



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas: Escola de Minas



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

PEDRO HENRIQUE GAZOLLA CÔBO

**AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS FROTAS DE TRANSPORTE E
DE CARREGAMENTO ATRAVÉS DA METODOLOGIA LEAN SEIS
SIGMA**

OURO PRETO
FEVEIRO/2023

PEDRO HENRIQUE GAZOLLA CÔBO

**AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS FROTAS DE TRANSPORTE E
DE CARREGAMENTO ATRAVÉS DA METODOLOGIA LEAN SEIS
SIGMA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador (a): Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

OURO PRETO

Fevereiro/2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C657a Côbo, Pedro Henrique Gazolla.
Aumento da produtividade das frotas de transporte e de
carregamento através da metodologia Lean Seis Sigma. [manuscrito] /
Pedro Henrique Gazolla Côbo. - 2023.
58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 2.
Produtividade. 3. Lean Six Sigma. I. Souza, Felipe Ribeiro. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Henrique Gazolla Côbo

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS FROTAS DE TRANSPORTE E DE CARREGAMENTO ATRAVÉS DA METOLOGIA LEAN SEIS SIGMA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 27 de março de 2023

Membros da banca

Dr - Felipe Ribeiro Souza - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheiro - João Victor de Castro Santos - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheiro- Bruno Inácio Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto

Felipe Ribeiro Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Ribeiro Souza, ENGENHEIRO-AREA**, em 27/03/2023, às 12:39, 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 **0498545** e o código CRC **A72C28DA**.

À minha família que sempre esteve ao meu lado
e me deu total apoio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho durante todo o percurso.

Aos meus pais, Dorival e Valéria, que nunca mediram esforços para que meus sonhos pudessem se realizar.

Aos meus amigos de Ubá, por sempre se fizerem presentes mesmo com a distância.

À minha amada República Pureza, seus ex-alunos e moradores que, desde o princípio, fizeram essa jornada mais leve.

À Isabela, por ser minha melhor amiga, companheira e sempre me incentivar a ser a melhor versão de mim.

Aos professores da UFOP, pela ajuda e dedicação em minha formação profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Felipe Ribeiro Souza, pelo apoio e conhecimento compartilhado.

À gloriosa Escola de Minas e à UFOP pelo ensino público de qualidade e pela oportunidade de crescer em todos os âmbitos da minha vida.

À Ferro+ Mineração S.A., em especial a equipe de operação de mina, pela oportunidade e todo o crescimento profissional e pessoal adquirido.

“Tudo vale a pena quando a alma não é pequena.”

RESUMO

O presente trabalho possui o objetivo geral de aumentar a produtividade das frotas de caminhões e escavadeiras utilizando a metodologia Lean Seis Sigma no processo de produção. Demonstrar a utilização da metodologia juntamente ao uso de ferramentas estatísticas durante o desenvolvimento e identificação dos problemas presentes no processo produtivo. Para fomentar a cultura da melhoria contínua nas operações da mina. Após uma análise bem detalhada e através das aplicações de ações para resolução de problemas, foi possível atingir um aumento da produtividade global dos caminhões de cerca de 23%. Considerando a meta global de melhoria de 19%, para as escavadeiras. Um acréscimo de 31% na produtividade efetiva, sendo que a meta inicial era de 17%.

Palavras-chave: Aumento de Produtividade; Metodologia Lean Seis Sigma; Produtividade Efetiva; Produtividade Global.

ABSTRACT

The present work has the general objective of increasing the productivity of fleets of trucks and excavators using the Lean Six Sigma methodology in the production process. Demonstrate the use of the methodology along with the use of statistical tools during the development and identification of problems present in the production process. To foster a culture of continuous improvement in mine operations. After a very detailed analysis and through the application of actions to solve problems, it was possible to achieve an increase in the overall productivity of the trucks of around 23%. Considering the global improvement target of 19% for excavators. A 31% increase in effective productivity, with the initial target being 17%.

Keywords: Productivity increase; Lean Six Sigma Methodology; Effective Productivity; Overall Productivity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: Histograma	20
FIGURA 2: Matriz esforço x impacto	25
FIGURA 3: Boxplot.....	27
FIGURA 4: Scania G480	29
FIGURA 5: SANY SKT90S.....	29
FIGURA 6: Volvo A45G.....	30
FIGURA 7: Sany 500H.....	30
FIGURA 8: Sany 750H.....	31
FIGURA 9: Volvo EC480D	31
FIGURA 10: Pareto de movimentações da mina.....	32
FIGURA 11: Hitórico de Produtividade Global dos caminhões.....	34
FIGURA 12: Histórico de produtividade efetiva das escavadeiras	34
FIGURA 13: Teste de normalidade dos dados de caminhões.....	35
FIGURA 14: Teste de normalidade dos dados de escavadeiras.....	35
FIGURA 15: Capabilidade inicial dos caminhões	37
FIGURA 16: Capabilidade inicial das escavadeiras	38
FIGURA 17: SIPOC Caminhões.....	39
FIGURA 18: SIPOC Escavadeiras	39
FIGURA 19: Dlagrama de Ishikawa	40
FIGURA 20: Value Map Stream Caminhões	42
FIGURA 21: Value Map Stream Escavadeiras.....	42
FIGURA 22: Martiz causa e efeito.....	44
FIGURA 23: Matriz esfroço x impacto	45
FIGURA 24: Acesso da mina após mudança.....	46
FIGURA 25: Classificação dos acessos.....	47
FIGURA 26: Área de basculamento ROM antes da padronização.....	47
FIGURA 27: Área de basculamento após padronização	48
FIGURA 28: Abastecimento por comboio.....	48
FIGURA 29: Tela de apontamento de estados do sistema de despacho.....	49
FIGURA 30: Caçambas de caminhões forradas.....	50

FIGURA 31: Boxplot escavadeiras.....	52
FIGURA 32: Boxplot dos caminhões.....	53
FIGURA 33: Capabilidade das escavadeiras após o projeto.....	53
FIGURA 34: Capabilidade dos caminhões após o projeto.....	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Definição DMAIC	19
TABELA 2 - Fórmulas para cálculos de KPI.....	26
TABELA 3: Dados anteriores ao projeto	50
TABELA 4: Dados após a implantação do projeto	51
TABELA 5: Delta de horas por tipo de equipamento.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
2 METODOLOGIA	15
2.1 <i>DEFINE</i>	15
2.2 <i>MEASURE</i>	15
2.3 <i>ANALYZE</i>	16
2.4 <i>IMRPOVE</i>	17
2.5 <i>CONTROL</i>	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 METODOLOGIA LEAN SEIS SIGMA.....	18
3.1.1 Ferramentas da Metodologia Lean Seis Sigma.....	19
3.1.1.1 Análise estatística	19
3.1.1.2 Histograma	20
3.1.1.3. Teste de normalidade.....	21
3.1.1.4. Cartas de controle	21
3.1.1.5. Capabilidade	22
3.1.1.6 SIPOC	22
3.1.1.7. Diagrama de <i>Ishikawa</i>	23
3.1.1.8. Mapa de Cadeia de Valor (<i>Value Stream Map</i>).....	23
3.1.1.9. Matriz causa e efeito	24
3.1.1.10. Matriz esfoço e impacto	24
3.1.1.11. Cálculo da produtividade e dos ganhos.....	26
3.1.1.12. <i>Boxplot</i>	26
3.2. TÉCNICAS OPERACIONAIS	27
3.2.1 Operações de carregamento.....	27
3.2.2 Transporte por caminhões em mina a céu aberto	28

4. ESTUDO DE CASO	28
5. RESULTADOS	33
5.1 MUDANÇAS DE LAYOUT OPERACIONAL.....	46
5.2. SISTEMA DE DESPACHO.....	49
5.3. AJUSTES NOS EQUIPAMENTOS.....	49
5.4. RESULTADOS OBTIDOS APÓS AÇÕES.....	50
6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

O setor mineral possui uma grande relevância para o desenvolvimento econômico e pessoal em todo mundo, podendo ser considerado como uma das atividades essenciais. Fornecem matérias primas para diversos tipos de indústrias recebem suas matérias primas. Devido ao impacto na balança comercial brasileira, a mineração possui destaque nas atividades econômicas.

O mercado da mineração é bastante volátil e, faz-se necessária a atenção a diversos fatores que podem fazer com que o empreendimento deixe de ser competitivo, produtivo e, conseqüentemente, viável economicamente. É de suma importância acompanhar vários indicadores que estão diretamente ligados a essa viabilidade, como por exemplo a produtividade dos equipamentos presentes na operação e produção de uma mina.

A determinação da ferramenta de estimativa de produtividade permitirá a quantificação dos impactos dos desvios dos KPIs sobre a produtividade (Key Performance Indicator – KPI), são variáveis críticas, mensuráveis usadas no monitoramento de processos, isto em relação a metas estabelecidas). Essa análise é importante na determinação das ações que trazem melhores resultados a menor custo, sendo fundamental para a maximização da eficiência do sistema produtivo. A maximização da eficiência se dá a partir da eliminação das perdas do processo. A eficiência de um sistema de produção depende da eficiência com que são utilizados os equipamentos, os materiais, as pessoas e os métodos (SUZUKI, 1992).

Os KPIs (do inglês, Key Performance Indicators), permitem aos gestores identificar se as metas traçadas estão sendo executadas, monitorar o desempenho do equipamento, identificar possíveis pontos de melhorias no processo ou na utilização do equipamento. Além disso, os KPIs auxiliam aos gestores a terem uma visão mais abrangente das áreas que envolvem a operação de transporte (PEREIRA, 2019).

Um dos principais desafios da gestão empresarial é a melhoria contínua da produtividade dos processos com o intuito de reduzir seu custo específico prezando a segurança e bem estar dos trabalhadores. O aumento da produtividade é visto como um dos principais objetivos se tratando de operações mineiras.

