

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - DEPRO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

LUIZ FELIPE PEREIRA MATHIAS

**LEAN SEIS SIGMA APLICADO NA ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO: UM
ESTUDO DE CASO PARA A REDUÇÃO DAS OCORRÊNCIAS ELÉTRICAS DE
UMA FROTA DE CAMINHÕES GRANDE PORTE DO SETOR DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO, MG

2023

Luiz Felipe Pereira Mathias

Lean seis sigma aplicado na engenharia de manutenção: um estudo de caso para a redução das ocorrências elétricas de uma frota de caminhões grande porte do setor de mineração

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Magno Silvério Campos

OURO PRETO

2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiz Felipe Pereira Mathias

Lean Seis Sigma aplicado na engenharia de manutenção: um estudo de caso para a redução das ocorrências elétricas de uma frota de caminhões de grande porte do 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 30 de agosto de 2023.

Membros da banca

Prof.º Dr.º **Magno Silvério Campos** - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof.ª Me. **Cristiano Luís Turbino de França e Silva** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Me. **Gabriel Fernandes Lobo** - Examinador Convidado - Universidade Federal de Ouro Preto

Magno Silvério Campos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/09/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/09/2023, às 12:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/09/2023, às 12:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Fernandes Lobo, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 06/09/2023, às 13:59, 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 **0582973** e o código CRC **F3C61A71**.

AGRADECIMENTOS

Neste momento de celebração, desejo expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que desempenharam um papel vital nessa jornada.

Agradeço meus pais Jair Eustáquio e Maria da Penha pelas palavras sábias, o apoio constante e seus exemplos de dedicação moldaram não apenas minha educação, mas também a pessoa que me tornei. Cada conquista que alcanço é também uma celebração do investimento que vocês fizeram em mim. Obrigado por serem a base sólida sobre a qual construí minha jornada acadêmica.

Agradeço à minha namorada Ariane, pela sua paciência, compreensão, amizade, companheirismo e apoio, que foram a âncora que me manteve focado durante os desafios que surgiram ao longo dessa jornada. Seu incentivo constante e sorriso reconfortante me deram a força extra para superar as adversidades. Agradeço por compartilhar essa jornada comigo e por sempre acreditar em meu potencial.

Por fim, agradeço minha filha Helena, você com menos de 2 meses me trouxe uma luz brilhante e uma motivação inigualável para minha vida. Cada passo que dei em direção a essa conquista foi inspirado pela responsabilidade de ser um exemplo para você. Você me ensinou a importância da persistência e determinação, e espero que um dia você se orgulhe do esforço que coloquei em alcançar meus objetivos.

RESUMO

Os caminhões de grande porte desempenham um papel crucial na indústria de mineração ao transportar minérios e outros materiais em ambientes desafiadores, enfrentando terrenos acidentados e condições adversas. A eficácia operacional desses veículos é vital para a rentabilidade da mineração, envolvendo sistemas mecânicos, elétricos e hidráulicos. A aplicação da engenharia de manutenção é fundamental para evitar falhas. Nesse contexto, a integração entre engenharia de manutenção e engenharia de confiabilidade resulta em estratégias aprimoradas para alcançar metas desejadas, envolvendo avaliação de dispositivos, identificação de falhas e abordagens de gestão de manutenção. Isso otimiza custos, priorizando equipamentos, mão-de-obra, produção, disponibilidade e segurança. A análise de dados revelou aumento nas ocorrências não programadas do sistema elétrico da frota 793F, impactando negativamente as metas da empresa. A metodologia Lean Seis Sigma, com o modelo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), será usada para abordar esses desafios de forma eficiente e consistente.

Palavras-chave: Caminhões de grande porte, indústria de mineração, eficácia operacional, engenharia de manutenção, Lean Seis Sigma, Lean Manufacturing, Seis Sigma, ocorrências elétricas, equipamentos pesados, DMAIC.

ABSTRACT

Large trucks play a crucial role in the mining industry by transporting ores and other materials in challenging environments, navigating rough terrains and adverse conditions. The operational efficiency of these vehicles is vital for mining profitability, involving mechanical, electrical, and hydraulic systems. The application of maintenance engineering is essential to prevent failures. In this context, the integration between maintenance engineering and reliability engineering results in enhanced strategies to achieve desired goals, involving device assessment, fault identification, and maintenance management approaches. This optimizes costs, prioritizing equipment, workforce, production, availability, and safety. Data analysis has revealed an increase in unplanned occurrences in the electrical system of the 793F fleet, negatively impacting company goals. The Lean Six Sigma methodology, with the DMAIC model (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), will be used to address these challenges efficiently and consistently.

Keywords: Large trucks, mining industry, operational efficiency, maintenance engineering, Lean Six Sigma, Lean Manufacturing, Six Sigma, electrical occurrences, heavy equipment, DMAIC.

LISTA DE SIGLAS

6M	Máquina, Material, Mão De Obra, Meio Ambiente, Método, Medição
CEP	Controle Estatístico Do Processo
DF	Disponibilidade Física
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve Control
DSS	Driver Safety System (Sistema De Segurança De Direção)
MCC	Manutenção Centrada Na Confiabilidade
MTBF	Mean Time Between Failures (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	Mean Time To Repare (Tempo Médio De Reparo)
RO	Rendimento Operacional

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MACROFASES DO PROCESSO DMAIC	13
FIGURA 2 - INTEGRAÇÃO ENTRE LEAN E SEIS SIGMA	16
FIGURA 3 - CARTA DA QUANTIDADE DE OCORRÊNCIAS DO SISTEMA ELÉTRICO DA FROTA 793F	27
FIGURA 4 - RELATÓRIO RESUMO DA BASE DE DADOS DAS OCORRÊNCIAS DO SISTEMA ELÉTRICO DA FROTA 793F.....	27
FIGURA 5 - MAPA DO PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DA FALHA CORRETIVA DO SISTEMA ELÉTRICO.....	29
FIGURA 6 - CARTA DE CONTROLE COM A META DO PROJETO	29
FIGURA 7 - ESTRATIFICAÇÃO DAS FALHAS POR PERÍODO SECO E CHUVOSO ...	30
FIGURA 8 - ANÁLISE DOS SUBGRUPOS: CLIMA CHUVOSO E CLIMA SECO	32
FIGURA 9 - RELATÓRIO DA CAPACIDADE DO PROCESSO DE MANUTENÇÕES CORRETIVAS DO SISTEMA ELÉTRICO DA FROTA 793F.....	33
FIGURA 10 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA AS FALHAS ELÉTRICAS NÃO PROGRAMADAS DA FROTA 793F	34
FIGURA 11 - GRÁFICO DE PARETO PARA CAUSAS DO PROBLEMA	35
FIGURA 12 - DIAGRAMA DA ÁRVORE PARA ESTRATIFICAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS ELÉTRICAS DA FROTA 793F	36
FIGURA 13 - SUPORTE INADEQUADO DO DSS	38
FIGURA 14 - SENSOR DE FIM DE CURSO DA ESCADA DANIFICADO	38
FIGURA 15 - DIAGRAMA DE AFINIDADES.....	39
FIGURA 16 - MATRIZ ESFORÇO X IMPACTO.....	40
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A META ESTIPULADA	42
FIGURA 18 - RELATÓRIO DE CAPACIDADE BASELINE VS CONTROL.....	43
FIGURA 19 - DESVIO PADRÃO GLOBAL BASELINE VS CONTROL	44
FIGURA 20 - CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DURAÇÃO DA MANUTENÇÕES VS QUANTIDADE DAS MANUTENÇÕES	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA DAS PRINCIPAIS CONSEQUÊNCIAS DA NÃO IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO.....	12
TABELA 2 - MACRO ETAPAS DO DMAIC E SUAS PRINCIPAIS ATIVIDADES	14
TABELA 3 - DESPERDÍCIOS LEAN MANUFACTURING	15
TABELA 4 - INDICADORES FUNDAMENTAIS DA MCC.....	18
TABELA 5 - UTILIZAÇÃO DO 5W2H	22
TABELA 6 - PREVISÃO DE GANHOS TANGÍVEIS E INTANGÍVEIS	28
TABELA 7 - MATRIZ GUT	36
TABELA 8 - TABELA DOS 5 PORQUÊS	37
TABELA 9 - PLANOS DE AÇÕES 5W2H	41

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVO	10
1.2.	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	10
1.3.	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	11
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1.	DMAIC	12
2.2.	LEAN SEIS SIGMA.....	14
2.3.	ENGENHARIA DA MANUTENÇÃO	16
2.4.	MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE.....	17
2.5.	FERRAMENTAS DA QUALIDADE.....	19
2.6.	HIPÓTESE NULA E HIPÓTESE ALTERNATIVA	20
2.7.	5W2H.....	21
2.8.	CAPACIDADE DO PROCESSO.....	23
2.9.	FROTA 793F CATERPILLAR	24
3.	DISCUSSÕES E RESULTADOS	26
3.1.	DEFINE	26
3.1.1.	Definição do processo a ser melhorado	26
3.1.2.	Definição da base de dados.....	26
3.1.3.	Previsão dos ganhos	28
3.2.	MESURE	28
3.2.1.	Mapeamento do processo.....	28
3.2.2.	Mensuração da meta geral do projeto	29
3.2.2.1.	<i>Mensuração das metas específicas para o projeto</i>	30
3.2.3.	Mensuração da capacidade do processo.....	32

3.3.	ANALYSE.....	33
3.3.1.	Análise das possíveis causas do problema.....	33
3.3.2.	Análise das causas levantadas.....	34
3.3.3.	Análise das causas raízes	37
3.4.	IMPROVE.....	38
3.4.1.	Levantamento das ações para bloquear as causas raízes.....	38
3.4.2.	Planejamento e execução das ações para bloquear as causas raízes.....	40
3.5.	CONTROL.....	41
3.5.1.	Comparação dos resultados com a meta	41
3.5.2.	Nova capacidade do processo para comprovação da melhoria significativa	43
3.5.3.	Apresentação dos ganhos	44
3.5.3.1.	<i>Redução da variabilidade dos eventos</i>	44
3.5.3.2.	<i>Ganho em MTBF e MTTR</i>	44
3.5.4.	Padronização da solução	46
4.	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A - CARTA ACEITE PARA CONFIABILIDADE E UTILIZAÇÃO DOS DADOS PARA FINS EXCLUSIVOS ACADÊMICOS	10

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVO

O objetivo central deste documento é observar como a abordagem Lean Seis Sigma oferece benefícios significativos à engenharia de manutenção, particularmente quando aplicada aos desafios enfrentados na manutenção dos caminhões de mineração. O Lean Seis Sigma é uma metodologia conhecida por sua capacidade de reduzir a quantidade de eventos não desejados nos processos e promover a excelência operacional.

No contexto dos caminhões de mineração, a aplicação do Lean Seis Sigma é de extrema relevância. A análise de dados revelou um aumento nas ocorrências não programadas no sistema elétrico da frota 793F, impactando adversamente as metas da empresa. Com isso, a metodologia Lean Seis Sigma entra em ação, utilizando o modelo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) para abordar os desafios de maneira eficiente e consistente.

Além disso, será possível analisar que a abordagem Lean Seis Sigma, com seu modelo DMAIC, oferece um roteiro abrangente e comprovado para abordar os desafios enfrentados, em especial, na manutenção de caminhões de mineração. Visto que, ao aplicar essa metodologia, neste estudo de caso, a engenharia de manutenção tem a oportunidade de reduzir drasticamente as ocorrências não programadas no sistema elétrico, resultando em um aumento significativo na eficiência operacional e na realização das metas da empresa. A análise aprofundada, as melhorias estratégicas e a monitorização contínua são elementos-chave dessa abordagem, garantindo um ambiente mais confiável e produtivo para a indústria de mineração.

Por fim, na monografia será possível analisar que a engenharia da manutenção desempenha um papel fundamental na identificação de potenciais problemas elétricos, no desenvolvimento de planos de manutenção preventiva e na especificação de melhorias nos sistemas elétricos. Eles trazem conhecimento técnico especializado e insights que podem prever e evitar falhas elétricas.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os caminhões de grande porte são veículos essenciais para o setor de mineração, utilizados para transportar grandes quantidades de minérios, rochas e outros. Esses caminhões são projetados para suportar cargas pesadas e condições adversas, como terrenos acidentados, inclinações acentuadas e temperaturas extremas. Eles podem ter aptidão de suporte que variam de dezenas a centenas de toneladas, e são movidos por motores de alta potência, que garantem

a sua eficiência e produtividade. O uso de caminhões de grande porte na mineração garante a rentabilidade e eficiência das operações de mineração, permitindo o transporte rápido e seguro dos materiais extraídos da mina. Esses veículos possuem diversos sistemas e unidades funcionais, por exemplo, mecânico, lubrificação, elétrico, hidráulico etc.

