de indisponibilidade dos filtros por manutenções de trocas totais de tecidos.

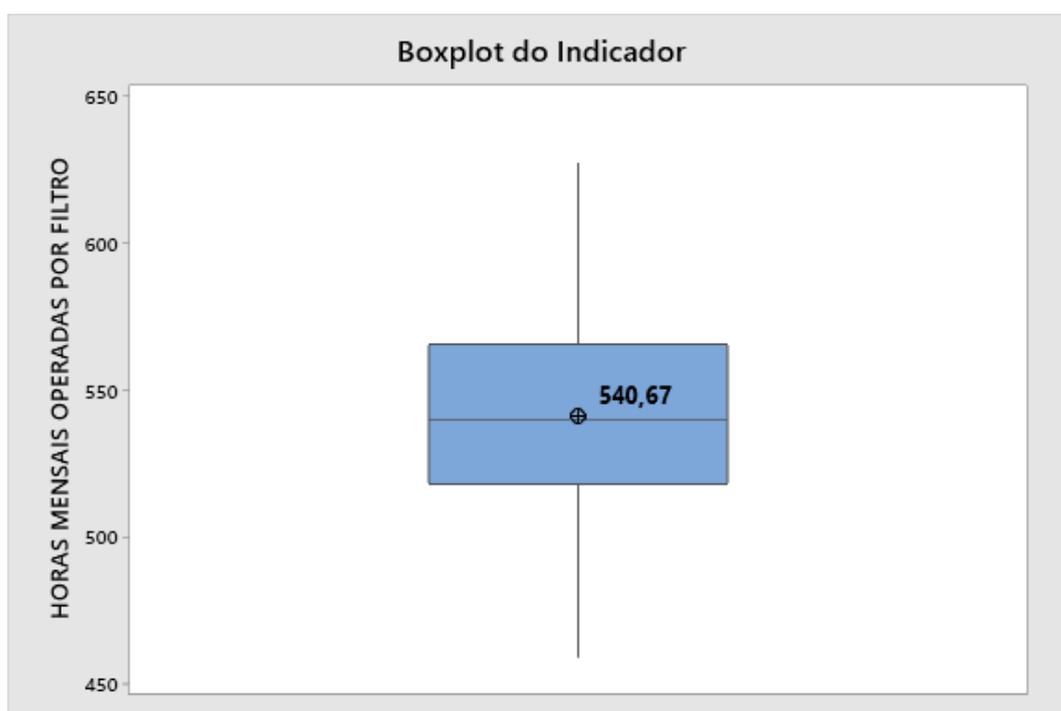
4.6 CONTROL

A fase de *CONTROL* teve como objetivo medir os resultados obtidos através das soluções implementadas utilizando o indicador criado na fase do *Measure*.

4.6.1 Resultados obtidos

Para mensurar os resultados obtidos foi levantado quantas horas mensais cada um dos oito filtros operou nos meses após a implementação das soluções, sendo eles: maio, junho, julho e agosto. Com os dados coletados, foi realizada a construção do boxplot para comparar a diferença das médias e das variações de horas operadas mensais dos filtros antes e depois das soluções. O boxplot construído pode ser visualizado na Figura 41.

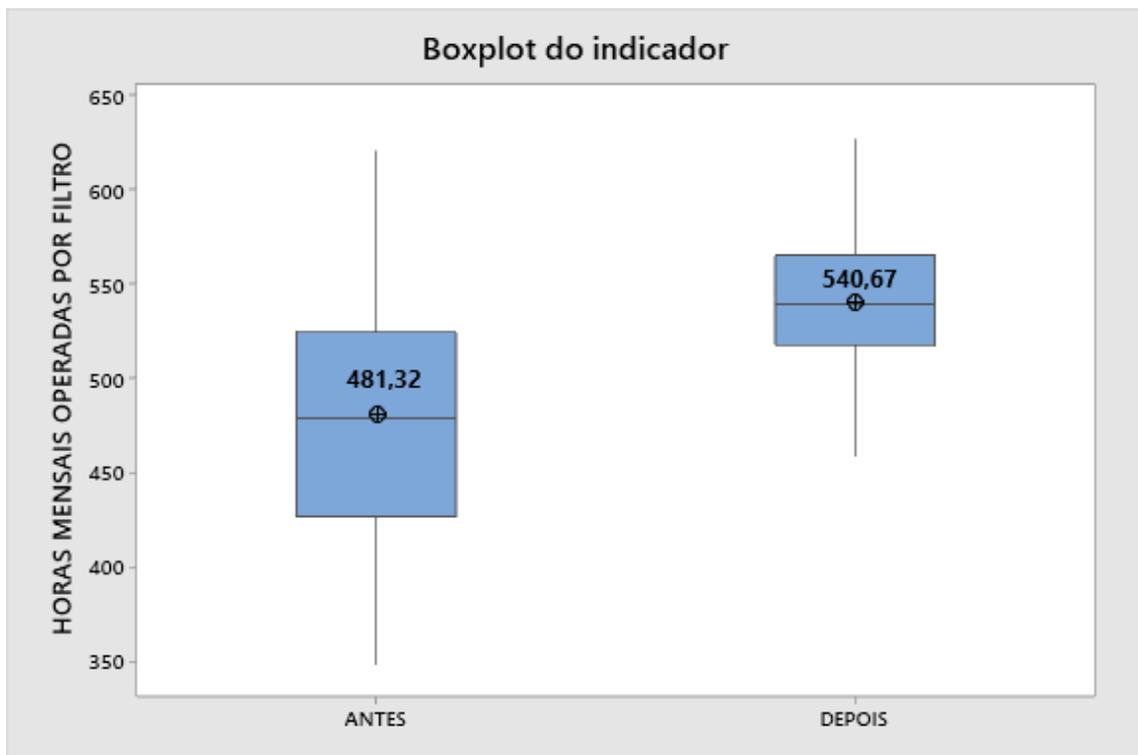
Figura 41: Boxplot do indicador após a implementação das soluções