O Lean Seis Sigma é uma das mais utilizadas por se tratar de uma estratégia gerencial altamente quantitativa e de ótimos resultados. Esta tem como objetivo

aumentar essencialmente a performance e a lucratividade das empresas por intermédio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores (RODRIGUES, 2018).

O presente trabalho consiste na aplicação da metodologia Lean Seis Sigma, baseando-se na utilização do DMAIC, renomada ferramenta gerencial que tem por finalidade identificar e entender os principais problemas em um determinado processo produtivo respaldando-se em diagramas e matrizes. Após reconhecido os problemas, serão tomadas ações do tipo kaizen, também conhecidas como “ver e agir”.

Se tratando de um setor amplamente competitivo e dinâmico, a otimização da produtividade dos equipamentos é um dos fatores vitais para que o empreendimento não seja inviabilizado. Percebe-se que a utilização de estratégias gerenciais provenientes da melhoria contínua se torna um meio bastante oportuno para uma empresa otimizar suas operações. Será testada a metodologia Lean Seis Sigma para mitigar e/ou eliminar os problemas operacionais e, conseqüentemente, obter um acréscimo de produtividade da frota de equipamentos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui o objetivo geral de aplicar a metodologia Lean Seis Sigma com foco no aumento da produtividade dos equipamentos de frota e de transporte da mina.

1.1.2 Objetivo Específicos

- Maior controle sobre as velocidades médias da frota em geral;
- Reduzir o tempo de fila dos caminhões nas áreas de descarga;
- Diminuição do tempo de abastecimento dos equipamentos;
- Obter dados mais assertivos através do sistema de despacho;
- Eliminar cargas mortas

2 METODOLOGIA

Este trabalho sobre o aumento da produtividade das frotas de transporte e de carga tem como base um projeto *Green Belt – Lean Seis Sigma*, que se respalda na metodologia do DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve e Control*). Aqui serão descritos os procedimentos mais relevantes e em ordem cronológica.

2.1 DEFINE

Após ser identificada a chance de melhoria, inicia-se a definição analítica de um escopo do projeto visando otimizar e padronizar uma determinada etapa do processo produtivo.

Primeiramente, foram obtidas as produtividades de todos os caminhões e todas as escavadeiras presentes na mina através do *SmartMine®*, permitindo a construção de um banco de dados considerando as produtividades de 15 de novembro de 2020 até 09 de fevereiro de 2021.

Depois de coletados, os dados devem ser plotados no *Minitab®* para serem analisados. Para o conjunto das escavadeiras deve ser utilizado a carta de controle I-MR por não haver uma grande quantidade de dados, enquanto para os caminhões deve ser usada a carta de controle Xbarra-R para sintetizá-los em subgrupos.

Deve ser elaborado um histograma para cada grupo de equipamento a fim de verificar se o comportamento da distribuição é normal ou não. A metodologia só pode ser aplicada em distribuições normais. As metas do projeto são definidas analisando os gráficos elaborados.

2.2 MEASURE

A fase de definição do projeto se inicia com a construção de um diagrama SIPOC. O passo inicial é dividir uma tabela em 5 colunas, sendo colunas denominadas, S, I, P, O, C. O preenchimento das colunas é feito a partir da coluna P (processos) das etapas e denomina-las. Após preenchida a coluna P da tabela, é preenchido as colunas do que se produz (Y's), saídas (O), e, para quem produz,

clientes (C). Em seguida, inicia-se a identificação do que o processo necessita (X's), entradas (I) e quem fornece, os fornecedores (S).

Após a elaboração do SIPOC, deve ser feito um diagrama de *Ishikawa* com o intuito de facilitar a análise na procura das principais causas de um determinado problema. Para produzi-lo é necessário o *brainstorm*, feito por uma equipe, afim de definir as principais causas, sub-causas e causas raízes de um determinado processo. Para a montagem deste diagrama coloca-se na ponta da seta o problema principal, as principais causas em linhas diagonais ao corpo da seta e as sub-causas no corpo das linhas.

Após essas análises, é elaborado um VSM (*Value Stream Map*) dando uma melhor visualização do processo como um todo. Com isso, é possível analisar quais etapas geram valor, quais não geram valor e quais não geram valor, mas são intrínsecas ao processo. Este estudo tem a finalidade de encontrar as etapas desnecessárias e que podem ser mitigadas e/ou excluídas.

2.3 ANALYZE

Após levantados as informações acerca do processo e seus principais problemas, inicia-se a fase de análise. Esta fase utiliza-se da matriz de causa x efeito e da matriz de esforço x impacto.

Visando elaborar a matriz de causa x efeito, lista-se todas as possíveis causas do problema a ser estudado e, através de uma reunião com o grupo, determina-se uma nota para determinar a correlação entre a determinada causa e o problema. As notas podem ser 1 (correlação fraca), 3 (correlação moderada), 5 (correlação forte) e 9 (correlação muito forte). Cada integrante do grupo atribui uma nota para as causas e as que obtiverem maior nota são, posteriormente, lançadas na matriz esforço x impacto.

Após determinadas as notas da matriz causa x efeito, é elaborada a matriz esforço x impacto. Esta matriz pode ser dividida em quatro quadrantes. Devemos focar nossa atenção nas causas que forem alocadas no terceiro quadrante que se refere às ações que possuem baixo esforço e alto impacto, sendo consideradas “ganhos fáceis”. O segundo e terceiro quadrante são descartados por se tratarem de ações com baixo impacto e que podem não gerar resultados expressivos. Enquanto o

primeiro quadrante (alto esfoço e alto impacto), deve ser analisado juntamente à gerência para validar se seria útil.

2.4 IMPROVE

Entre as ações deve-se priorizar as que ocuparam o terceiro quadrante da matriz esforço x impacto. Foram escolhidas cinco para elaborar um plano de ação com base na metodologia ver e agir.

Inicialmente, fez-se a padronização nos acessos da mina com material descartado proveniente da usina e que possuía granulometria conhecida. Foi elaborado um cronograma para manutenção dos acessos sendo estes divididos em principais e secundários. Os principais possuem acessos para a frente de lavra e descarga para serem mantidos diariamente, com distância de até 100 metros. E os secundários com manutenção semestral, distante a mais de 100 metros do acesso.

Também visando a padronização, foi definido layouts fixos para a etapa de basculamento de ROM da usina. Esta mudança foi feita para que os caminhões pudessem ter um acesso específico para entrar na área e realizar a manobra e outro para realizar a saída evitando o encontro entre equipamentos.

Da mesma forma, foram atribuídas áreas estratégicas na mina para abastecimento dos equipamentos através de caminhão comboio. Essa definição fez com que os equipamentos se deslocassem menos das suas áreas de atividade para o abastecimento.

Outro ajuste feito foi no sistema de despacho, atribuindo definições lógicas entre os estados dentro do próprio sistema. Essa alteração criou uma definição de ciclo dentro do sistema, evitando que os estados fossem selecionados de maneira errada. Por exemplo, para apontar o estado de bascular, deve-se ter apontado o estado de movimentando cheio antes.

Por fim, com o intuito de eliminar as cargas mortas nos caminhões, a equipe foi ao mercado em busca do forro que melhor performava. Após a escolha, realizou-se o ajuste nos caminhões colocando um forro nas básculas.

2.5 CONTROL

Após a aplicação das ações, é necessário observar seus reflexos nos resultados do processo com a finalidade de controlar o KPI estudado. Dessa maneira, foram elaboradas tabelas com dados da produção antes e depois da aplicação do projeto, além de uma tabela de delta de horas para expressar o quanto de tempo foi necessário para realizar uma mesma massa nas duas fases.

O *Minitab*® foi utilizado para realizar o *Two-Sample T* e gerar um *boxplot* para as escavadeiras e um para os caminhões e confirmar estatisticamente a melhoria no processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 METODOLOGIA LEAN SEIS SIGMA

O Lean Seis Sigma surgiu da união entre duas metodologias: O Seis Sigma e a *Lean Manufacturing*. O Seis Sigma foi inicialmente proposto na Motorola com base nos conceitos e propostas de Bill Smith, em meados dos anos 1980. Ao unir ferramentas renomadas de gestão da qualidade com novas propostas de gestão, surgiu o programa com intuito de produzir com maior qualidade juntamente a preços inferiores que seus concorrentes. Segundo Werkema (2012), no Brasil, o Seis Sigma foi disseminado a partir de 1997, quando o Grupo Brasmotor introduziu o programa em suas atividades. Enquanto o *Lean Manufacturing*, de acordo com Gelderman e Weele (2011), teve as suas origens no produtor automotivo japonês Toyota, tendo como base o *Toyota Production System* (TPS).

Após a fusão dos ideais das metodologias Lean e Seis Sigma, foi concebido o processo de melhoria contínua Lean Seis Sigma com o intuito de amplificar o desempenho e lucros das empresas através do aumento da qualidade de produtos e processos.

Para Dias (2011), o Lean Seis Sigma é uma iniciativa de gestão da qualidade de âmbito organizacional focalizado em atingir resultados concretos e tangíveis, melhorar a qualidade dos processos, tornar processos mais eficientes e criar valor

acrescentado, focando na eliminação de problemas de qualidade crônicos e no desperdício em processos.

A utilização do Lean Seis Sigma se dá através da realização de processos focados na melhoria contínua. Uma das ferramentas gerenciais utilizadas para a melhoria de processos já existentes é o DMAIC (TABELA 1), composto por cinco etapas sendo elas: Definir (*Define*), Medir (*Measure*), Analisar (*Analyze*), Melhorar (*Improve*) e Controlar (*Control*).

Nesse procedimento, define-se o foco de melhoria no processo com base na estratégia empresarial e demandas dos clientes. Ferramentas como *brainstorm*, gráficos de Paretos, Histogramas, cartas de controle, diagrama de causa efeito, diagrama de *Ishikawa*, boxplot e entre outros são utilizados em cada uma das fases do DMAIC. Ao realizar o mapeamento e medição dos processos obtém-se dados que serão comparados com as metas almejadas. Visando possuir uma melhor performance, as organizações realizam constantemente melhorias e controles em seus processos.