Para evitar essas falhas são aplicados os conhecimentos da engenharia de manutenção. A engenharia da manutenção é uma das áreas da engenharia, juntamente com a engenharia da confiabilidade, que se fundamenta em conhecimentos da engenharia mecânica, eletrotécnica, eletroeletrônica, elétrica e outros campos afins, de modo que esta área da engenharia visa garantir a maior DF e MTBF dos equipamentos.

1.3. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com a engenharia da manutenção em conjunto com a engenharia da confiabilidade, há um melhor desenvolvimento de estratégias para alcançar os resultados desejados. Isso envolve a avaliação das propriedades dos dispositivos, a determinação dos principais modos de deficiência e a implementação de abordagens de uma gestão de manutenção estratégica, podendo levar em conta aspectos econômicos, tais como os gastos com manutenção e os efeitos das interrupções, a fim de tomar decisões eficazes.

Com isso, é possível otimizar os custos o que é, frequentemente, o principal objetivo da manutenção e diz respeito aos custos dos equipamentos, à mão-de-obra e à perda de produção; a disponibilidade física para operação dos equipamentos; a segurança, pois a integridade dos dispositivos constitui um aspecto crucial para a operacionalidade eficiente e eficaz de qualquer sistema ou procedimento visto que a mineração é um local de criticidade nível 4, ou sejam risco eminente de morte. Com isso, os equipamentos seguros asseguram que os operadores possam desempenhar suas funções com segurança e serenidade, sem receio de sofrer danos ou se envolver em incidentes indesejados.

Nesse contexto, por meio de uma análise de dados, referente a um ano, foi possível confirmar, estaticamente, que as ocorrências semanais não programadas do sistema elétrico da frota 793F, apresentam uma tendência de alta. Essas ocorrências corretivas impactam, diretamente, em todo o processo de beneficiamento do minério, pois resulta em uma baixa DF dos equipamentos, de modo que torna mais complexo atingir todas as metas da empresa.

Tabela 1 - Tabela das principais consequências da não implementação do projeto

DIMENSÕES	POTENCIAIS CONSEQUÊNCIAS
QUALIDADE	Perda da qualidade/confiabilidade do processo de manutenção, resultando em uma baixa DF, UF e,consequentemente RO (rendimento operacional). Assim como, uma diminuição do indicador do MTBF.
CUSTOS	Aumento dos custos demanutenção;
ATENDIMENTO A CLIENTES	Dificuldade em atender todo o planode lavra da unidade. Equipe da operação terá maiordificuldade de realizar suas demandas. Equipe da manutenção irá focar em atividades recorrentes, impossibilitando, medir esforços emmelhoria contínua.
MORAL DA EQUIPE	Equipamentos com defeitos recorrentes poderão “ser deixados de lado” deixando a equipe ociosa;
SAÚDE, SEGURANÇA E MEIOAMBIENTE	Maior probabilidade de o equipamento apresentar uma ocorrência corretiva durante a operação. Pois tais ocorrências aumenta, o risco de acidente operacional, tanto com equipamentos, quanto com os colaboradores.

Fonte: Autoria própria

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho em questão será conduzido através da metodologia Lean Seis Sigma, seguindo o modelo sistemático DMAIC. Essa abordagem robusta e comprovada combina as principais características do Lean, focando na eficiência dos processos, com os princípios analíticos e de melhoria contínua do Seis Sigma. O DMAIC, que significa Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, oferece uma estrutura sólida para enfrentar desafios complexos e alcançar resultados consistentes. (WERKEMA, 2012)

2. REFERENCIAL TEÓRICO

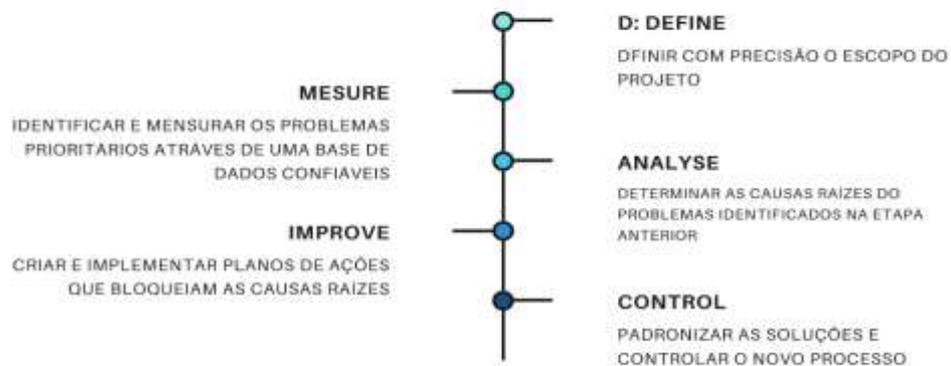
2.1. DMAIC

O DMAIC é uma metodologia amplamente usada para aprimorar a qualidade e o processo. Geralmente, está associado a atividades do Seis Sigma, e quase todas as implementações do Seis Sigma aplicam o processo DMAIC para gerenciar e concluir projetos.

As letras DMAIC representam os cinco passos: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar. Os projetos são uma parte essencial da melhoria da qualidade e do processo. A seleção, o gerenciamento e o sucesso na conclusão de projetos são fundamentais para estabelecer qualquer esforço sistemático de melhoria do negócio. (MONTGOMERY, 2016)

A configuração DMAIC encoraja a concepção criativa acerca da questão e sua resolução no âmbito da descrição do item primordial, procedimento ou prestação. Quando a operação está operando tão deficientemente que é imperativo abandonar o procedimento original e começar novamente, ou quando é decidido que é necessário criar um novo item ou prestação, utiliza-se o DMAIC. Uma das justificativas para o sucesso notável do DMAIC é sua concentração na utilização eficaz de um conjunto relativamente reduzido de instrumentos, tais como representação gráfica do procedimento, gráfico de controle, gráfico de frequência, etc. (MONTGOMERY, 2016)

Figura 1 - Macrofases do processo DMAIC



Fonte: Adaptado WERKEMA, 2012

Tabela 2 - Macro etapas do DMAIC e suas principais atividades

ETAPA	PRINCIPAIS ATIVIDADES	FERRAMENTAS AUXILIARES
DEFINE	Identificação do problema, Oportunidade de melhoria, equipe do projeto, escopo do projeto, retornos tangíveis e intangíveis	Mapa de raciocínio, carta de controle, histograma, SIPOC, Project charter etc.
MESURE	Definição clara: Base de dados confiável do problema, estratificação do problema, meta principal e metas secundárias	Pareto, folha de verificação, boxplot, histograma, estratificação etc.
ANALYSE	Causas potenciais do problema, novo mapa do processo, causas raízes do problema	6M, mapa do processo, matriz GUT, 5 Porquês etc.
IMPROVE	Planejar e executar ações que bloqueiem as causas raízes do problema	5W2H, diagrama de afinidades, etc.
CONTROL	Avaliar novo processo, controlar as metas alcançadas, padronizar as ações executadas na etapa anterior, coletar os ganhos tangíveis e intangíveis	Carta de controle, capacidade do processo, etc.

Fonte: Adaptado WERKEMA, 2012

2.2. LEAN SEIS SIGMA

Apesar de o Lean e o Seis Sigma possuírem metodologias distintas, frequentemente eles se complementam em iniciativas de aprimoramento contínuo. O Lean disponibiliza as instrumentações e conceitos para detectar e eliminar ineficiências. (WERKEMA, 2011)

A meta primordial do Lean consiste em maximizar o fluxo de valor, identificando e eliminando atividades que não acrescentam valor ao resultado final do produto ou serviço. Isso é obtido por meio de métodos como a identificação e redução de resíduos, a adoção de fluxo contínuo e a busca por níveis equilibrados de produção. O Lean focaliza a obtenção de eficiência operacional, melhoria da qualidade e maior agilidade na entrega. (DENNIS, 2011)

Tabela 3 - Desperdícios Lean manufacturing

DESPERDÍCIO	COMO IDENTIFICÁ-LO
Movimento	Quando há um movimento desnecessário
Espera	Quando um maquinário e/ou operador está parado por algum motivo
Transporte	Quando há um transporte desnecessário de algum item
Excesso de processamento	Quando há execução de atividades desnecessárias
Excesso de produção	Quando há a produção desnecessária de materiais
Estoque	Quando há armazenamento excessivo de materiais
Retrabalho	Reprodução de itens defeituosos
Intelectual	Quando não há uma interface adequada entre o colaborador e a linha de produção

Fonte: Adaptado DENNIS, 2011

Por outro lado, o Seis Sigma representa uma abordagem cujo principal objetivo é reduzir a variabilidade e aprimorar a qualidade dos processos, fundamentando-se na análise de dados e na aplicação de métodos estatísticos. A ênfase central do Seis Sigma está na busca por resultados consistentes e previsíveis, mediante a redução de falhas e o aperfeiçoamento do desempenho do processo. (ANDRIETTA; MIGUEL, 2002)

Além disso, de acordo DIAS, 2011, o Lean Seis Sigma tem abordagens metodológicas com foco evidente em resultados e metas estratégicas têm exibido conquistas mensuráveis em diversas áreas, incluindo qualidade, custos e métricas de eficácia relevantes em diversos setores. Enquanto esses benefícios são, por si só, valiosos, tornam-se ainda mais cruciais à luz do cenário econômico global atual, rapidamente transformando-se em necessidades urgentes.

O Seis Sigma pode ser utilizado e adequado para diversas categorias de empresas, dado que se apresenta como uma estratégia gerencial voltada para aprimorar o rendimento

empresarial, sendo reconhecida como uma necessidade global para todas as instituições. Vale ressaltar que o efeito mais significativo do Seis Sigma será percebido na diminuição da diversidade identificada nos processos internos repetitivos e na formulação de novos itens e métodos. (PALADINI, 2019)

A convergência entre a Manufatura Enxuta (Lean Manufacturing) e o Seis Sigma ocorre de maneira orgânica: a empresa é capaz - e recomendada - a explorar as vantagens de ambas as abordagens. Por exemplo, o Lean Manufacturing carece de um método estruturado e aprofundado para a resolução de desafios e de ferramentas estatísticas para lidar com a variabilidade, um aspecto que pode ser suplementado pelo Seis Sigma. Por outro lado, o Seis Sigma não coloca ênfase na otimização da velocidade dos procedimentos e na redução do lead time, elementos que constituem o cerne da Manufatura Enxuta. (WERKEMA, 2011)

O A união derivada da combinação entre o Seis Sigma e a Manufatura Enxuta, através da integração das capacidades inerentes a ambas, é conhecida como Lean Seis Sigma. Esse modelo abrangente, resistente e eficiente supera individualmente cada um dos elementos, sendo apropriado para abordar uma ampla variedade de obstáculos ligados à aprimoração de procedimentos e itens. (POUND; BELL; SPEARMAN, 2015)

Figura 2 - Integração entre Lean e Seis Sigma



Fonte: Adaptado WERKEMA, 2011

2.3. ENGENHARIA DA MANUTENÇÃO

De acordo com (Gregório, Santos e Prata, 2018), o termo manutenção foi cunhado aproximadamente no século XVI, na região central da Europa, no contexto do aparecimento do relógio mecânico e dos profissionais especializados em sua montagem e reparo. A Revolução Industrial, ocorrida no final do século XIX, intensificou a demanda por esse campo.