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Analisando o boxplot das horas operadas mensais dos filtros após a implementação das soluções, foi encontrado uma média de horas operadas por filtro de 540,67 horas e uma variação de operação ainda mais reduzida. Para ter melhor compreensão dos resultados obtidos é possível visualizar um gráfico contendo o boxplot do indicador antes e depois das soluções na Figura 42.

Figura 42: Boxplot de comparação do antes e depois das soluções



Fonte: Documentação da Pesquisa (2024)

Comparando os dois indicadores foi encontrado um aumento médio de horas mensais operadas por filtro de 59,35 horas. Também é possível observar a maior concentração dos dados no indicador depois das soluções implementadas, indicando uma menor variação das horas operadas e uma maior confiabilidade de operação dos equipamentos.

Com um aumento de 59,35 horas por filtro, isso acarreta em um aumento médio de 474,8 horas operadas mensalmente pelos oito filtros. Portanto, como estipulado na fase do *Measure* que quanto maior o tempo de operação, maior é a disponibilidade dos filtros, podemos concluir que foi obtido um ótimo resultado no aumento da disponibilidade dos equipamentos aplicando as ferramentas do planejamento e controle da manutenção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados da pesquisa, foi possível observar que a utilização da metodologia *Lean Seis Sigma* integrada às ferramentas do planejamento e controle da manutenção gerou resultados satisfatórios para o aumento da disponibilidade dos filtros rotativos, apresentando a resolução da questão problema de forma prática.

A metodologia *Lean Seis Sigma*, por meio do ciclo DMAIC, forneceu uma sequência lógica de raciocínio para a execução das análises e atividades necessárias para atingir os objetivos da pesquisa, utilizando ferramentas estatísticas e conceituais, como o diagrama de Ishikawa, gráfico de Pareto, boxplot e mapeamento de processos, que trouxeram resultados extremamente relevantes. A aplicação das ferramentas do planejamento e controle da manutenção (PCM) potencializou o uso do *Lean Seis Sigma*, aumentando a aplicabilidade e eficiência das soluções propostas para o cenário estudado.

Dessa forma, o *Lean Seis Sigma* teve maior impacto na identificação dos problemas, no direcionamento das soluções e na mensuração dos resultados, enquanto as ferramentas de planejamento e controle da manutenção apresentaram maior impacto na aplicação das soluções. A análise da implementação e dos resultados da pesquisa permitiu confirmar o atingimento dos objetivos específicos, além de demonstrar como a integração do *Lean Seis Sigma* com as ferramentas do PCM aumentou a disponibilidade dos filtros rotativos no setor de mineração, atingindo também o objetivo geral do estudo.

Um ponto muito importante para o alcance dos resultados da pesquisa foi a colaboração dos funcionários da empresa selecionada para o estudo, onde todas as análises e aplicação de soluções foram realizadas com a colaboração e experiências dos mesmos. No entanto, a implementação de uma pesquisa em uma planta industrial envolve desafios práticos consideráveis. A burocracia encontrada causou atrasos, uma vez que a aprovação de projetos e o acesso a informações e recursos geralmente exigiram várias etapas formais. Ademais, o tempo para os funcionários participarem de reuniões ou treinamentos foi limitado, devido às suas funções diárias, o que dificultou a implementação eficiente de algumas soluções propostas.

Para pesquisas futuras, é possível explorar a aplicação do *Lean Seis Sigma* em outras áreas do setor de mineração, como a manutenção preditiva com uso de tecnologias de monitoramento em tempo real, para prever falhas e otimizar a manutenção. Também é possível investigar o uso das ferramentas de planejamento e controle em abordagens

avançadas, como a manutenção centrada na confiabilidade (RCM), pode aumentar ainda mais a disponibilidade dos equipamentos. Comparar implementações em diferentes setores industriais também seria relevante para adaptar e expandir a eficácia das metodologias em diversos contextos operacionais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB, **Value of Reliability**, 2023. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/458b324e7f9f43769c6731126cec9284/ABB_Survey%20Report%202023_1920x1080_20231010_JL_final_edits.pdf>.