Tabela 1 - Definição DMAIC	
Definição (Define)	Identificar qual processo será estudado, qual seu seu limites de abrangência, seu cliente e o que é defeito para o produto deste processo.
Medição (Measura)	Elaboração do mapa de processo, identificando todos os sub-processo, e etapas do processo-chave anteriormente definidas.
Análise (Analyse)	Selecionar as etapas de desempenho inferior e cuja melhoria promoverá um maior retorno econômico.
Melhoria (Improve)	Utiliza-se de ferramentas como o projeto de experimentos e técnicas de otimização, são estabelecidos limites ótimos de tolerância para as variáveis de entrada, minimizando a variabilidade das variáveis de saída a que se referem.
Controle (Control)	Realiza-se uma forma de controle estatístico sobre as variáveis de entrada de forma que permaneçam dentro dos limites operacionais especificados na etapa anterior. Além disso é efetuado um plano de controle estabelecendo as variáveis de entrada a serem controladas, forma de controle e medição, frequência de coleta de dados e os limites ótimos de trabalho

Fonte: Adaptado de Werkema (2006)

3.1.1 Ferramentas da Metodologia Lean Seis Sigma

3.1.1.1 Análise estatística

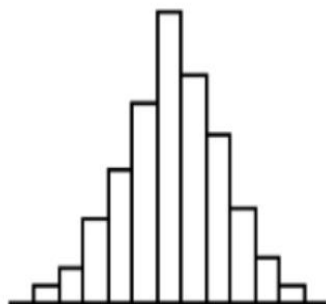
Para compreender o comportamento e tendências de certo fluxo dentro de um processo é necessário realizar a coleta de dados. Ao se compilar o que foi obtido, é gerado um banco de dados para auxílio durante a análise dos resultados. A avaliação

do banco de dados é parte do gerenciamento de um projeto de padronização e otimização.

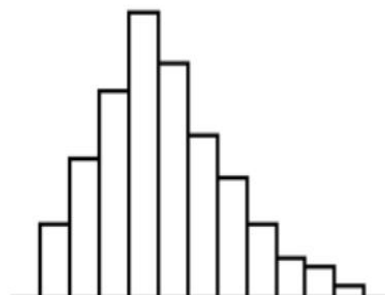
3.1.1.2 Histograma

O histograma (FIGURA 1) é uma ferramenta estatística utilizada para a realização de análises e representações de dados quantitativos. Esses dados são agrupados em classes de frequência, de modo que é possível distinguir a forma, o ponto central e a variação da distribuição dos mesmos, além de diversas outras características, como a amplitude e a simetria nessa distribuição. Tem como objetivo ilustrar e representar uma amostra ou população de dados e como estas se encontram distribuídas. Mede, portanto, quantas vezes temos certos valores dentro da distribuição.

FIGURA 1: Histograma



Este é um tipo de histograma simétrico ou com o formato de sino. A média está no meio da amplitude dos dados. A frequência é alta no meio e decresce aproximadamente igual para ambos os lados. Este formato é o que ocorre mais vezes. Ele indica que o processo tem iguais probabilidades de gerar um ponto acima ou abaixo da média.



Se a distribuição de frequências está deslocada dizemos que a distribuição é Assimétrica. Este histograma possui assimetria positiva, ou seja a média está a esquerda do ponto médio da amplitude e as frequências reduzem abruptamente para a esquerda da mediana. Este formato normalmente ocorre quando o limite inferior – o limite a esquerda – é controlado por alguma especificação ou então por que os valores a esquerda não ocorrem devido a alguma outra razão, como uma impossibilidade física (ex. distâncias negativas).

3.1.1.3. Teste de normalidade

Existem diversas formas de verificar a normalidade de uma determinada distribuição contínua. Existem formas subjetivas de realizar este teste, a mais comum trata-se da verificação do formato de um sino em um histograma previamente elaborado. Visando eliminar o problema da subjetividade, temos o Teste de Anderson-Darling, padrão do *Minitab*®. Este teste tem como base a função da distribuição cumulativa empírica. Através dele obtém-se como resultado um valor “p” que se for menor que 0,05 é muito provável que a distribuição dos dados não seguirá uma distribuição normal. Porém, se for encontrado um valor “p” maior que 0,05 a distribuição poderá ser considerada normal. Quando encontra-se um p-value < 0,05 devemos analisar o comportamento do histograma, o A-Square (se o valor encontrado for menor que 30) e o comportamento do gráfico se assemelhar ao formato de sino, temos que a distribuição contínua é normal.

3.1.1.4. Cartas de controle

Ao empregar variáveis quantitativas contínuas no controle estatístico do processo, faz-se necessário o controle do valor médio, assim como a variabilidade, do processo. A realização do controle da média é feito através da carta de controle \bar{x} , enquanto o controle para valores individuais se usa a carta I. O monitoramento da variabilidade do processo pode ser realizado através da carta para amplitudes (R), para desvios padrões (s) ou, ao não existirem medidas duplicadas nos subgrupos, pode-se usar a carta de controle para amplitudes móveis (MR). Sabendo que precisamos controlar a média e a variabilidade do processo, devemos utilizar as cartas de controle em conjunto, sendo que a premissa para a utilização é que a distribuição da característica seja normal.

3.1.1.5. Capabilidade

O nível sigma também é conhecido como z de benchmarking por servir de parâmetro para a aferição de desempenho do processo antes e depois do projeto Lean Seis Sigma. Esse indicador representa o número de desvios padrão do qual o limite de controle se afasta da média e traduz defeitos produzidos por oportunidades (GEORGE, 2004). Seu cálculo pode ser feito por meio da seguinte equação (1):

$$(1) \quad z = \frac{X - \mu}{\sigma} + 1,5$$

Onde:

z: Nível sigma

X: Limite de controle do processo

μ : Média da amostra

σ : Desvio padrão da amostra

Alguns softwares, a exemplo do *Minitab*®, utilizam apenas o primeiro termo da equação (1) para o cálculo do z de *benchmarking*. Porém este representa a variação somente entre os subgrupos, também conhecida como variação de curto prazo, que não leva em consideração a descentralização que o processo sofre com o decorrer do tempo. Assim, para avaliar a variação de maneira completa, deve-se aplicar a Equação 2 (VOITTO, 2014):

$$(2) \quad \text{Nível sigma} = z + 1,5$$

3.1.1.6 SIPOC

Esta ferramenta qualitativa é utilizada para mapear o processo sintetizando o processo em uma sequência lógica com foco no cliente. Seu nome se dá através de um acrônimo correspondente à abreviação em inglês de: Fornecedor (*suppliers*), entradas (*inputs*), processos (*process*), saídas (*outputs*) e clientes (*customer*).

1. Fornecedor: Provê a entrada para o processo
2. Entrada: Informação/material necessário para execução da atividade
3. Processo: Atividade principal do processo
4. Saída: Resultado do processo
5. Cliente: Quem depende ou sofre influência da saída

Normalmente é utilizada para auxiliar no entendimento do processo por mostrar a conectividade entre as entradas, fases e saídas. Também se faz útil na investigação do problema e do processo com o intuito de delimitar o escopo do projeto visando o foco em apensar uma parte do SIPOC. O passo inicial é preencher a coluna dos processos a partir de etapas e denomina-las. Após preenchida a coluna P da tabela, é preenchido as colunas do que se produz (Y's), saídas (O), e, para quem produz, clientes (C). Em seguida, inicia-se a identificação do que o processo necessita (X's), entradas (I) e quem fornece, os fornecedores (S).

3.1.1.7. Diagrama de *Ishikawa*

O Diagrama de Causa e Efeito, também chamado de Diagrama Espinha de Peixe, é um diagrama que visa estabelecer a relação entre o efeito e todas as causas de um processo. Cada efeito possui várias categorias de causas, que, por sua vez, podem ser compostas por outras causas (RODRIGUES, 2006).

O diagrama define e expõe as principais causas, sub-causas e causas raízes influenciadoras do processo, direciona a discussão para um foco e permite a visualização de relações problemáticas entre as causas.

3.1.1.8. Mapa de Cadeia de Valor (*Value Stream Map*)

O mapeamento do fluxo de valor ou Value Stream Mapping em inglês é um método que foi desenvolvido por Rother & Shook (2003). É uma ferramenta que auxilia na percepção do fluxo de material e de informação através de uma cadeia de valor.

Segundo Pinto (2014), mostra todo o percurso de um produto ao longo da cadeia de valor, ou seja, analisa todas as atividades que ocorrem desde a chegada do pedido até à entrega do produto ao cliente final.

Segundo Masuti & Dabade (2019) esta é uma ferramenta usada para descrever o estado atual da empresa, desde o fluxo de processo ao fluxo de informação, de forma a resolver os problemas encontrados e melhorar o estado futuro. No entanto, para se conseguir resolver esses problemas, é preciso reunir um conjunto de informações necessárias sobre o estado atual da empresa. A vantagem da utilização desta ferramenta é que qualquer pessoa pode analisar o fluxo de processo e de informação e descobrir onde é que se pode agir para melhorar.

Consiste na criação de um modelo de fluxograma capaz de mostrar individualmente todas as atividades que uma organização precisa realizar para entregar seu produto. A representação deve ser feita a partir uma análise minuciosa do processo. Depois de esquematizado, tem-se a necessidade de classificar cada fase em três categorias: VA, NA e NVA.

- VA = Etapas que agregam valor;
- NA = Etapas que não agregam nenhum tipo de valorão agregam nenhum tipo de valor;
- NVA = Etapas que não agregam valor, mas são intrínsecos ao processo;

3.1.1.9. Matriz causa e efeito

Domenech (2015) afirma que esta é uma ferramenta que leva em consideração a importância dos requisitos estabelecidos pelo cliente, relacionando as entradas chave às saídas chaves.