Os impactos significativos da Segunda Guerra Mundial, com suas consequências devastadoras, principalmente na Europa e no Japão, impulsionaram a necessidade da engenharia de manutenção como um processo indispensável para a economia industrial. (GREGÓRIO; SANTOS; PRATA, 2018)

Nesse contexto, as ações de manutenção têm por objetivo prevenir o declínio dos equipamentos e das infraestruturas, resultante do desgaste inerente e da utilização contínua. Essa deterioração assume variadas manifestações, desde a deterioração estética dos equipamentos até a diminuição do rendimento e interrupções na produção, culminando na fabricação de itens de qualidade insatisfatória e na contaminação do meio ambiente. (XENOS, 1998)

Para Gregório, Santos e Prata, 2018, existem ao menos três tipos básicos de manutenção que consegue englobar todas as atividades de um plano de manutenção:

- I. Manutenção corretiva: É uma manutenção que é realizada quando ocorre a falha ou por ser realizada de maneira programada, de modo que é uma manutenção emergencial. GREGÓRIO; SANTOS; PRATA, 2018
- II. Manutenção preventiva: É uma manutenção que pode ser realizada de maneira sistemática em intervalos de tempo pré-definidos (horas operando, dias, meses etc.), de tal forma que é uma manutenção de reparo antes da falha. GREGÓRIO; SANTOS; PRATA, 2018.
- III. Manutenção preditiva: É uma manutenção que monitora o componente e/ou equipamento, baseado em parâmetros pré-estabelecidos, para que possa realizar as ações necessárias antes que ocorra uma falha não programada, de tal maneira que é uma manutenção baseada em condições pré-estabelecidas. GREGÓRIO; SANTOS; PRATA, 2018

2.4. MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

De acordo com FOGLIATTO; DUARTE, 2009 a MCC pode ser definida como um sistema que reúne várias abordagens de engenharia com o intuito de assegurar que os elementos de uma instalação fabril persistam executando suas funções predefinidas. Devido à sua metodologia lógica e bem estruturada, os planos de MCC têm sido reconhecidos como o método de maior eficácia para enfrentar as preocupações relativas à manutenção. Eles possibilitam que as empresas alcancem padrões de excelência nas práticas de conservação, incrementando a

disponibilidade dos dispositivos e reduzindo os custos vinculados a incidentes, falhas, reparos e trocas.

Além do mais, de maneira ampla, a confiabilidade está associada ao correto desempenho de um produto ou sistema, sem ocorrência de interrupções ou defeitos. Nesse contexto, a confiabilidade, denotada por $R(t)$, expressa a habilidade de um elemento em executar de maneira adequada uma tarefa exigida dentro de condições definidas ao longo de um determinado período, caracterizando-se, portanto, como uma probabilidade. (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018)

Nesse sentido, para aprofundar a compreensão da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), é fundamental elucidar conceitos-chave, como a disponibilidade física de um equipamento para operação e o tempo médio entre reparos, além de abordar detalhadamente o método de cálculo associado a cada um desses indicadores. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

Tabela 4 - Indicadores fundamentais da MCC

Sigla	Definição	Cálculo
MTBF	De origem da língua inglesa (<i>Mean Time Between Failures</i>) tempo médio entre falha	$\frac{\text{Somatório das horas operando}}{\text{Quantidade de paradas para manutenção corretiva}}$
MTTR	De origem da língua inglesa (<i>Mean Time To Repair</i>) é a média aritmética dos tempos de reparo	$\frac{\text{Somatório do tempo de reparo}}{\text{Quantidade de reparos}}$
DF	Disponibilidade física de um equipamento para exercer sua função	$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$

Fonte: Adaptado GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018

Para que a MCC possa ser executada com êxito deve-se seguir alguns princípios fundamentais, de acordo com o FOGLIATTO; DUARTE, 2009, estes princípios são:

- I. Engenharia simultânea com uma equipe multidisciplinar composta pela engenharia, operação, planejamento e execução.
- II. Análise aprofundada em relação às consequências de uma falha.
- III. Estudo amplo em relação à segurança, meio ambiente, operação, execução e custos
- IV. Foco nas ações voltadas tanto para manutenção preventiva, quanto para manutenção preditiva
- V. Eliminação das causas raízes das falhas que diminuem a confiabilidade do sistema.

2.5. FERRAMENTAS DA QUALIDADE

As ferramentas de excelência são um ponto de partida inicial para aprimorar a rentabilidade do procedimento, através da otimização das atividades e da minimização de ineficiências e falhas, resultando em produtos ou serviços de maior valor para os clientes e, conseqüentemente, fortalecendo a competitividade da organização no mercado. (LOBO, 2020)

Com isso, a busca pela excelência e o aprimoramento dos procedimentos não podem ser ações isoladas e esporádicas, mas sim devem estar integradas e ocorrer de forma constante. A contínua necessidade de aprimoramento traz à tona o conceito de melhoria contínua, um dos mais importantes no âmbito da excelência. (ROCHA; BARRETO; AFONSO, 2017)

Nesse sentido, para auxílio em busca da excelência operacional, temos:

Diagrama de Pareto: O princípio de Pareto é reconhecido pela relação 80/20, o que significa que 80% dos problemas derivam de 20% das possíveis causas. O gráfico em questão é um diagrama de barras que organiza os dados de um problema em termos de relevância, a fim de determinar quais ações corretivas devem ser priorizadas. (BRITTO, 2016)

Boxplot: É uma forma gráfica que oferece uma visão sucinta e visual da distribuição de um conjunto de dados. O diagrama é composto por um retângulo que abrange o intervalo interquartil (IQR), representando o segundo e o terceiro quartis dos dados, ou seja, o percentil 25 (Q1) e o percentil 75 (Q3). (MONTGOMERY, 2016)

CEP: Envolve um sistema de inspeção por meio de amostragem, que é empregado ao longo da execução do processo. Seu propósito é identificar variações que possam impactar adversamente ou prejudicar o curso adequado do processo e seus resultados. (LOZADA, 2017)

Diagrama de dispersão: É empregado para analisar a potencial relação entre duas variáveis, investigando uma possível conexão entre causa e efeito. Contudo, ele não confirma que uma variável cause impacto na outra, mas sim esclarece se uma relação está presente e em que grau. Esse gráfico é composto por um eixo horizontal, que representa os valores medidos de uma variável, e um eixo vertical, que representa as medições da segunda variável. (BRITTO, 2016)

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. (BALDAN *et al.*, 2014)

Matriz Esforço x Impacto: A Matriz de Esforço x 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. (COUTINHO, 2019)

Matriz GUT: A matriz GUT é uma ferramenta de análise e tomada de decisão utilizada no gerenciamento de projetos e resolução de problemas. "GUT" é um acrônimo que representa três critérios-chave que são considerados ao avaliar e priorizar diferentes questões ou situações: Gravidade (Impacto geral do problema), Urgência (O quão imediatamente o problema deve ser resolvido) e Tendência (Possibilidade do problema se agravar com o tempo). Além disso, cada problema é avaliado em uma escala de 1 a 5 e com isso é feito uma multiplicação de modo que os problemas com maiores pontuações serão priorizados. (NAPOLEÃO, 2019)

Diagrama de Ishikawa: É uma poderosa ferramenta visual que tem como objetivo identificar as causas que levam a um problema específico. Baseia-se em maquinário, meio ambiente, material, medição, mão de obra e metodologia, com isso em cada ambiente mapeado lista-se as causas que estão presentes e que levam ao determinado problema listado. (MONTGOMERY, 2016)

2.6. HIPÓTESE NULA E HIPÓTESE ALTERNATIVA

De acordo com CARPINETTI, 2016 a hipótese nula e a hipótese alternativa são dois conceitos fundamentais na estatística, frequentemente usados para testar teorias ou realizar análises de dados.

A hipótese nula (H_0) é uma afirmação inicial que assume que não há efeito, diferença ou relação entre variáveis de interesse. Em uma distribuição normal, a hipótese nula pode afirmar, por exemplo, que a média da distribuição é igual a um valor específico ou que não há diferença significativa entre as médias de duas populações. (MONTGOMERY, 2016)

Por outro lado, a hipótese alternativa (H_1) é a afirmação que contradiz a hipótese na distribuição normal, a hipótese alternativa pode afirmar que a média da distribuição é maior, menor ou diferente de um valor específico, ou ainda que as médias de duas populações são diferentes de forma estatisticamente significativa. (MONTGOMERY, 2016)

Desta forma, o valor p (p-value) é um resultado crucial em testes de hipóteses estatísticas. Ele fornece uma medida da evidência estatística contra a hipótese nula. O valor p representa a probabilidade de observar os resultados de seu estudo (ou algo mais extremo) se a hipótese nula fosse verdadeira. Quanto menor o valor p, mais evidência você tem contra a hipótese nula. (MONTGOMERY, 2016). Com isso, temos:

- I. Se o valor p for pequeno (geralmente menor do que um limite pré-definido, como 0,05), isso indica que os resultados são improváveis de ocorrer sob a hipótese nula. Portanto, pode rejeitar a hipótese nula em favor da hipótese alternativa. (MONTGOMERY, 2016)
- II. Se o valor p for grande (geralmente maior que 0,05), isso sugere que os resultados são plausíveis de ocorrer sob a hipótese nula. Nesse caso, não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula. (MONTGOMERY, 2016)

2.7. 5W2H

De acordo com LOBO; LIMEIRA; MARQUES, 2015 a metodologia 5W2H tem como intenção facilitar a identificação das variáveis presentes em um processo, suas origens e o alvo a ser alcançado. Esse método garante a abordagem abrangente de todos os ângulos relevantes. O termo deriva do idioma inglês, com as letras W e H representando as iniciais das palavras interrogativas "what, who, where, when, why, how e how much" (em português: o quê, quem, onde, quando, por quê, como e quanto).

De acordo com SOUZA, 2018 a metodologia 5W2H configura-se como um registro meticulosamente estruturado, destinado a delinear as ações e responsabilidades daqueles encarregados da execução. Este método se vale de um processo de questionamento que oferece

diretrizes para as múltiplas ações que estão para ser empreendidas. Dado que se trata de um documento organizado, ele assume a tarefa de identificar tanto as ações como os responsáveis por sua realização, através de um conjunto de ações orientadoras, de modo que mostra ser uma ótima ferramenta na busca constante pela melhoria contínua.

Ao responder de maneira clara e concisa às sete perguntas, gestores e equipes de projetos desenvolvem uma compreensão completa e detalhada de todas as etapas essenciais para a realização do empreendimento. A metodologia 5W2H simplifica a visão global do projeto e aumenta as chances de êxito, ao estabelecer um alicerce sólido para a tomada de decisões, a identificação de riscos e um controle eficiente dos prazos e dos recursos financeiros. (VERGARA,2006)

Tabela 5 - Utilização do 5W2H

Pergunta conforme a letra	Pergunta central	Pergunta auxiliar
W- <i>What</i> (O quê?)	O que devo fazer?	O que devo utilizar para executar a tarefa? O que a tarefa envolve?
W- <i>Why</i> (Por quê?)	Por que essa ação é necessária?	Quais são as vantagens da execução dessa ação?
W- <i>Where</i> (Onde?)	Onde a ação será conduzida?	Onde estão os recursos para a execução desta ação?
W- <i>When?</i> (Quando?)	Quando essa ação será implementada?	Qual será a frequência da execução dessa ação?
W- <i>Who?</i> (Quem?)	Quem será o responsável por essa ação?	Quantos departamentos estão ligados à essa ação? Quem deve verificar se a ação está sendo implementada de maneira correta?
H- <i>How</i> (Como?)	Como a ação será executada?	Como conduzir e acompanhar a ação?
H- <i>How Much</i> (Quanto?)	Quanto a ação irá custar?	Onde conseguir o apoio financeiro necessário para executar a ação?

2.8. CAPACIDADE DO PROCESSO

De acordo com, CARPINETTI, 2016 a avaliação de capacidade de processo envolve principalmente a análise estatística de espalhamento dos resultados de um procedimento em relação a um valor central, bem como a comparação desse grau de variação com o limite máximo aceitável estabelecido para um determinado critério de excelência ligado a esse processo.

Além disso, os estudos de aptidão de processo desempenham um papel essencial no planejamento e na gestão da qualidade durante a etapa de desenvolvimento e certificação de processos de manufatura. Eles oferecem informações cruciais para assegurar a uniformidade e a excelência do processo CARPINETTI, 2016. Algumas das áreas fundamentais abordadas por esses estudos incluem:

- I. Conformidade do Processo: Os estudos de aptidão de processo avaliam se o processo é capaz de fabricar produtos dentro das especificações desejadas. Isso auxilia na determinação se o processo atende aos padrões de qualidade estipulados e se é adequado para produção em grande escala. (CARPINETTI, 2016)
- II. Ajustes e Redução da Variação: Os resultados dos estudos de aptidão podem indicar a necessidade de realizar ajustes no processo para diminuir a variação. Isso é crucial para minimizar falhas e irregularidades nos produtos, elevando a confiabilidade e uniformidade. (CARPINETTI, 2016.)
- III. Desempenho Requisitado: Ao analisar a aptidão de um processo, os dados obtidos podem sugerir se o desempenho atual do processo está em linha com os critérios de qualidade definidos. Isso auxilia na identificação de áreas que necessitam de aprimoramento para alcançar os padrões desejados. (CARPINETTI, 2016.)
- IV. Intervalo de Amostragem para Controle Estatístico: A partir dos estudos de aptidão, é viável determinar o intervalo de amostragem mais adequado para o controle estatístico do processo. Isso engloba definir a quantidade e frequência com que as amostras devem ser coletadas e examinadas para monitorar o processo ao longo do tempo. (CARPINETTI, 2016.)