ALFA ENGENHARIA. **Componentes de Filtros Rotativos a vácuo**. 2017. Acesso em: <https://www.alfaengenharia.ind.br/>

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial - Princípios Técnicos e Operações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2016.

BALDAN et al. **Manual de gestão de projetos**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

BARBROW, S.; HARTLINE, M. **Process mapping as organizational assessment in academic libraries**. Performance Measurement and Metrics, 2015.

BPMN. **Business Process Modeling Notation**, v.2.0. OMG. 2011. Disponível em: <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/PDF/>

CATERPILAR GLOBAL MINING. **Influenciar o Desempenho de Equipamentos Através de Métricas de Manutenção**, 2008. Disponível em: <https://mining.cat.com/cda/files/2785445/12/metrics_PT.pdf>.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4. Ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2013.

COUTINHO. **Veja como priorizar tarefas da forma correta com o auxílio da Matriz Esforço x Impacto**. Voitto, 2019. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/matriz-esforcoimpacto>.

DAMAS, L. F. Q., NASCIMENTO, L. D., COSTA, E. D. L., SILVA, E. D.S. **Implantação de PCM em máquinas industriais: um estudo de caso em uma indústria de autopeças no polo industrial de Manaus sob a perspectiva de gestão de projetos em manutenção**. Anais VII Singep, 2018.

DENIS, Pascal. **Produção enxuta simplificada**. Porto Alegre: Grupo A, 2011. *E-book*. ISBN 9788577802913. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577802913/>. Acesso em: 24 jul. 2024.

ECKER, George. **Six Sigma for Everyone**. New York: John Wiley & Sons, 2003.

FORONI, Caroline Dutra; MEDEIROS, Cristina Medes; VILHENA, Guilherme F. R.; ARAÚJO, Lorena Silva. **Estudo de caso da Metodologia SMED em uma empresa francesa do setor alimentício**. Salvador. BA: Enegep, 2009.

GREGÓRIO, G. F. P.; SANTOS, D. F.; PRATA, A. B. **Engenharia de manutenção** – Porto Alegre: SAGAH, 2018.

HOLANDA, V.B.; RICCIO, E.D. **A Utilização da Pesquisa Ação para Perceber e Implementar Sistemas de Informações Gerenciais**. Artigo Internet USP,2000.

LAFRAIA, J. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEITE, Wanderson Pereira. **Recuperação e Recirculação de Água no Processamento Mineral**. 51f. Monografia (Especialização de Engenharia em Recursos Minerais) - CEERMIN, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. **Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.

MATSUMOTA, Leonardo. **O roteiro DMAIC na melhoria dos processos Six Sigma**. 2020.

MENEZES, G. S.; SANTOS, M. M. N.; CHAVES, G. L. D. **O pilar manutenção planejada da manutenção produtiva total (TPM): aplicação da manutenção centrada em confiabilidade (RCM)**. Revista Gestão Industrial, v. 11, n. 4, 2015.

MEYER, Kurt. **Pelletizing of Iron Ores**. Berlin: Springer-Verlag, 1980

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. **The journal coverage of web of science and scopus: a comparative analysis**. Scientometrics, v. 106, 10 2015

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade, 7ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. *E-book*. ISBN 9788521631873. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521631873/>.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. pág.51.

ISBN 9788521637448. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637448/>.

MONTGOMERY. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**, 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

NBR, ABNT. 5462 Confiabilidade e Manutenibilidade—Terminologia. **Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1994.

REIS, L. O. R.; ANDRADE, J. J. de O. **Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção**. XXIX encontro nacional de engenharia de produção, Salvador, BA, Brasil, 2009.

SELLITTO, M.; BORCHADT, M.; ARAÚJO, D. **Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa**. Anais do XXIIº ENEGEP. Curitiba: ABEPRO, 2002.

SENSEYE, **The True Cost of Downtime 2022**, 2023. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3d606495-dbe0-43e4-80b1-d04e27ada920/dics-b10153-00-7600truecostofdowntime2022-144.pdf>>.

THIOLLENT, M. **Pesquisa-ação nas organizações**. São Paulo: Atlas, 2002.

TRIP, D. **Pesquisa-ação: uma introdução metodológica**. **Educação e Pesquisa**, (Set-Dez de 2005).

TUBINO, Dalvio F. **Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática**, 3ª edição. Rio de Janeiro: Atlas, 2017.

TURRER, H. D. G. et al. **Desempenho no processamento mineral de dois tipos de itabiritos da Serra do Sapo**. 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, ABM, 9p, 2015

VIANA, H. R. **Planejamento e Controle da Manutenção – PCM**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2002.

WERKEMA, C. **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda, 2012.

WERKEMA, Cristina. **Lean Seis Sigma - Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing**. Rio de Janeiro: GEN Atlas, 2011.

WERKEMA, Cristina. **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas**. Rio de Janeiro: GEN Atlas, 2014. *E-book*. pág.88. ISBN 9788595152311. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595152311/>.