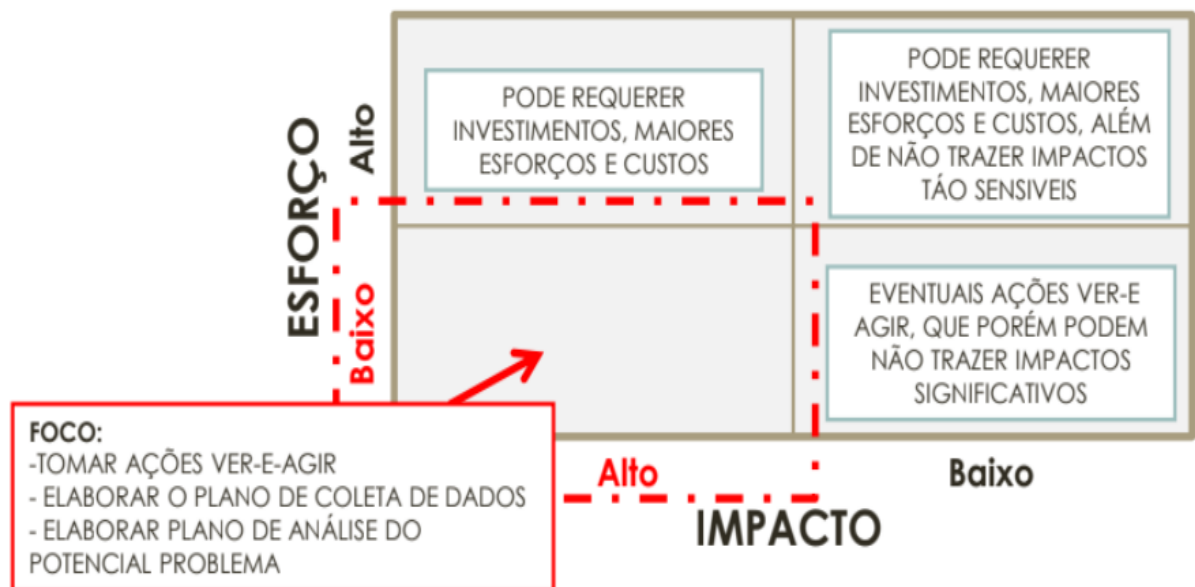
Ainda segunda Domenech (2015) para elaborar a matriz é preciso: documentar a matriz para referência futura; identificar os requerimentos chave do cliente relacionados com a base do projeto; identificar as etapas e sub-etapas do processo; analisar a correlação de todas as entradas com todas as saídas; obter o produto dos valores de correlação com os valores de prioridade e somar com todas as entradas;

3.1.1.10. Matriz esforço e impacto

A finalidade da Matriz de Esforço x Impacto (FIGURA 2) é filtrar os itens que são factíveis de serem trabalhados na melhoria, eliminando a necessidade de despende altos níveis de energia em fatores cujos retornos são ínfimos. Destaca-se

que as ações alocadas no quadrante de alto esforço e baixo impacto quando realizadas, não trazem resultados relevantes, pois demandam muito tempo para serem executadas e refletem em um impacto não significativo. Essas ações devem ser evitadas sempre que possível. Vale ressaltar que é dispendioso e ineficiente investir em melhorias para fatores complexos e dificilmente mutáveis, sendo prioritário investir naqueles que apresentem baixo esforço e alto impacto. (DANTAS et al, 2021).

FIGURA 2: Matriz esforço x impacto



Fonte: Lean Seis Sigma Pocket Book

3.1.1.11. Cálculo da produtividade e dos ganhos

No sistema de despacho utilizado, temos a produtividade definida e acordo com a tabela 2:

TABELA 2 - Fórmulas para cálculos de KPI

KPI	Cálculo do KPI
Horas Trabalhadas (HT)	(Horas Efetivas (HEF) + Horas de Atraso Operacional (HAO) + Serviços Auxiliares (HSA))
Horas Paradas (h)	(Horas Improdutivas Intrenas + Horas Improdutivas Externas)
Horas Disponíveis	(Horas Horizonte - Manutenções)
Eficiência Operacional	(Horas Operando / Horas Trabalhadas) * 100
Disponibilidade	(Horas Disponíveis / Horas Horizonte) * 100
Utilização Global	(Horas Trabalhadas / Horas Disponíveis) * 100
Utilização Efetiva	(Horas Operando / Horas Disponíveis) * 100
Rendimento Operacional Global	(Horas Trabalhadas / Horas Horizonte) * 100
Produtividade Global (T/HT)	Massa em Toneladas / Horas Trabalhadas
Produtividade Efetiva	Massa em Toneladas / Horas Operando

Fonte: SmartMine®

Assim, o retorno previsto foi calculado a partir dos seguintes parâmetros:

Massa orçada de movimentação de estéril e minério (t) = Morçada (3)

Produtividade antes (t/h) = Prod. antescaminhão ; Prod. antescavadeira (4)

Produtividade depois (t/h) = Prod. finscaminhão ; Prod. finscavadeira (5)

Uma vez que o processo possui uma maior produtividade, a massa orçada foi realizada em menor tempo. Sendo assim, o ganho pode ser calculado a partir da fórmula, validada pela controladoria, a seguir:

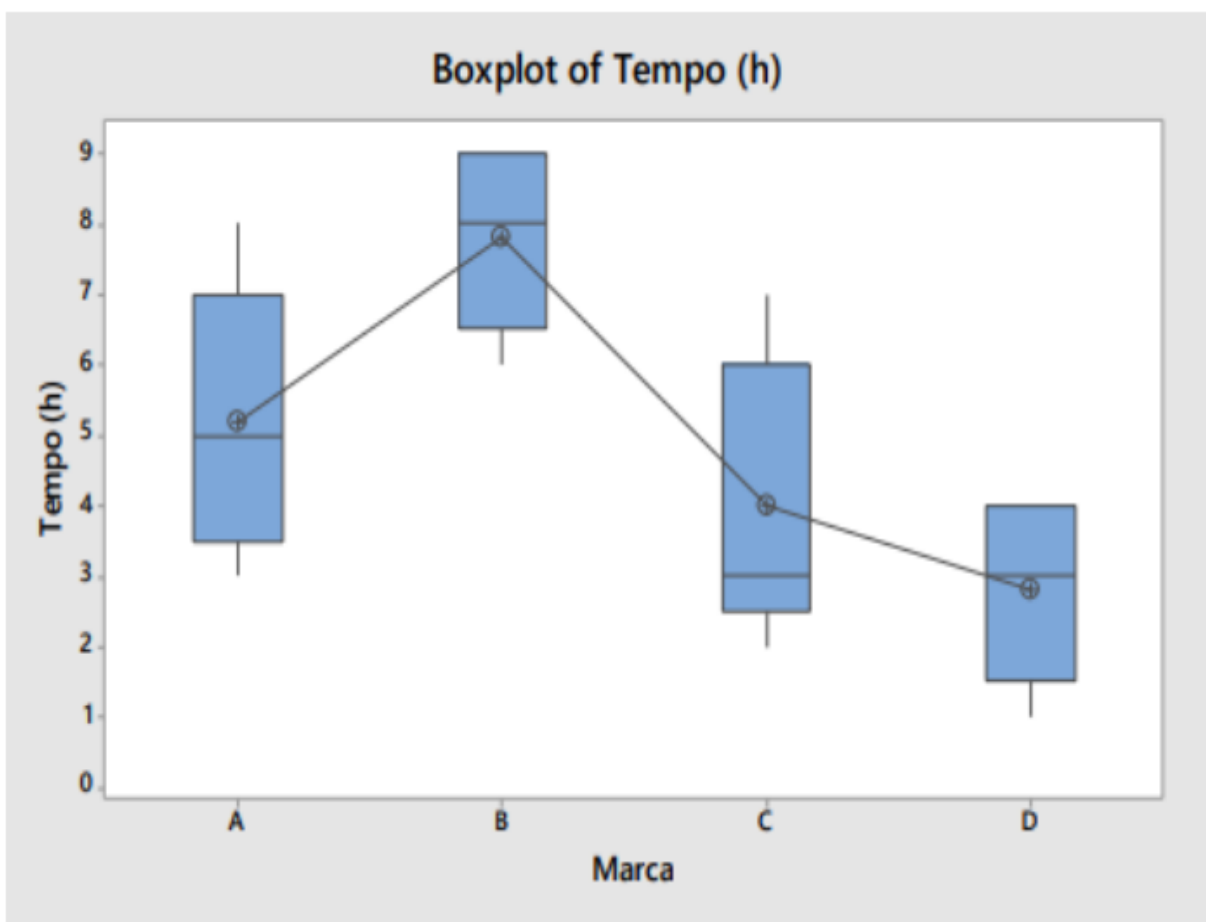
$$\text{Ganho do projeto} = (M_{\text{orçada}} / \text{Prod. ant}) - (M_{\text{orçada}} / \text{Prod. fin}) \quad (6)$$

3.1.1.12. Boxplot

O *Boxplot* (FIGURA 3) se faz útil durante à avaliação da influência de uma potencial fonte de variação (X) em relação à saída do processo (Y), visando analisar se há diferenças nas dispersões de dados.

Dessa forma, o *Boxplot* é uma representação gráfica que possibilita o comparativo entre os comportamentos das saídas do processo (Y) contínua para níveis distintos de uma potencial fonte de variação (X) discreta. Com isso, este gráfico viabiliza tanto a avaliação da tendência central quanto a dispersão da distribuição.

FIGURA 3 – Boxplot



Fonte: Lean Seis Sigma Pocket Book

3.2. TÉCNICAS OPERACIONAIS

3.2.1 Operações de carregamento

Segundo Coutinho (2017), por carregamento entende-se a retirada e carga do material já desmontado da frente de lavra (ponto de origem) conduzindo-o por algum sistema de transporte (por exemplo, caminhões ou correias) para o seu destino final.