Existem dois indicadores para a capacidade do processo, a capacidade potencial (C_p) e a capacidade efetiva (C_{pk}). MONTGOMERY, 2016. Com isso, é possível afirmar que quanto maior o índice (C_{pk}), mais alta é a qualidade do processo. (CARPINETTI, 2016)

O índice Cp é calculado da seguinte maneira, MONTGOMERY, 2016

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

O índice C_{pk} é calculado da seguinte maneira, MONTGOMERY, 2016

$$Cpk = \text{Min} \left[\frac{LSE - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right]$$

Sendo:

LSE= Limite Inferior de Especificação

LIE= Limite Superior de Especificação

μ= Média

σ= Desvio Padrão

2.9. FROTA 793F CATERPILLAR

O veículo de construção 793F é equipado com um motor a diesel C175-16 de 16 cilindros e quatro ciclos. O projeto do motor visa otimizar a eficiência através de tempos de combustão eficazes, o que resulta em um notável aumento de 20% no torque líquido. Isso permite uma aceleração vigorosa e eficaz, tornando possível realizar sobrecargas com eficiência. A transmissão de seis velocidades Cat., que conta com os avançados controles APECS, contribui para uma ampla gama de velocidades operacionais, garantindo a entrega adequada de potência em diversas situações. (CATERPILLAR, 2023)

Quando se trata da segurança e conforto dos operadores, o caminhão 793F passou por melhorias notáveis. Isso inclui a facilitação dos acessos, a inclusão de superfícies antiderrapantes, corrimãos e uma escada diagonal. A cabine foi ergonomicamente projetada para proporcionar uma visibilidade excelente e comandos convenientemente posicionados. Para garantir conforto, recursos como controle automático de temperatura e redução de ruído estão à disposição, além de um assento que pode ser ajustado em altura e apoio para os ombros. (CATERPILLAR, 2023)

O design do caminhão também enfatiza a simplicidade das tarefas de manutenção. Os intervalos entre manutenções foram estendidos, e o acesso a componentes-chave foi simplificado, estando no nível do solo. Recursos como o sistema de Lubrificação Automática,

conectores elétricos selados e outras características foram implementados para facilitar as operações de manutenção. Alternativas como partida elétrica e um Sistema de Filtragem de Óleo Aprimorado foram desenvolvidas para prolongar a vida útil e diminuir a frequência das manutenções. Além disso, um centro de abastecimento rápido opcional e indicadores de desgaste dos freios foram disponibilizados para simplificar a tarefa de manutenção e a supervisão dos componentes. (CATERPILLAR, 2023)

3. DISCUSSÕES E RESULTADOS

3.1. DEFINE

3.1.1. Definição do processo a ser melhorado

Para executar a metodologia, de maneira eficiente, foi inicialmente definido o processo que deve ser melhorado. O DMAIC foi adotado para melhorar o processo de manutenção dos equipamentos de grande porte CAT 793F, visando otimizar a eficiência, reduzir custos e aumentar a confiabilidade dos equipamentos. Ademais, ao otimizar a eficiência dos equipamentos, com a redução das ocorrências elétricas não programadas da frota, será possível criar uma estabilidade no processo de manutenção, reduzindo a variabilidade de incidência destas paradas corretivas.

3.1.2. Definição da base de dados

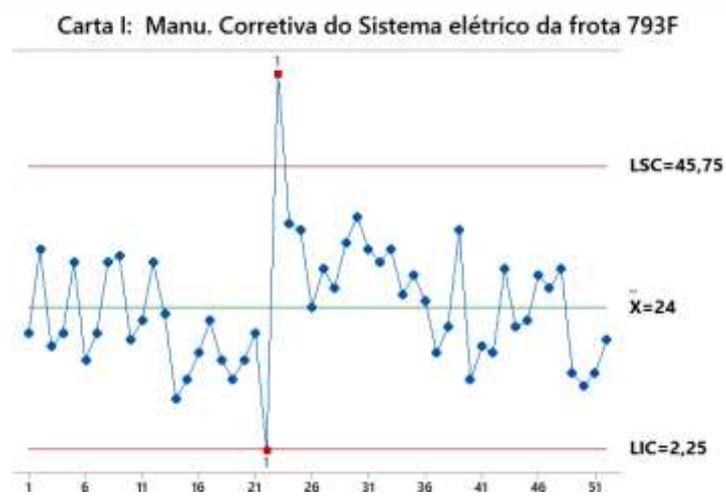
Na etapa do define, foram pegos dados históricos, de modo que a base de dados foi de 10/2021 a 09/2022. Esses dados históricos, foram referentes às ocorrências semanais não programadas do sistema elétrico da frota de caminhões de grande porte, de tal maneira que as semanas se iniciavam no domingo, às 00h e finalizavam no sábado às 23h59.

O propósito foi padronizar a base de dados, para identificar as semanas mais críticas e encontrar as causas dessa criticidade, sendo assim, foi obtido uma base de dados histórica referente a um ano, ou 52 semanas, de ocorrências não programadas do sistema elétrico da frota de transporte de grande porte de equipamentos de mina.

Em relação a confiabilidade dos dados todos os mesmos foram pegos no banco de dados da companhia, na central informação de manutenção, na qual foram obtidas informações relevantes, tais como: Motivo da parada, relato do operador, relato de avaliação e atividades da execução de manutenção exerceram, data e duração da parada, etc.

Dessa forma, foi possível comprovar, através da carta de controle, que há uma grande variabilidade, em relação à média das ocorrências corretivas, da quantidade de ocorrências semanais.

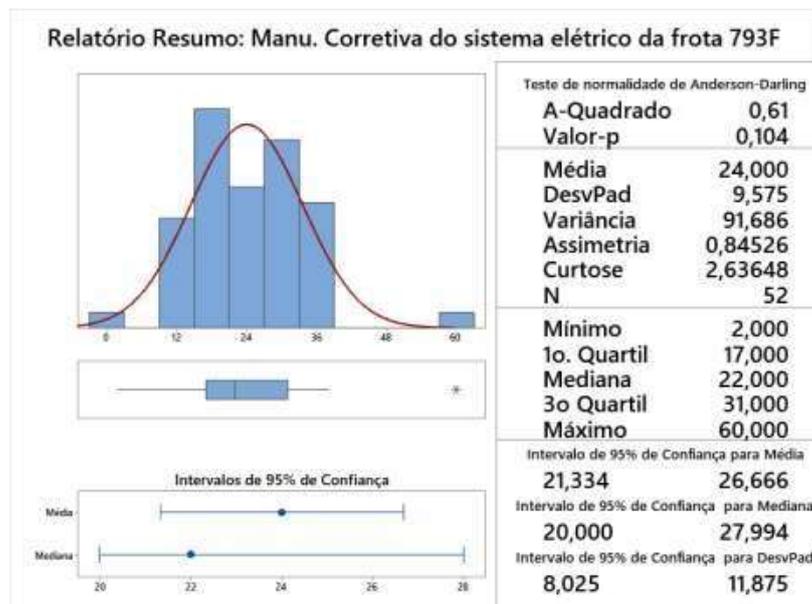
Figura 3 - Carta da quantidade de ocorrências do sistema elétrico da frota 793F



Fonte: Autoria própria

Logo, foi comprovado que é necessário criar planos de ações para estabilizar o processo de manutenção, para que haja a redução dessas ocorrências. Com esses dados, através do software Minitab, foi possível fazer um relatório resumo das análises estatísticas para o processo manutenções corretivas do sistema elétrico da frota.

Figura 4 - Relatório resumo da base de dados das ocorrências do sistema elétrico da frota 793F



Fonte: Autoria própria

Com o relatório resumo, foi possível verificar que o processo segue uma distribuição normal, visto que o Valor-P é maior que 0,05. (MONTGOMERY, 2016)

Além do mais, foi possível ver que a média semanal das manutenções corretivas do sistema elétrico foi de 24 ocorrências e com o desvio padrão de 9,575

3.1.3. Previsão dos ganhos

Através da identificação da melhoria no processo foi possível identificar e prever inúmeros ganhos para o processo de manutenção e, como efeito, para a indústria.

Tabela 6 - Previsão de ganhos tangíveis e intangíveis

Ganhos tangíveis	Ganhos Intangíveis
Aumento da confiabilidade do processo de manutenção: 1,5H de MTBF	Padronização dos processos
Aumento da média de movimentação de material mensalmente 20.000 T	Maior segurança em operação
Redução da variabilidade dos eventos	Redução do Retrabalho

Fonte: Autoria própria

3.2. MASURE

3.2.1. Mapeamento do processo

Com base no mapeamento detalhado do processo de análise de falha do equipamento, tornou-se possível identificar com precisão e realizar uma análise crítica da etapa que se destacava como o principal gargalo, afetando o fluxo do processo como um todo.

Com essas informações em mãos, pôde-se então determinar claramente quais atividades estavam efetivamente contribuindo para a agregação de valor no processo e, de maneira consequente, aprimorar a atividade que estava deixando a desejar, no caso a realização dos testes de falha. Esse direcionamento otimizou a eficiência do processo, refletindo diretamente em ganhos de produtividade e qualidade na execução das análises de falha do equipamento.

Figura 5 - Mapa do processo de identificação da falha corretiva do sistema elétrico



Fonte: Autoria própria

3.2.2. Mensuração da meta geral do projeto

Com base nas análises estatísticas mencionadas anteriormente e utilizando a abordagem do primeiro quartil, visto que, de acordo com MONTGOMERY, 2016, o primeiro quartil ajuda a compreender e identificar os dados com presença de valores baixos. Como a ideia central do projeto a redução das ocorrências corretivas do sistema elétrico, a abordagem do quartil auxiliou a definir a meta geral do projeto, de modo que em conjunto com operação, manutenção, execução e gerência foi estipulado uma redução de 24 para 17 eventos semanais.

Em outras palavras, almeja-se alcançar uma diminuição de no mínimo 30% nos eventos registrados. Essa meta reflete o comprometimento em aprimorar a eficiência e a qualidade do processo, visando uma gestão mais eficaz das ocorrências e, conseqüentemente, contribuindo para a otimização do desempenho geral do sistema.

Figura 6 - Carta de controle com a meta do projeto



Fonte: Autoria própria

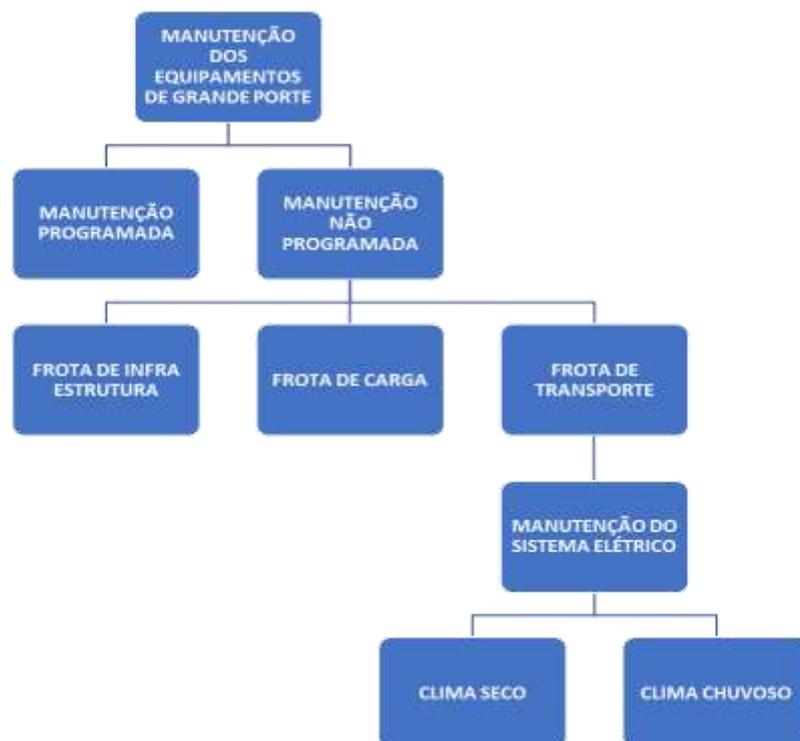
3.2.2.1. Mensuração das metas específicas para o projeto

Para realizar essa fase do projeto, procedeu-se à estratificação das falhas corretivas de acordo com as divisões entre o período seco e chuvoso. Essa distinção foi estabelecida com base nos meses: o período seco englobando os meses de abril a setembro, enquanto o período chuvoso compreendendo de outubro a março.