A operação de carregamento acontece de modo conjugado ao desmonte da rocha e ao transporte. Portanto, tais operações devem estar bem sincronizadas entre si, pois são interdependentes. Os custos de operação dos equipamentos de carregamento e transporte na lavra convencional representam em torno de oitenta por cento do custo operacional total na lavra (TRUEMAN, 2001; LOPES, 2010).

3.2.2 Transporte por caminhões em mina a céu aberto

O processo de transporte de material realizado por caminhões é o método mais tradicionalmente usado na grande maioria das minas a céu aberto e representa a maior parte do custo operacional da lavra. A busca por um custo operacional competitivo deve estar associada ao aumento da eficiência operacional nesse processo. O custo desse processo é composto pelo alto consumo e elevado preço dos insumos e materiais que os caminhões utilizam, dentre eles diesel, pneus e materiais mecânicos além de custos com mão de obra para operação e manutenção dos equipamentos. O transporte tem operação conjugada com as operações de carregamento, das quais são diretamente dependentes. (COUTINHO, 2017)

Essa etapa possui a finalidade de deslocar o material tendo como ponto de partida a frente de lavra até um destino final previamente determinado. O minério é levado para a planta de beneficiamento enquanto o estéril é transportado para as pilhas de estéril.

4. ESTUDO DE CASO

A Ferro+ é uma unidade do grupo JMendes, empresa brasileira, presente no mercado a mais de 55 anos produzindo minério de ferro. Situa-se na região do quadrilátero ferrífero, nos municípios de Congonhas e Ouro Preto em Minas Gerais. Sua atividade consiste na extração, beneficiamento e comercialização do minério de ferro. A mina possui capacidade produtiva de 5 milhões de toneladas de produtos com alto padrão de qualidade.

Possui uma frota diversificada contando com caminhões e escavadeiras de diferentes marcas e modelos. Se tratando de equipamentos de transporte a empresa

possui os caminhões Scania G480 (FIGURA 4), Scania G500, SANY SKT90S (FIGURA 5) e Volvo A45G (FIGURA 6). As Scanias tem a capacidade de carga útil de 48 toneladas, enquanto a do Volvo é de 41 toneladas e, por fim, o SANY possui 60t. Já para os equipamentos de carga, tem-se escavadeiras Sany 500H (FIGURA 7) tem 54,5 toneladas de peso operacional, já a escavadeiras Sany 750H (FIGURA 8) trabalha na faixa de 76,2 toneldas e a escavadeira Volvo 480D (FIGURA 9) com 47,3 toneladas.

FIGURA 4: Scania G480



Fonte: Adaptado de Pereira (2019)

FIGURA 5: SANY SKT90S



Fonte: Sany, 2023

FIGURA 6: Volvo A45G



Fonte: Volvo, 2023

FIGURA 7: Sany 500H



Fonte: Sany, 2023

FIGURA 8: Sany 750H



Fonte: Sany, 2023

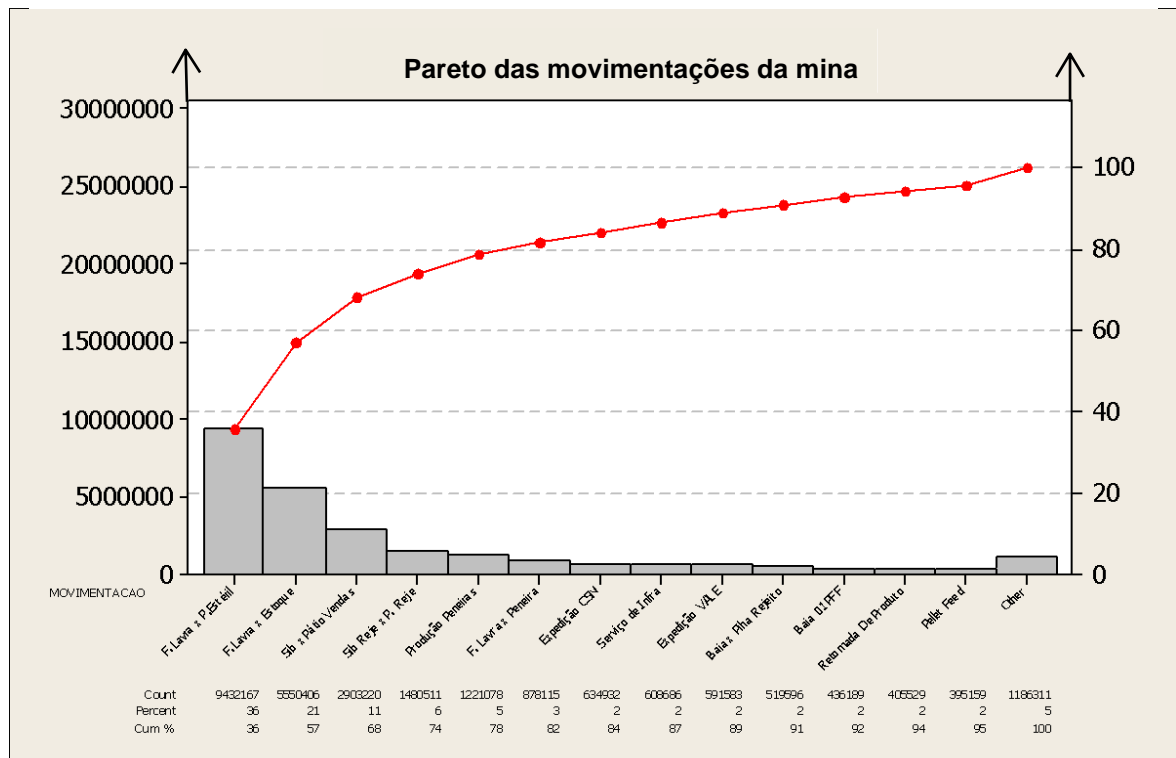
FIGURA 9: Volvo EC480D



Fonte: Volvo, 2023

Para a gerência de operação de lavra, a produtividade dos equipamentos de transporte e carregamento está entre os mais relevantes KPIs. Sendo assim, faz-se necessário o entendimento de quais tipos de movimentações tem potencial de melhoria ao final do projeto, pois existem operações monitoradas pelo sistema de despacho que são muito específicas, tais como limpeza de sump e infraestruturas em geral. Assim, com a utilização do software estatístico *Minitab*®, pode-se observar que as movimentações de ROM e estéril, denominadas abaixo como “F.Lavra x Estoque” e “F.Lavra x Estéril”, são responsáveis por 57% da massa movimentada (FIGURA 10).

FIGURA 10: Pareto de movimentações da mina



Fonte: Acervo do projeto

A atividade da mineração é muito dinâmica e está sempre lidando com oscilações de mercado, portanto é primordial estar atento a todos os fatores que podem influenciar na viabilidade do empreendimento para mantê-lo competitivo, produtivo e economicamente viável. Nesse sentido, é imprescindível realizar o acompanhamento de diversos indicadores que podem influenciar nessa viabilidade, por exemplo, a produtividade dos equipamentos envolvidos na operação e produção de uma mina. (Santos, 2021)

5. RESULTADOS

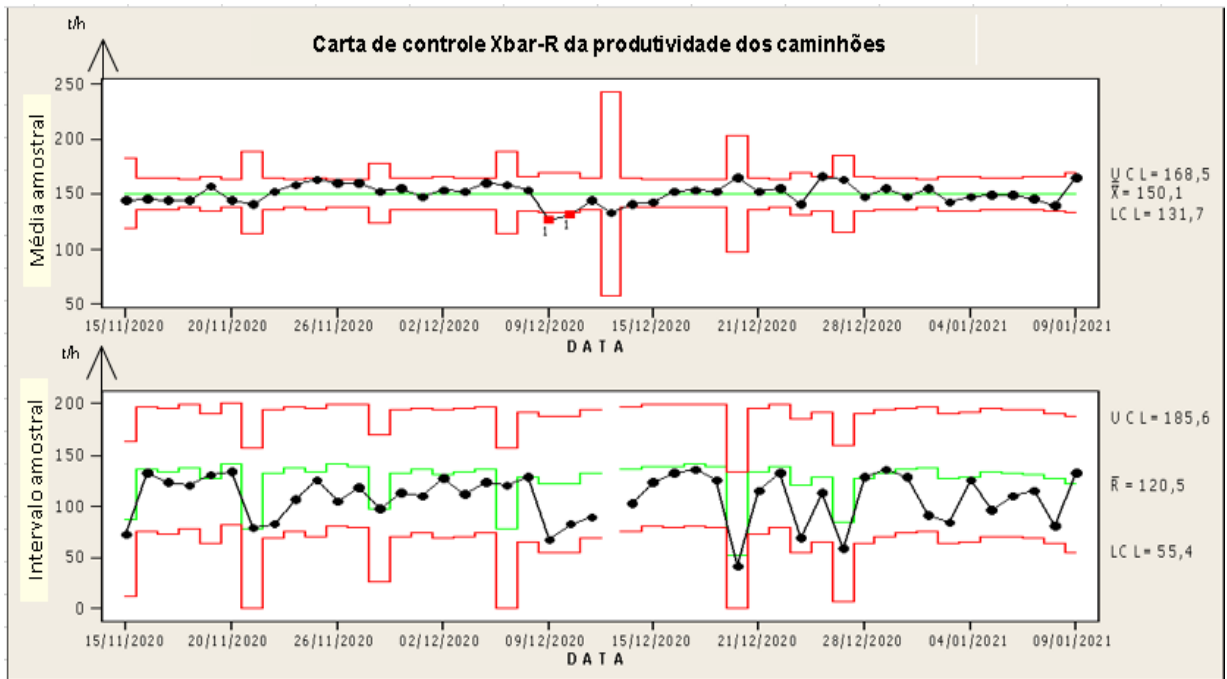
A análise dos dados históricos do indicador, foi utilizada para determinação das metas utilizando bases estatísticas e gráficos provenientes do Minitab. As cartas de controle Xbarra-R para os caminhões (FIGURA 11) e a I-MR para as escavadeiras (FIGURA 12), e o histograma referente a cada um deles (FIGURA 13 e FIGURA 14). Todos os estudos e suas respectivas representações gráficas foram elaborados considerando as produtividades de 15 de novembro de 2020 até 09 de fevereiro de 2021.