Essa segmentação foi fundamental devido ao reconhecimento de que as condições climáticas exercem um impacto direto sobre a operação dos equipamentos na mina. Aspectos de segurança, como velocidade, visibilidade e outros fatores relevantes, estão diretamente influenciados pelas circunstâncias climáticas predominantes.

Com isso ao considerar esses elementos, a estratificação das falhas com base nas estações do ano permitirá uma análise mais precisa das ocorrências, levando em consideração os cenários específicos de cada período. Dessa forma, será possível adotar medidas de prevenção e manutenção mais direcionadas, aprimorando a confiabilidade operacional dos equipamentos ao longo de todo o ano.

Figura 7 - Estratificação das falhas por período seco e chuvoso



Fonte: Autoria própria

A estratificação mencionada tem como objetivo principal proporcionar uma visualização e estruturação mais clara do gargalo presente no processo. Com esse propósito em mente, foi conduzido um teste T para os dois subgrupos identificados: período seco e período chuvoso. O objetivo deste teste é determinar se existem médias estatisticamente distintas entre esses dois cenários. (MONTGOMERY, 2016)

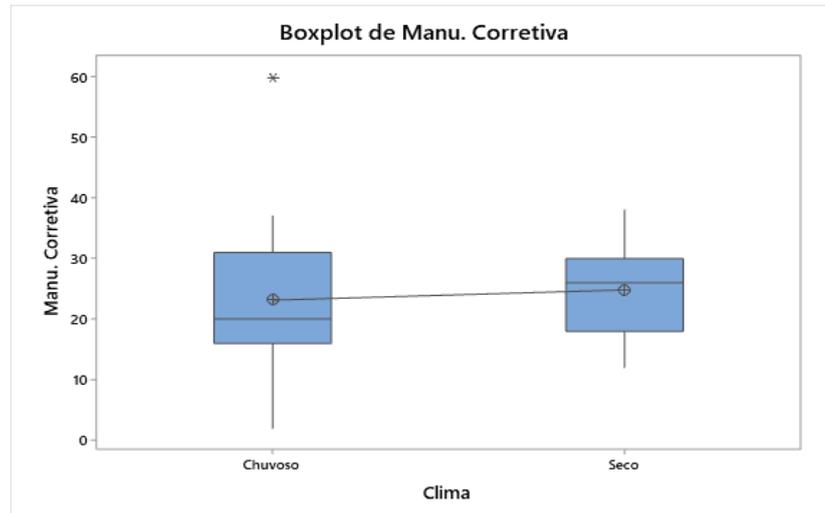
Caso se comprove estatisticamente que as médias das ocorrências de falhas corretivas são de fato diferentes nos períodos seco e chuvoso, isso indicaria que há uma relação significativa entre as condições climáticas e as falhas nos equipamentos. Com base nessa descoberta, seria então necessário realizar uma análise mais aprofundada para compreender as causas subjacentes dessas variações e, assim, desenvolver planos de ação específicos para lidar com os diferentes cenários.

Esses planos de ação podem incluir estratégias adaptadas às condições climáticas de cada período, tais como revisões mais frequentes, ajustes operacionais, manutenções preventivas diferenciadas e outros enfoques que minimizem o impacto das condições climáticas nas falhas dos equipamentos. Em última análise, a análise estatística diferenciada entre os períodos seco e chuvoso permite uma abordagem mais precisa e eficaz na mitigação das falhas e na otimização do desempenho operacional ao longo de todo o ano.

Com base na análise realizada, constatou-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os dois cenários, uma vez que o valor-p (p-value) é maior do que 0,05. Como resultado, a hipótese nula foi adotada, indicando que as médias das ocorrências de falhas corretivas nos períodos seco e chuvoso são estatisticamente equivalentes. (MONTGOMERY, 2016)

Figura 8 - Análise dos subgrupos: Clima Chuvoso e Clima Seco

Estatísticas Descritivas: Manu. Corretiva				Estimativa da diferença		Teste		
Clima	N	Média	DesvPad	EP	IC de 95%	Hipótese nula	H ₀ : $\mu_1 - \mu_2 = 0$	
				Média	para a	Hipótese alternativa	H ₁ : $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
					Diferença	Valor-T	GL	Valor-p
Chuvoso	25	23,1	11,5	2,3				
Seco	27	24,8	7,49	1,4	-1,69 (-7,18; 3,79)	-0,62	40	0,536



Fonte: Autoria própria

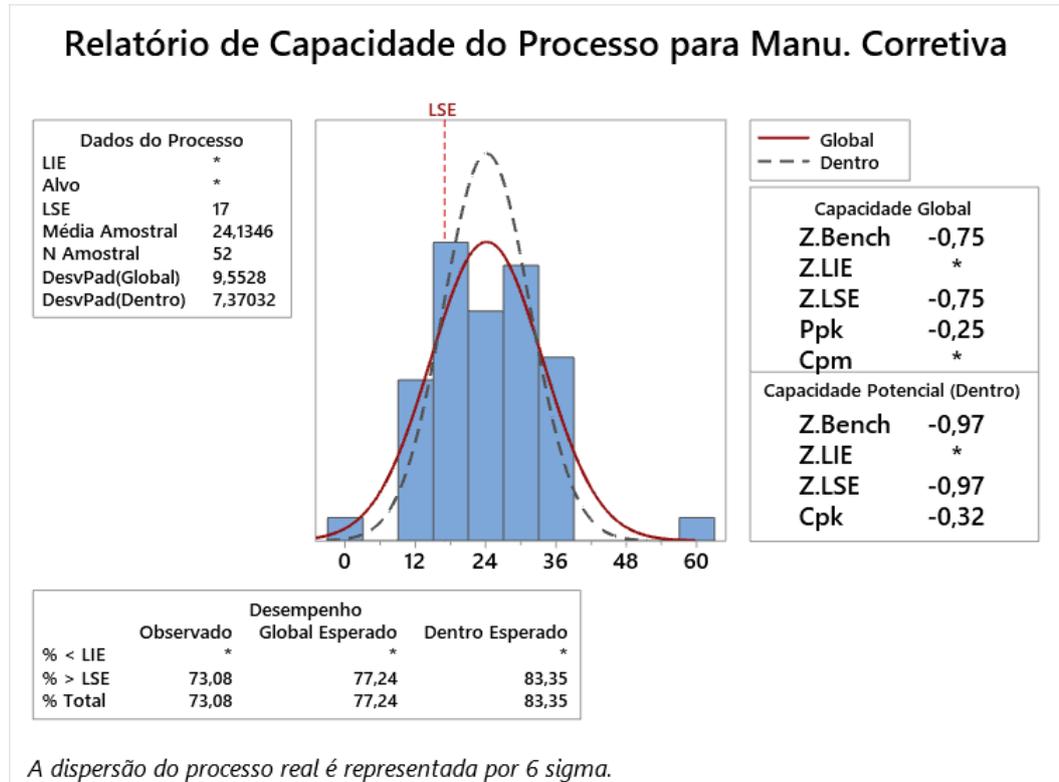
3.2.3. Mensuração da capacidade do processo

Através do relatório de capacidade do processo, constatou-se que o desempenho do processo, representado pelo índice Cpk, está em -0,32 mostrando um processo totalmente incapaz de atingir as metas necessárias (CARPINETTI, 2016). Além disso, observou-se que o nível sigma do processo é de -0,75.

A interpretação desses valores negativos do nível sigma e do índice Cpk, é significativa para avaliar a qualidade e o desempenho do processo em questão (CARPINETTI, 2016). O nível sigma é uma medida que está associada ao desvio padrão do processo e à capacidade do mesmo em atender às especificações definidas. (MONTGOMERY, 2016.)

Nesse contexto, com um nível sigma negativo torna-se evidente que há problemas e/ou falhas presentes no processo, que estão resultando em resultados abaixo do esperado. A análise de capacidade do processo, juntamente com a avaliação do nível sigma, é fundamental para identificar áreas que necessitam de melhorias e para direcionar esforços na otimização do processo, com o objetivo de aumentar a qualidade, reduzir variações e alcançar resultados mais próximos dos padrões desejados. (MONTGOMERY, 2016)

Figura 9 - Relatório da capacidade do processo de manutenções corretivas do sistema elétrico da frota 793F



Fonte: Autoria própria

3.3. ANALYSE

3.3.1. Análise das possíveis causas do problema

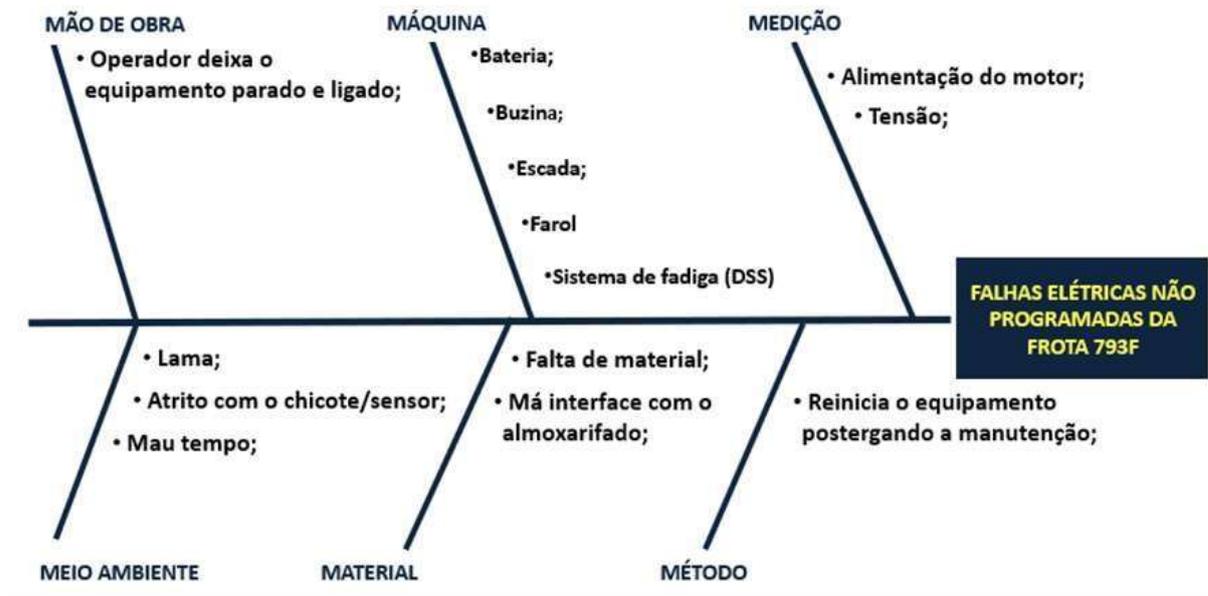
Para realizar esta fase do procedimento, a utilização do diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito, desempenhou um papel fundamental. Esse método desempenhou uma função crucial ao proporcionar uma abordagem sistemática e bem-organizada para a identificação das origens de um problema, abrangendo as várias partes envolvidas e relevantes no contexto. (LOBO, 2020)

Através de reuniões e análises em campo, foi possível empregar o diagrama de Ishikawa para traçar e filtrar as principais causas ligadas à qualidade dos processos, especialmente aquelas relacionadas com as intervenções corretivas em ocorrências elétricas na frota de transporte. Como resultado desse procedimento, foram delimitadas 14 possíveis causas.

Diante desse conjunto de causas, tornou-se necessário estabelecer prioridades para aquelas mais pertinentes à situação. Assim, foi realizado um processo de seleção no qual 7 causas foram eleitas como detentoras de maior relevância e impacto. As causas priorizadas

interligam-se com o maquinário e medição, pois estas contemplam o processo que está sendo melhorado, no caso, a manutenção dos equipamentos de grande porte.