A carta de controle Xbarra-R é utilizada quando se possuem subgrupos dentro do banco de dados, afim de sintetizar as informações facilitando as análises de estabilidade e sazonalidade. Avaliando as FIGURAS 11 e 12, verificamos que o processo é estável embora tenha ocorrido em dezembro de 2020 uma instabilidade no processo. A instabilidade no processo é identificada no Minitab como “quebra da regra 1”, ou seja, o KPI atingiu a marca menor que três desvios padrões, que é o limite de controle inferior. A carta de controle abaixo foi construída utilizando a produtividade dos caminhões tendo como subgrupo os dias da semana. Devido a quantidade de dados optou-se pela utilização do Xbarra-R para facilitar as análises. Os limites de controle são definidos pelo próprio software calculando três desvios padrões acima e abaixo da média.

Devido a um número menor de dados dos equipamentos de carga, foi possível a aplicação da carta de controle I-MR para análise de estabilidade e sazonalidade, não necessitando da sintetização por subgrupos. É possível constatar que o processo de carregamento é estável e não possui sazonalidade ao considerarmos os histogramas (FIGURAS 13 e 14). A sazonalidade é avaliada identificando se há 5 ou mais pontos dentro do processo na mesma direção.

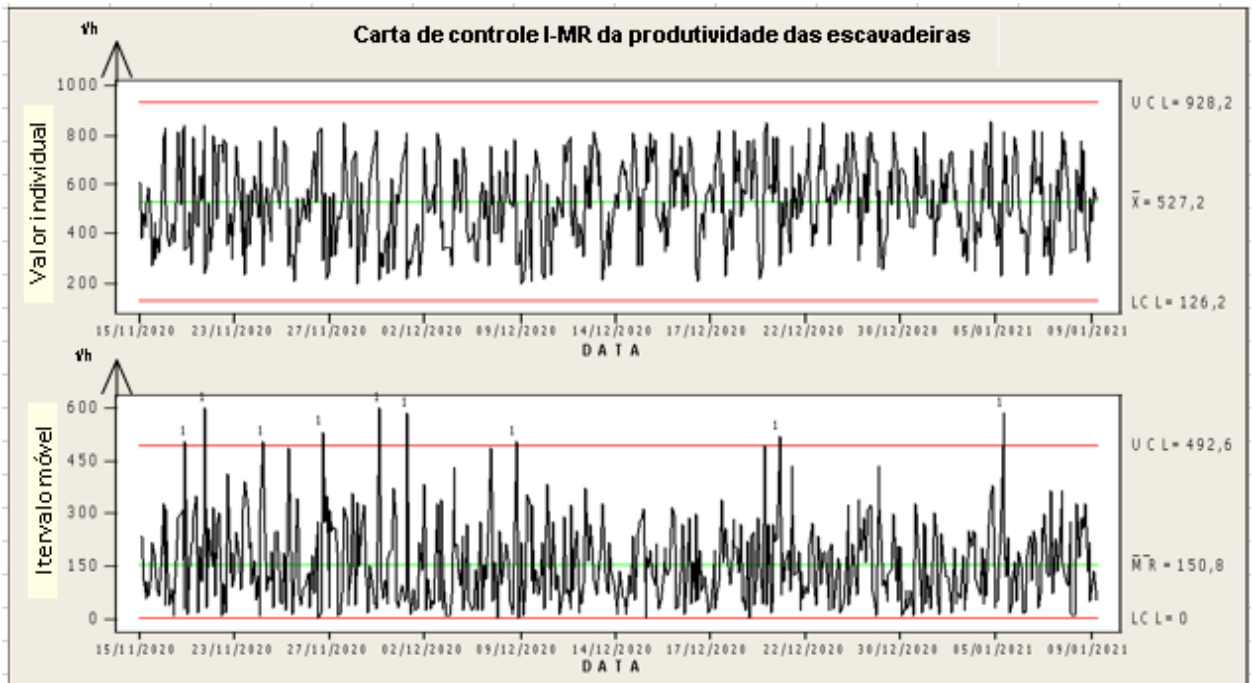
Uma das primeiras análises a se fazer é o gráfico histograma (FIGURA 13 e 14) que nos auxilia no cálculo da média, mediana, quartis, bem como do intervalo de confiança. Para definição da média podem ser utilizados os quartis e/ou o intervalo de confiança, caso o processo seja quanto maior melhor, utiliza-se o terceiro quartil adotado para o processo de transporte descrito nesse trabalho. Para o processo de carregamento, foi utilizado o intervalo de confiança.

FIGURA 11: Histórico de Produtividade Global dos caminhões



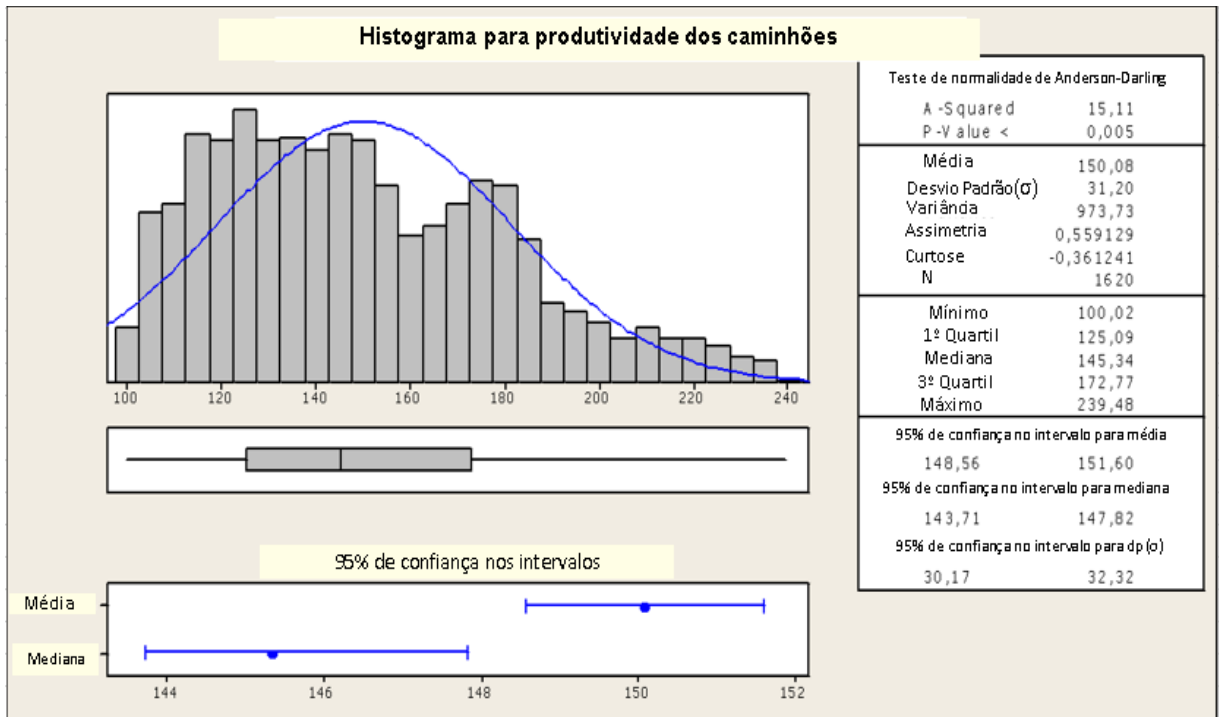
Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 12: Histórico de produtividade efetiva das escavadeiras



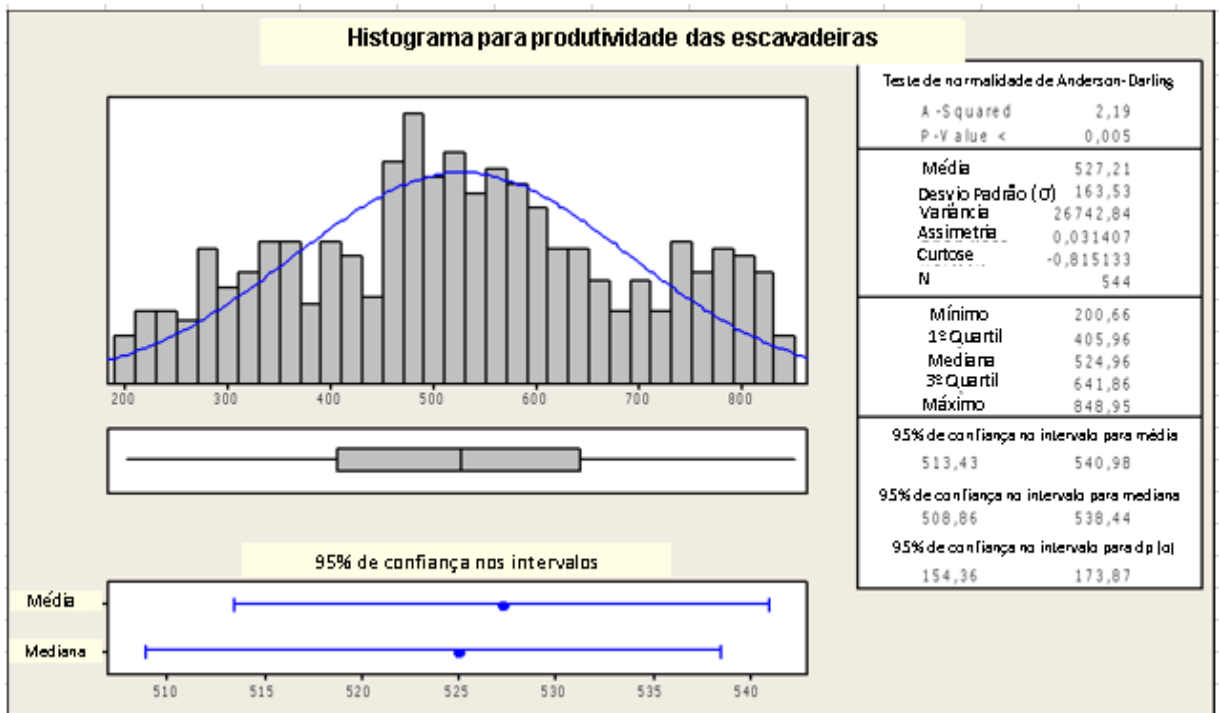
Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 13: Teste de normalidade dos dados de caminhões



Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 14: Teste de normalidade dos dados de escavadeiras



Fonte: Acervo do projeto

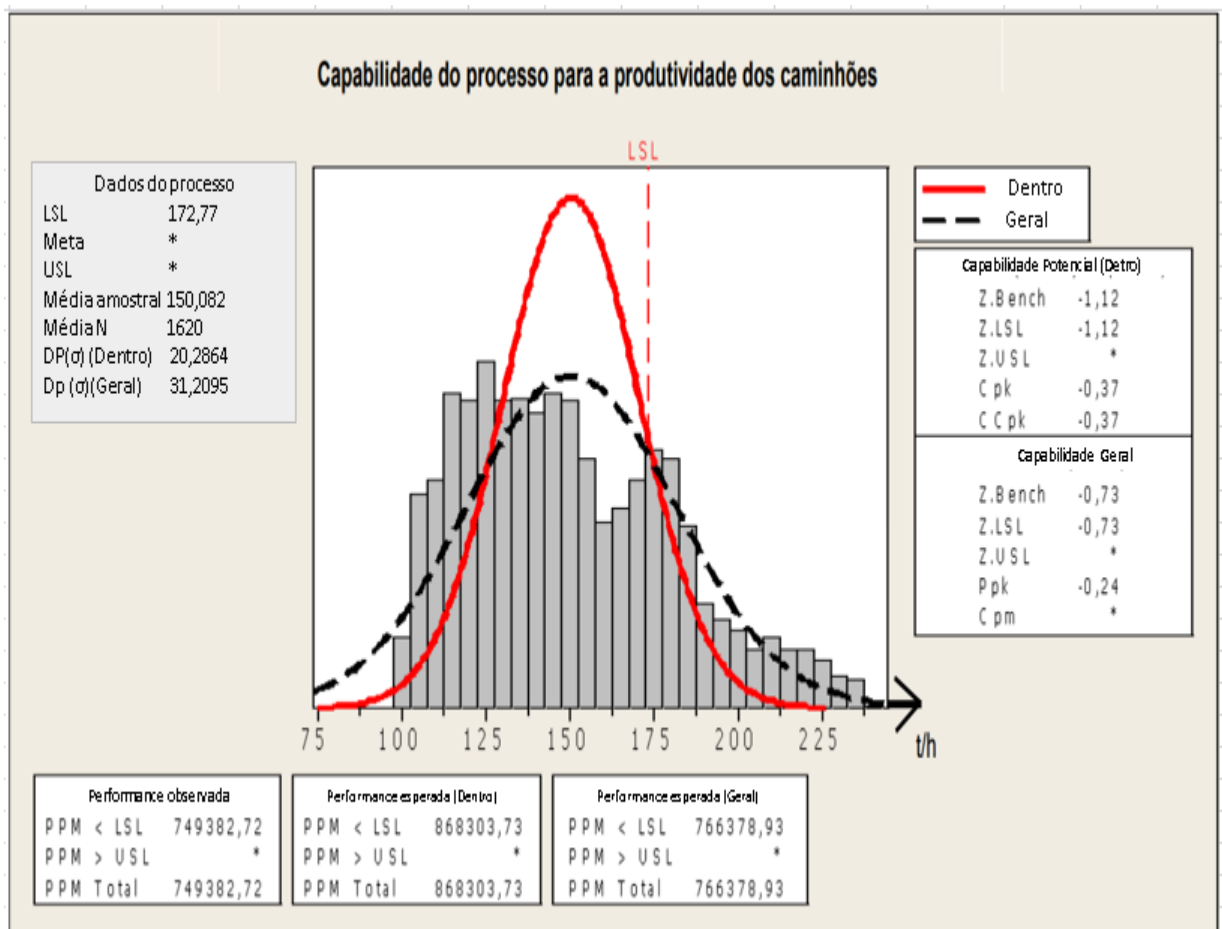
Após avaliação das cartas de controle e dos histogramas definimos um processo estável e sem sazonalidade onde apesar de o “Valor P” ser menor que 0,005, devido ao comportamento do histograma (FIGURAS 13 e 14) em forma de “sino” e um A-Quadrado menor que 30 definimos que os dados são normais, ou seja, previsíveis, justificando a metodologia qualitativa e quantitativa utilizada no trabalho.

A meta de produtividade para os caminhões foi definida em 172,77 t/h que representa o terceiro quartil do histograma. Enquanto, para as escavadeiras, foi definida a meta de 555,6 t/h através do cálculo de confiança média que utiliza os limites máximo e mínimo identificados no teste estatístico.

Após o escopo do projeto finalizado, com meta e ganhos definidos, foi realizada uma análise rigorosa através de várias ferramentas utilizadas na fase Measure do DMAIC para mensurar o problema. Dessa forma, a primeira etapa foi calcular a capacidade (nível sigma) do projeto para ser possível observar o nível de perda do processo. Com isso, obtivemos a capacidade de $0,77\sigma$ para caminhões (FIGURA 15) e $1,33\sigma$ para escavadeiras (FIGURA 16) .

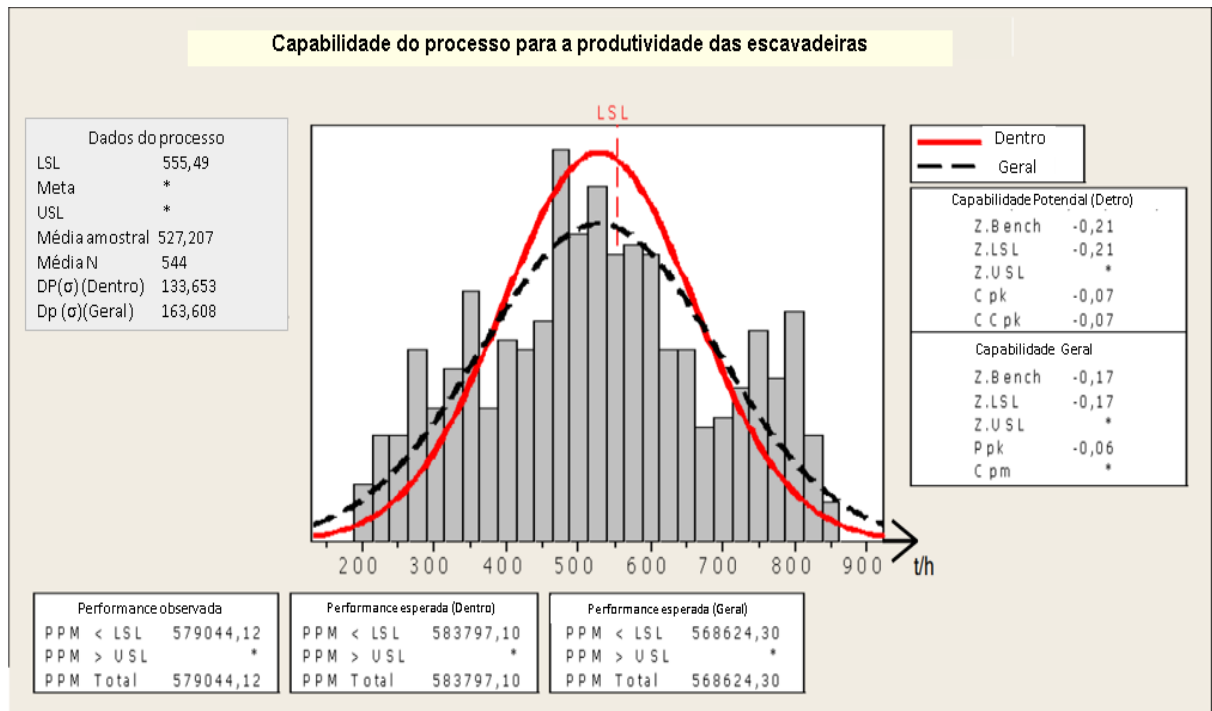
A análise de capacidade possui a finalidade de definir a capacidade do processo de entregar o produto na qualidade que o cliente deseja. Para definição da capacidade soma-se $1,5\sigma$ ao valor obtido no Z-bench do *overall* (geral). Para definição das curvas de within (alcance) e overall entra como input no Minitab é a meta definida no histograma. Observando a disparidade entre as duas curvas (FIGURAS 15 e 16) é possível estabelecer que o processo possui possibilidade de melhora somente através da padronização.

FIGURA 15: Capacidade inicial dos caminhões



Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 16: Capacidade inicial das escavadeiras



Fonte: Acervo do projeto

Ao se analisar a disparidade entre as curvas dos gráficos de capacidade da produtividade das escavadeiras e dos caminhões, é possível perceber que as produtividades esperadas não foram atendidas e, além disso, é possível estabelecer a possibilidade de melhora utilizando somente a padronização dos processos. Criando, dessa maneira, as condições ideais de trabalho para ambos equipamentos afim de evitar qualquer influência negativa sobre o processo.

Dando prosseguimento à fase de medição e análise do DMAIC, visando definir a causa raiz do problema foram geradas análises estatísticas, elaborado um SIPOC e um Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) do processo.