Figura 10 - Diagrama de Ishikawa para as falhas elétricas não programadas da frota 793F



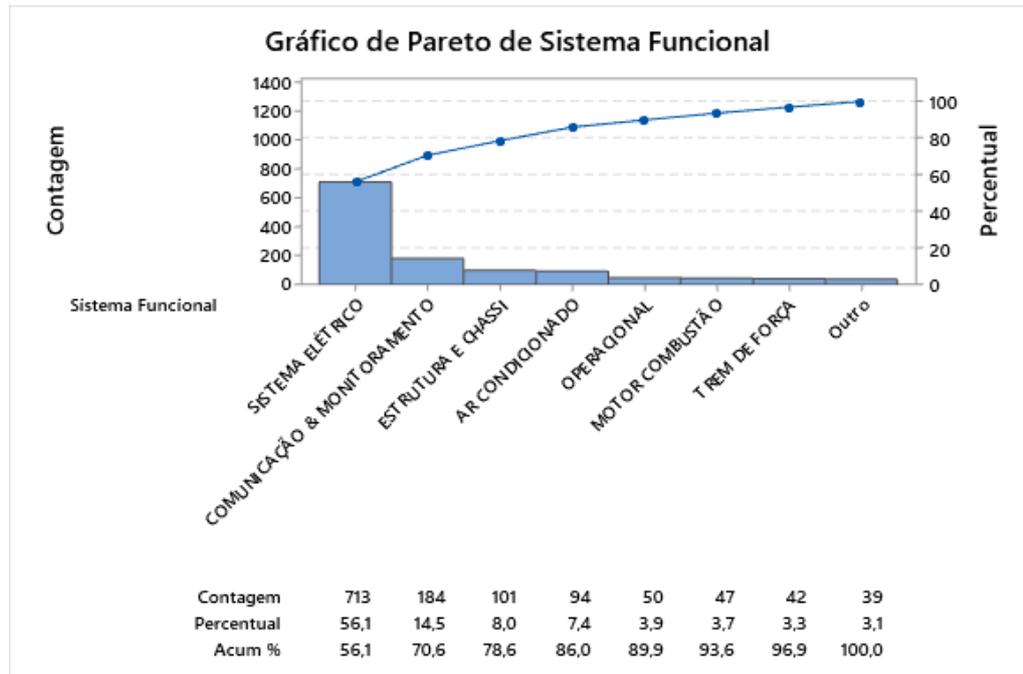
Fonte: Autoria própria

3.3.2. Análise das causas levantadas

Para realizar essa etapa, foi efetuado um processo de compilação dos dados coletados, no sistema da empresa, a fim de obter uma representação visual clara e concisa das causas prioritárias, com isso, elaborou-se um gráfico de Pareto. Foi utilizada essa ferramenta, pois de acordo com BRITTO, 2016 permite identificar e analisar as causas do problema, que foram levantadas e anteriormente priorizadas.

A análise do gráfico de Pareto revelou que as principais causas responsáveis pelas paradas dos equipamentos estão concentradas principalmente nas áreas relacionadas ao sistema elétrico e DSS. Essa identificação é de extrema importância, uma vez que essas causas têm um impacto mais significativo na ocorrência de paradas e falhas nos equipamentos.

Figura 11 - Gráfico de Pareto para causas do problema

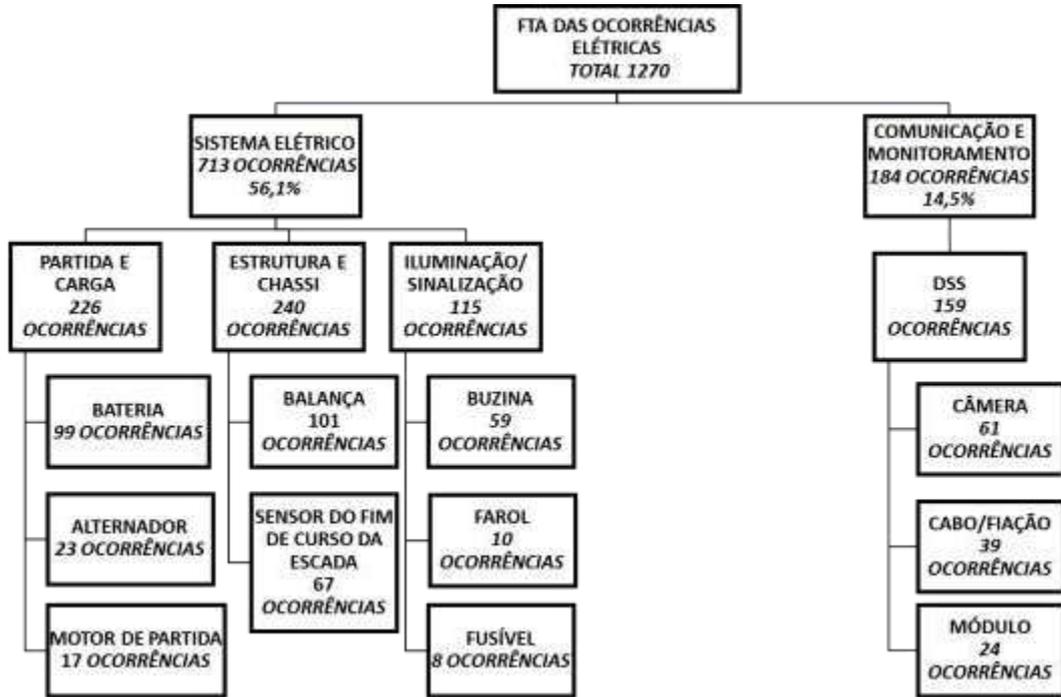


Fonte: Autoria própria

Subsequente, foi feita uma análise das ocorrências, por meio do diagrama de árvore. Nesta etapa, foram analisadas 1270 ocorrências corretivas, conforme a figura 12. Sendo que 713 (56,1%) foram relacionadas para o sistema funcional elétrico, de modo que 226 são relacionadas unidade funcional de partida e carga, 240 para a unidade funcional de estrutura e chassi, e 115 para unidade funcional voltada para sinalização/iluminação e, por consequência os componentes de cada unidade funcional.

Além disso, 184 (14,5%) ocorrências foram voltadas para o sistema funcional de comunicação e monitoramento, e 87% foram voltadas para o DSS. por consequência os componentes da unidade funcional. Com base nessa análise, foi definido que a elaboração e atuação das ações serão com base nos componentes que se correlacionam com as ocorrências elétricas. Além do mais, pode-se concluir com essa análise que bateria e motor partida, farol e fusível assim como, todos os componentes do DSS se correlacionam, ou seja, é possível, criar planos de ações que englobam ambos em sua respectiva categoria.

Figura 12 - Diagrama da árvore para estratificação das ocorrências elétricas da frota 793F



Fonte: Autoria própria

Por fim, nesta macro etapa foi elaborada a matriz GUT (Gravidade x Urgência X Tendência) para os sistemas funcionais. O objetivo foi, fazer a hierarquização, de modo que seja possível auxiliar na categorização dos problemas por meio dos critérios fundamentais: o grau de severidade do impacto (Gravidade), a pressão para resolução imediata (Urgência) e a perspectiva de agravamento caso não sejam abordados (Tendência). NAPOLEÃO, 2019

Logo, com o resultado obtido, as ações que serão priorizadas serão as ações voltadas para bateria/motor de partida, sensor de fim de curso da escada e DSS.

Tabela 7 - Matriz GUT

PROBLEMA	GRAVIDADE	URGÊNCIA	TÊNDENCIA	RESULTADO
Bateria/Motor de partida	5	5	5	125
Sensor de fim de curso da escada.	5	4	5	100
DSS	5	4	5	100
Balança	4	4	3	48
Farol/Fusível	4	4	3	48

Fonte: Autoria própria

3.3.3. Análise das causas raízes

De acordo com OHNO, 1997 é um método simples e eficaz para se chegar à verdadeira causa raiz do problema. Com isso, para descobrir as causas raízes do problema, de tal maneira que seja possível criar soluções eficazes para o gargalo, em vez de apenas tratar os sintomas, e dessa forma, evita-se sua recorrência futura e sendo assim,

Portanto, compreendendo as causas fundamentais, será possível, evitar gastos desnecessários, tais como financeiros e retrabalho. Para isso, foi aplicado a metodologia dos 5 porquês, conforme demonstrado abaixo:

Tabela 8 - Tabela dos 5 Porquês

CAUSA	Bateria/Motor de partida	Sensor de fim de curso da escada	DSS
1º Por que?	Por que o equipamento não está dando partida? R: Descarregamento da bateria.	Por que a escada retrátil não está funcionando? R: Danos no sensor da escada.	Por que o sistema de fadiga está gerando alerta constantes? Falha na imagem dos operadores.
2º Por que?	Por que há descarregamento bateria? R: Baixa tensão da bateria.	Por que há danos no sensor da escada? R: Muitas impurezas no sensor.	Por que há falha nas imagens dos operadores? R: Devido à má fixação da câmera.
3º Por que?	Por que há baixa tensão da bateria? R: O equipamento deve permanecer ligado para a operação ou em condições não favoráveis. (equipamento parado)	Por que impurezas sensor? R: Há brechas caixa proteção e há limpeza mesma. Além disso não há a limpeza da mesma.	Por que há má fixação da câmera do sistema de fadiga? R: Devido à falta de parafusos adequados.
4º Por que?	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.
5º Por que?	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.	Foi encontrada causa raiz no 3º Por quê.
Resultado	Falha na bateria (baixa tensão).	Sensor de fim de curso da escada danificado.	Suporte/fixação Inadequado na câmera.

Fonte: Autoria própria

Figura 13 - Suporte inadequado do DSS



Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Sensor de fim de curso da escada danificado



Fonte: Autoria própria

3.4. IMPROVE

3.4.1. Levantamento das ações para bloquear as causas raízes

Nesta macro etapa do projeto foi criado o diagrama de afinidades, com o intuito de agrupar as causas raízes e, conseqüentemente, elaborar planos de ações eficientes para as causas mapeadas, com base na afinidade de cada um. Com isso, foi possível criar padrões de soluções dentro de um conjunto diversificado de informações, de modo que seja possível criar respostas

que se conectam e auxiliem no desenvolvimento de estratégias ou soluções mais eficazes conectam e auxiliem no desenvolvimento de estratégias ou soluções mais eficazes.

Figura 15 - Diagrama de afinidades



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, nessa subfase do improve, as ações mapeadas e correlacionadas no diagrama de afinidades, foram postas em uma matriz de esforço e impacto, visto que, essa abordagem de priorização auxilia na tomada de decisões informadas e eficientes em diversas áreas de atuação COUTINHO, 2019. Com isso, as atividades que foram priorizadas foram as que têm um alto impacto e um baixo esforço.

Figura 16 - Matriz Esforço x Impacto



Fonte: Autoria própria

Com isso as ações que foram priorizadas foram:

- I. Vedar com borracha as brechas da caixa do sensor de fim de curso de escada
- II. Fixação da câmera com parafusos mais resistentes
- III. Limpeza do sensor de fim de curso nas manutenções preventivas
- IV. Carregamento das baterias

3.4.2. Planejamento e execução das ações para bloquear as causas raízes

Com base nas soluções que foram previamente priorizadas devido ao seu alto potencial para alcançar as metas de redução, foram elaborados e executados planos de ação. Para garantir o sucesso da execução dessas atividades e projetos, foi empregada a metodologia 5W2H, conforme a tabela 9 essa metodologia consiste em responder a sete perguntas fundamentais que guiam a implementação e o acompanhamento das ações, proporcionando clareza, eficiência e controle ao longo de todo o processo. (SOUZA, 2018)

Tabela 9 - Planos de ações 5W2H

O que será feito?	Por que deve ser feito?	Onde será feito?	Quando será feito?	Quem irá fazer?	Como irá ser feito?	Quanto irá custar?
Novos parafusos na câmara do dss	Evitar falhas nas imagens dos operadores	Na oficina central	mar/23	Equipe de execução em conjunto manutenção	Todas as paradas preventivas dos equipamentos	N/d
Carregamento preventivo das baterias dos equipamentos	Prolongar a vida útil do componente	Na oficina central	fev/23	Equipe de execução em conjunto manutenção	Todas as paradas preventivas dos equipamentos	N/d
Limpeza e vedação no sensor de fim de curso da escada retrátil	Impurezas no sensor causam falhas, impossibilitando funcionamento correto da escada	Na oficina central	fev/23	Equipe de execução em conjunto manutenção	Todas as paradas preventivas dos equipamentos	N/d

Fonte: Autoria própria

3.5. CONTROL

3.5.1. Comparação dos resultados com a meta

Para assegurar a obtenção de um processo estável em relação às ocorrências elétricas não programadas, foi estabelecido como critério que a meta definida deve ser alcançada por um período mínimo de três meses consecutivos. Para atingir esse objetivo, uma análise diária das ocorrências corretivas foi realizada, seguida por um monitoramento contínuo e pela aplicação dos planos de ação previamente mapeados.

Nesta fase do projeto, as ocorrências semanais foram categorizadas em três grupos distintos:

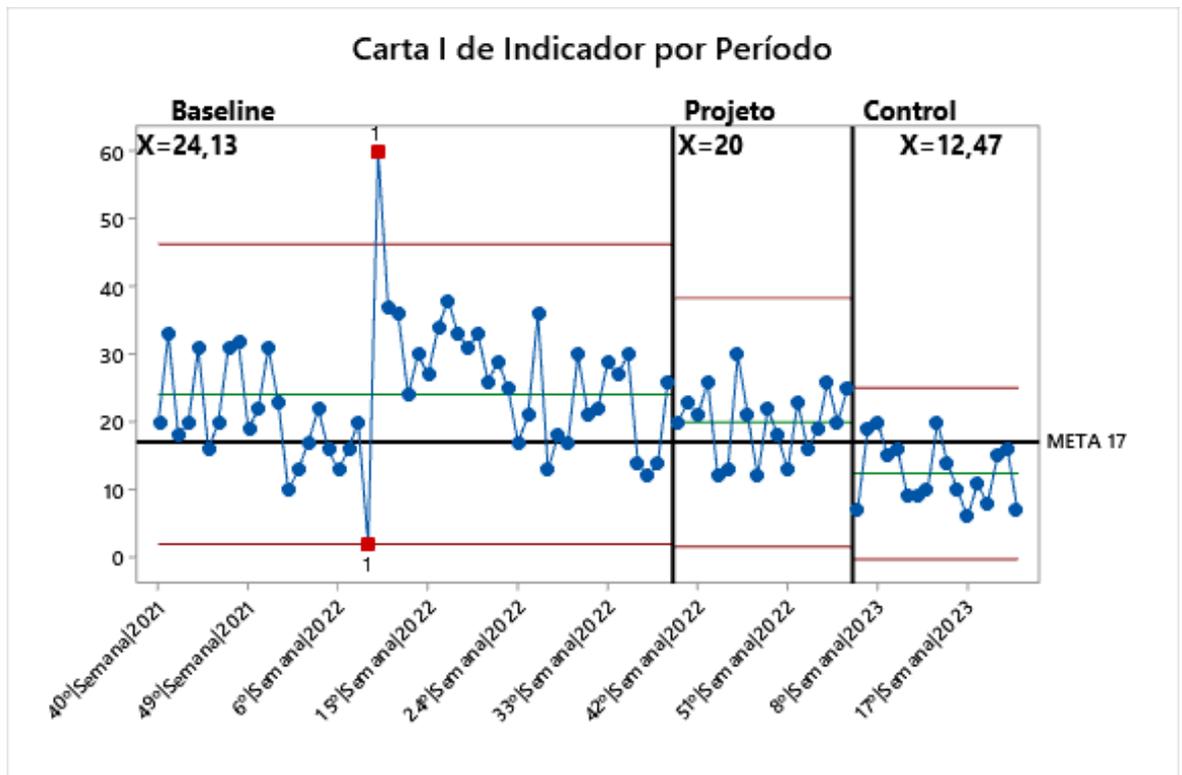
- I. **Baseline (Base de dados):** Representa a linha de base, ou seja, os dados históricos das ocorrências elétricas antes do início das intervenções do projeto.
- II. **Projeto (Improve):** Refere-se ao período em que os planos de ação começaram a ser implementados para melhorar o processo. É o estágio em que as medidas de melhoria são aplicadas.

III. Control: Indica o estágio em que os planos de ação foram executados e estão sob gestão. Nesse ponto, o foco foi em manter a estabilidade alcançada e monitorar qualquer possível desvio.

Esse agrupamento permitiu uma análise comparativa eficaz das ocorrências elétricas não programadas ao longo do tempo e em diferentes fases do projeto. Ao observar a evolução das ocorrências nos três grupos, é possível avaliar o impacto das ações de melhoria implementadas e verificar se a meta de estabilidade foi alcançada e mantida durante os três meses consecutivos, como estabelecido.

Logo, com base nas análises realizadas, torna-se evidente a significativa redução de eventos não programados em um total de 48,32%. Isso resultou em uma redução da média semanal de ocorrências de 24,13 para 12,47, excedendo as expectativas em 26,64%. Esses resultados ressaltam claramente a eficácia das estratégias implementadas e demonstram a capacidade de superar os desafios e identificar soluções que abordem de forma efetiva as causas fundamentais do problema analisado.

Figura 17 - Comparação dos resultados obtidos com a meta estipulada



Fonte: Autoria própria

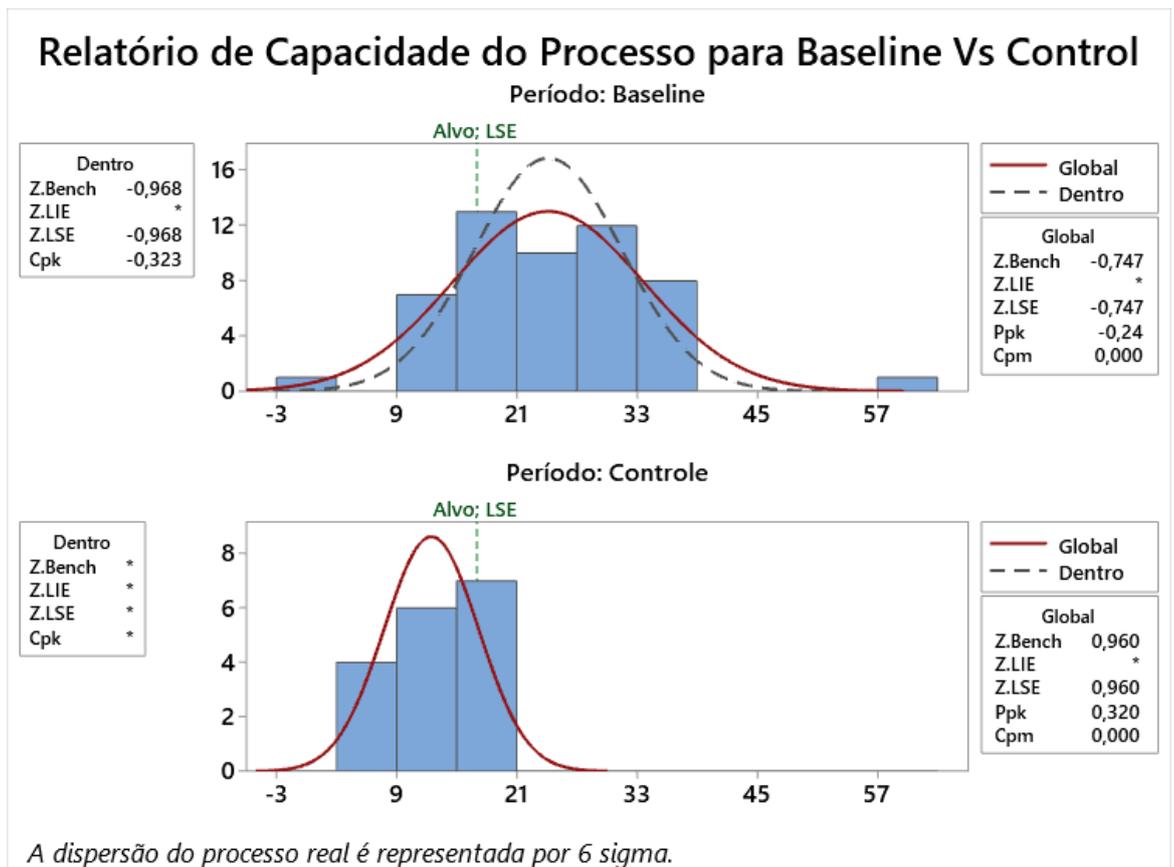
3.5.2. Nova capacidade do processo para comprovação da melhoria significativa

A melhoria do nível sigma de um processo é uma abordagem perspicaz para aprimorar tanto a qualidade quanto a eficácia do mesmo SOUZA, 2018. Ao elevar o nível de sigma, estamos trabalhando para reduzir a variabilidade, aumentar a consistência e minimizar as falhas, resultando em um processo mais previsível e controlado. (WERKEMA, 2011)

Com base nas ações implementadas, é notável que houve um significativo avanço no nível sigma do processo. A mudança de um nível sigma anterior de -0,747 para um novo nível de 0,960 representa um aumento de mais de 200%. Esse é um feito notável, pois mostra como as intervenções e melhorias realizadas tiveram um impacto substancial na estabilidade e na qualidade do processo.

Esse aumento no nível sigma não apenas reflete as melhorias quantitativas, mas também simboliza a transformação positiva do processo como um todo. (LOBO, 2020)

Figura 18 - Relatório de capacidade Baseline Vs Control



Fonte: Autoria própria

3.5.3. Apresentação dos ganhos

3.5.3.1. Redução da variabilidade dos eventos

Em relação aos ganhos alcançados, foi obtida uma redução significativa de 49,39% no desvio padrão global ao comparar os grupos Baseline e Control. Essa redução do desvio padrão reflete a diminuição da dispersão e a conseqüente melhoria no controle da variabilidade. Como resultado, as ocorrências corretivas se tornaram mais previsíveis e confiáveis.

Essa redução da variabilidade e do desvio padrão tem um impacto direto na qualidade do processo. A diminuição das variações significa que as operações se tornam mais consistentes e estáveis, resultando em uma maior confiabilidade nos resultados. A previsibilidade aumenta, o que é crucial para o planejamento eficiente e a tomada de decisões informadas. (BRITTO, 2016)

A redução considerável das ocorrências de falhas elétricas na frota de transporte também reforça o impacto positivo nas operações. Essa diminuição reflete a eficácia das intervenções implementadas e a capacidade de lidar com as causas raízes subjacentes do problema. Conseqüentemente, a qualidade do processo é aprimorada, a confiabilidade é fortalecida e a excelência operacional é elevada a novos patamares.

A combinação de uma redução substancial nas ocorrências de falhas elétricas e a melhoria da variabilidade demonstra os ganhos tangíveis e intangíveis alcançados por meio do esforço dedicado à otimização do processo. Esse progresso não apenas reflete em números, mas também em uma mudança positiva na cultura organizacional, reforçando o compromisso com a qualidade, a eficiência e a busca contínua pela excelência.

Figura 19 - Desvio padrão global Baseline VS Control

Dados do Processo

Variável	LIE Alvo	LSE	Média		DesvPad(Dentro)	DesvPad(Global)	
			Amostral	N Amostral			
Período: Baseline	*	17	17	24,13	52	7,37	9,55
Período: Control	*	17	17	12,47	17	0,00	4,72

Fonte: Autoria própria

3.5.3.2. Ganho em MTBF e MTTR

Na fase de controle, um passo inicial foi a realização da análise de correlação de Spearman pareada entre os grupos Duração da manutenção e Quantidade de manutenção.

De acordo com, MONTGOMERY, 2016A análise de correlação de Spearman é uma medida estatística que avalia a relação monotônica entre duas variáveis ordenadas. A relação monotônica não precisa ser necessariamente linear, podendo ser uma relação crescente ou decrescente. MONTGOMERY, 2016

Conforme MONTGOMERY, 2016 o coeficiente de correlação de Spearman varia entre -1 e 1, onde:

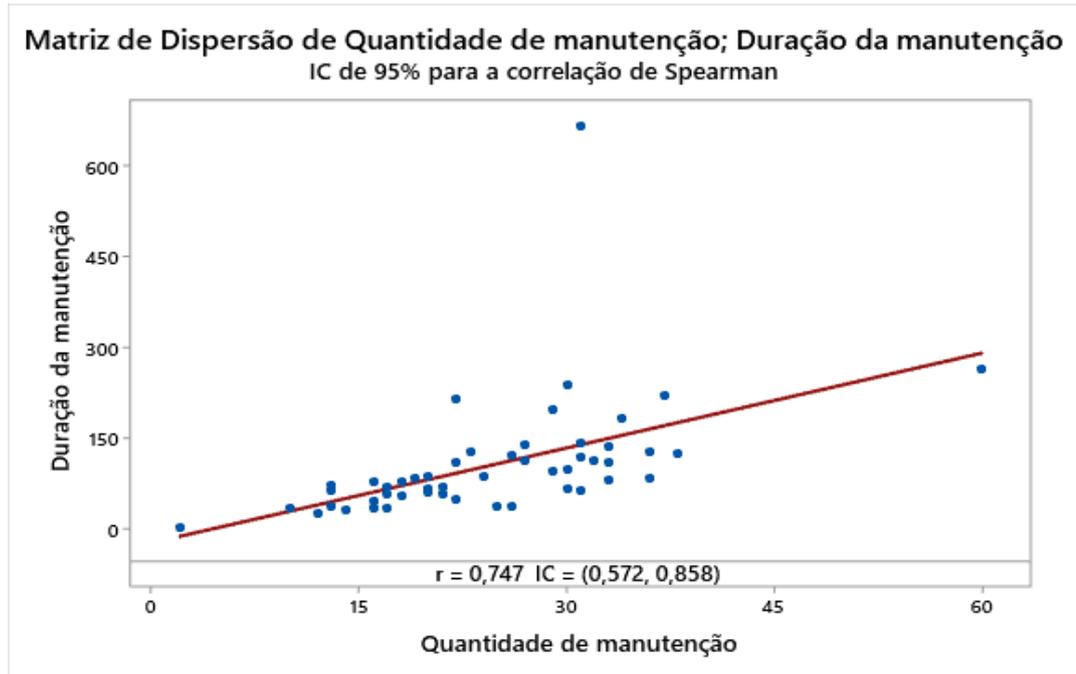
- I. O valor -1 representa uma correlação perfeitamente decrescente, indicando que quando uma variável aumenta, a outra diminui de maneira previsível.
- II. O valor 1 representa uma correlação perfeitamente crescente, indicando que quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de maneira previsível.
- III. O valor 0 indica que não há uma correlação monotônica evidente entre as variáveis.

Com base na análise de correlação realizada, foi observada uma correlação forte com um coeficiente de 0,747 entre os grupos Duração da manutenção e Quantidade de manutenção. De acordo com, MONTGOMERY, 2016 há indícios, que existe uma relação entre essas duas variáveis. Com isso, houve um ganho de 179,43 horas no MTTR indicando uma quantidade de tempo economizada devido à otimização do processo. Além disso, houve o ganho de 1,5 horas no MTBF mostrando que os equipamentos estão operando de forma mais confiável e por um período maior antes de ocorrerem novas falhas.

Figura 20 - Correlação das variáveis Duração da Manutenções VS Quantidade das manutenções

Correlações de Spearman pareadas

Amostra 1	Amostra 2	Correlação	IC de 95% para ρ	Valor-p
Duração da manutenção	Quantidade de manutenção	0,747	(0,572; 0,858)	0,000



Fonte: Autoria própria

3.5.4. Padronização da solução

A padronização de ações desempenha um papel crucial na busca pela melhoria contínua e na excelência operacional. É uma prática que contribui significativamente para manter o processo estável ao garantir resultados consistentes e embasar a tomada de decisões com base em evidências sólidas. Essa abordagem não apenas promove uma maior consistência nas operações, mas também cria um ambiente propício para o crescimento sustentável do processo que está sendo aprimorado. (WERKEMA, 2012)

Logo, todas as soluções implementadas foram colocadas e padronizadas no plano de manutenção, de tal forma, que fique em acesso para todos os técnicos e mecânicos que realizam as correções dos equipamentos.

4. CONCLUSÃO

A otimização dos processos de engenharia de manutenção é uma busca constante para assegurar a eficiência operacional e a excelência nos resultados. Nesse contexto, as metodologias Lean Manufacturing, Seis Sigma e Lean Seis Sigma emergem como ferramentas altamente úteis para enfrentar os desafios complexos que permeiam a manutenção de equipamentos industriais.

O Lean Manufacturing, é conhecido por seu foco na eliminação de desperdícios, traz contribuições valiosas para a engenharia de manutenção. Ao aplicar princípios de eficiência, como a padronização de processos e a redução de tempos ociosos, a manutenção pode ser realizada de forma mais ágil e precisa. Isso se traduz em menor tempo de inatividade de equipamentos, redução de custos operacionais e aumento da disponibilidade dos sistemas, fatores cruciais para o sucesso das operações industriais.

Por outro lado, a metodologia Seis Sigma é uma abordagem quantitativa que se concentra na redução da variabilidade e no aumento da qualidade dos processos. Ao empregar ferramentas estatísticas avançadas, a engenharia de manutenção pode identificar causas raiz de falhas, analisar dados com precisão e tomar decisões informadas. Isso é particularmente relevante para minimizar o risco de ocorrências não programadas, como as identificadas no estudo de caso envolvendo a frota 793F de caminhões de mineração.

O Lean Seis Sigma, por sua vez, combina o poder do Lean Manufacturing e do Seis Sigma, proporcionando uma abordagem abrangente para otimização de processos. No estudo de caso dos caminhões de mineração, fica evidente como a aplicação da metodologia Lean Seis Sigma, utilizando o modelo DMAIC, oferece um caminho estruturado para a resolução dos desafios. Através das etapas de Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, a engenharia de manutenção é capaz de entender profundamente os problemas, quantificá-los, identificar causas fundamentais, implementar soluções estratégicas e monitorar continuamente os resultados.

Além disso, a comunicação interprocessos é um desafio muitas vezes negligenciado na implementação do Lean Seis Sigma, mas sua importância não pode ser subestimada. Superar esse desafio exige um compromisso organizacional com a comunicação eficaz e a colaboração entre as interfaces do processo. Ao adotar o planos de ações, tais como metas compartilhadas e a criação de uma cultura de comunicação, as empresas podem aumentar suas chances de sucesso na implementação do Lean Seis Sigma e colher os benefícios de processos mais eficientes e de alta qualidade.

Uma comunicação eficaz entre os diferentes processos dentro da organização é fundamental para garantir que todas as etapas do Lean Seis Sigma sejam executadas de maneira coordenada e sem problemas. Isso envolve compartilhar informações relevantes, dados de desempenho e lições aprendidas em tempo hábil. Além disso, a colaboração entre as interfaces do processo ajuda a identificar áreas de melhoria, resolver problemas e otimizar o fluxo de trabalho.

A implementação bem-sucedida do Lean Seis Sigma não se resume apenas à aplicação das ferramentas e técnicas, mas também à criação de uma cultura de comunicação aberta e colaborativa. Os líderes e equipes devem estar comprometidos em promover a troca de informações e conhecimentos entre os departamentos e garantir que todos estejam alinhados com os objetivos estratégicos da organização.

A sinergia entre as metodologias Lean e Seis Sigma cria um ambiente de melhoria contínua na engenharia de manutenção. Ao adotar abordagens como o Lean Manufacturing, a redução de desperdícios contribui para otimizar os processos de manutenção. O Seis Sigma oferece ferramentas analíticas para a identificação de problemas e causas raiz. O Lean Seis Sigma, por sua vez, agrega uma estrutura completa e comprovada para guiar a resolução de problemas complexos.

Em suma, o uso conjunto do Lean Manufacturing, Seis Sigma e Lean Seis Sigma na engenharia de manutenção traz benefícios significativos. A capacidade de reduzir desperdícios, melhorar a qualidade dos processos e atacar problemas de forma estruturada resulta em maior eficiência operacional, disponibilidade aprimorada de equipamentos e, no caso específico dos caminhões de mineração, na redução drástica das ocorrências não programadas. Essas metodologias impulsionam a engenharia de manutenção em direção a um patamar de excelência e confiabilidade, fundamentais para o sucesso das operações industriais.

REFERÊNCIAS

- BALDAN *et al.* **Manual de gestão de projetos. 4. ed.** São Paulo: Atlas, 2014.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade - Conceitos e Técnicas.** 3ª edição. ed. São Paulo: Grupo GEN, 2016.
- CATERPILLAR. Caminhões De Mineração 793F. **Caterpillar**, 2023. Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18092621.html. Acesso em: 23 Agosto 2023.
- 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-esforco-impacto>. Acesso em: 23 Agosto 2023.
- DENNIS, P. **Produção lean simplificada.** São Paulo: Grupo A, 2011.
- FOGLIATTO, F. ; DUARTE, L. R. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- GREGÓRIO, F. P.; SANTOS, D. ; PRATA,. **Engenharia de manutenção.** Porto Alegre: Grupo A, 2018.
- GREGÓRIO, F. P.; SILVEIRA, M. D. **Manutenção industrial.** Porto Alegre: Grupo A, 2018.
- LOBO, N. R. **Gestão da Qualidade.** São Paulo: Saraiva, 2020.
- LOBO, R. N.; LIMEIRA, T. N. P.; MARQUES, R. D. N. **Controle da Qualidade - Princípios, Inspeção e Ferramentas de Apoio na Produção de Vestuário.** São Paulo: Saraiva, 2015.
- LOZADA, G. **Controle Estatístico de Processos.** Porto Alegre: Grupo A, 2017.
- MONTGOMERY. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade, 7ª edição.** Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.
- NAPOLEÃO. Matriz GUT (Matriz de Priorização). **Ferramentas da qualidade: O glossário definitivo sobre as ferramentas da qualidade**, 2019. Disponível em: <https://ferramentasdaqualidade.org/matriz-gut-matriz-de-priorizacao/>. Acesso em: 23 Agosto 2023.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala.** Porto Alegre: Bookman, 1997.
- BRITTO, E. **Qualidade Total.** São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda, 2016.
- ROCHA, ; BARRETO, D. S.; AFONSO, M. F. **Mapeamento e modelagem de processos.** Porto Alegre: Grupo A, 2017.

- SOUZA, M. D. O. **Gestão da qualidade e produtividade**. Porto Alegre: SAGAH EDUCAÇÃO S.A., 2018.
- SOUZA, M. D. O. **Gestão da qualidade e produtividade**. Porto Alegre: Grupo A, 2018.
- WERKEMA,. **Métodos PDCA e DMAIC e Suas Ferramentas Analíticas**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012.
- WERKEMA, C. **Perguntas e Respostas Sobre o Lean Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2011.
- WERKEMA, C. **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda, 2012.
- XENOS, H. G. D. P. **Gerenciamento da manutenção produtiva**. Belo Horizonte: EDG- Editora de desenvolvimento gerencial, 1998.
- PALADINI, E.. **Gestão da Qualidade - Teoria e Prática**. São Paulo: Grupo GEN, 2019.
- POUND, S.; BELL, H.; SPEARMAN, M.. **A ciência da fábrica para gestores**. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA LTDA, 2015.
- VERGARA, Sylvia Constant. **Gestão da Qualidade**. Editora FGV. 3ª Edição. Rio de Janeiro. 2006.
- DIAS,. **Implementação da metodologia Lean Seis-Sigma- O caso do Serviço de Oftalmologia dos Hospitais da Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida**. Belo Horizonte: QFCO, 1997.

**APÊNDICE A - CARTA ACEITE PARA CONFIABILIDADE E UTILIZAÇÃO DOS
DADOS PARA FINS EXCLUSIVOS ACADÊMICO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CARTA DE AUTORIZAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO E PUBLICIZAÇÃO ACADÊMICO-
CIÊNCIA DE DADOS E RESULTADOS

Eu Luis Cristovão Mol Alves autorizo o aluno **Luiz Felipe Pereira Mathias** estudante de **Engenharia de Produção**, da Universidade Federal de Ouro Preto, com a matrícula acadêmica 19.1.1353, a utilizar e publicar, em meios físicos e digitais, apenas para FINS ACADÊMICOS, os dados do seu trabalho de melhoria contínua realizado na empresa.

Os dados serão utilizados para a elaboração do seu trabalho de conclusão de curso que tem como título, Lean Seis Sigma aplicado na engenharia de manutenção: Um estudo de caso para a redução das ocorrências elétricas de uma frota de caminhões de grande porte do setor de mineração, sob a orientação do Prof. Dr. Magno Silvério Campos.

Congonhas, 01 de Setembro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FELIPE PEREIRA MATHIAS**
Data: 04/09/2023 08:36:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Felipe Pereira Mathias

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CRISTOVAO MOL ALVES**
Data: 04/09/2023 08:14:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Luis Cristovão Mol Alves

Engenheiro I

CREA NACIONAL: CREA-MG Nº 141828438-6
CREA REGIONAL: MG0000239115D MG