Primeiramente foi elaborado um SIPOC para cada frota (FIGURA 17 e FIGURA 18) para delimitar o escopo do projeto visando dar foco a alguma parte do processo.

FIGURA 17: SIPOC Caminhões

S	I	P	O	C
Suppliers FORNECEDORES	Inputs INSUMOS	Process PROCESSO	Outputs PRODUTOS	Customers CONSUMIDORES / CLIENTES
RH Mina Despacho	Operador/Supervisor/Técnico Chegada dos ônibus Controle de ponto Coleta dos EPIS/lanche Caminhonetes/Microônibus Coleta dos Operadores no campo DDS Ponto de estacionamento dos Equipamentos	Troca de turno/Refeição	Inspeção do Equipamento Distribuição dos Operadores Deslocamento do Equipamento ao ponto de carregamento Sequenciamento da operação Passar rodando	Equipamento de carga
Equipamento de carga	Operador Praça de carregamento de qualidade Litologia Porte do Equipamento de Carga Fila no carregamento	Carregamento	Caminhão Carregado Fator de Enchimento(nº de passes)	Transporte de massa
Transporte de massa	Acesso de qualidade Operador Carga nominal POP	Movimentando Cheio	Material transportado Velocidade média Interferência no trafego	Ponto de basculamento
Ponto de basculamento	Praça de qualidade Equipamento de apoio Manobra de basculamento POP Inclinômetro Fila no basculamento	Basculamento	Empilhamento de material Carga morta Deslocamento de 4m	ROM(Peneira/TM) Pilha de Estéril/Rejeito Expedição
ROM(Peneira/TM) Pilha de Estéril/Rejeito Expedição	Báscula limpa Acesso de qualidade Operador Alocação do caminhão	Movimentando vazio	Retorno ao ponto de carregamento Abastecimento	Equipamento de carga

Fonte: Acervo do projeto

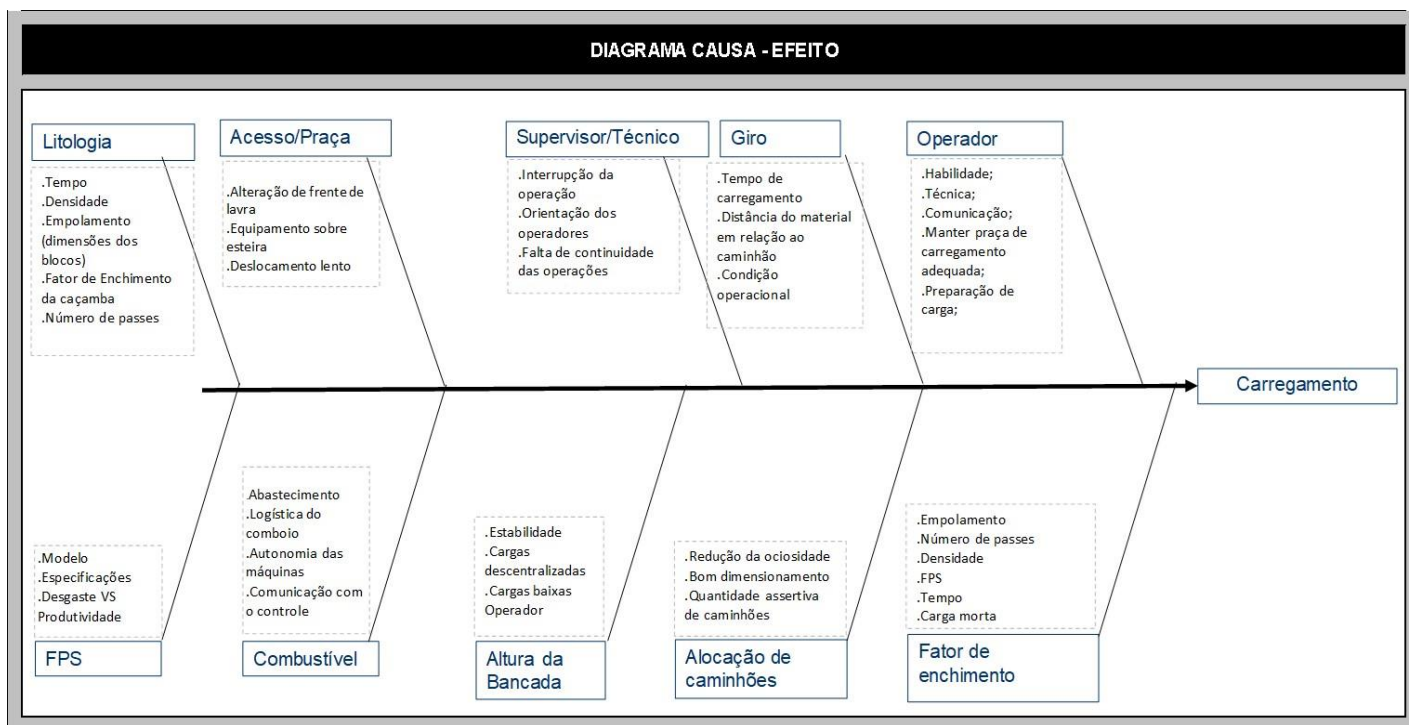
FIGURA 18: SIPOC Escavadeiras

S	I	P	O	C
Suppliers FORNECEDORES	Inputs INSUMOS	Process PROCESSO	Outputs PRODUTOS	Customers CONSUMIDORES / CLIENTES
RH Mina Despacho	Operador/Supervisor/Técnico Chegada dos ônibus Controle de ponto Coleta dos EPIS/lanche Caminhonetes/Microônibus Coleta dos Operadores no campo DDS Acesso da praça de carga	Troca de turno/Refeição	Inspeção do Equipamento Distribuição dos Operadores Sequenciamento da operação Passar rodando	Equipamento de carga
Oficina Outra frente de trabalho	Escavadeira Operador Acesso Combustível(Nível do tanque)	Deslocamento da Máquina	Chegada à frente de trabalho Interferência no tráfego	Frente de carregamento
Frente de carregamento	Planejamento da Operação Operador	Preparação da praça de carregamento	Qualidade do ponto de carregamento(eq. Transporte) Qualidade de bancada (eq. de carga)	Posicionamento da máquina
Posicionamento da máquina	Litologia FPS Altura da bancada Giro Operador Alocação de caminhões Fator de enchimento da concna	Carregamento	nº de passes	Caminhão carregado

Fonte: Acervo do projeto

A construção do diagrama de *Ishikawa* (FIGURA 19) foi iniciada a partir da definição de qual problema (efeito) será analisado e constará na ponta da seta do diagrama. A partir disso, são definidas as (causas) categorias e entradas do processo, através de um brainstorm, sendo posicionadas em linhas diagonais no corpo da seta central. Ao final da elaboração, é possível ter uma visão sistêmica do processo e identificar pontos de atuação.

FIGURA 19: Diagrama de Ishikawa



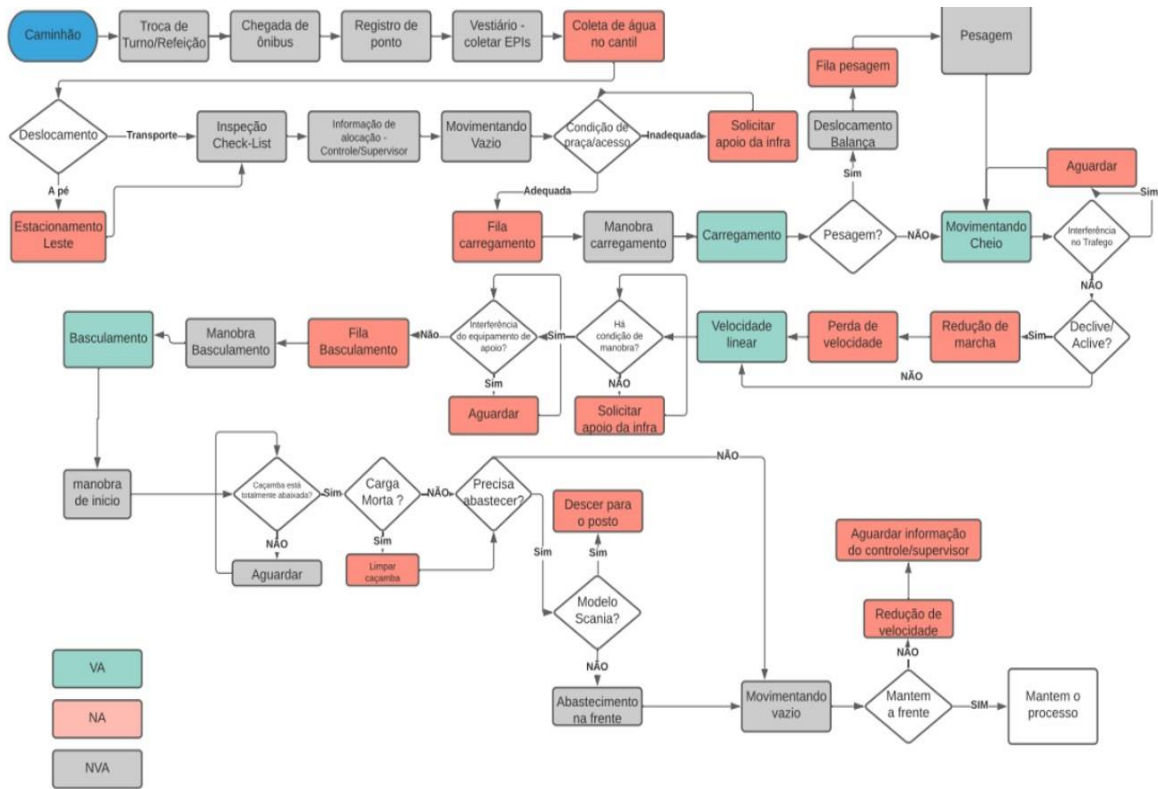
Fonte: Acervo do projeto

Após análise do diagrama, pode-se concluir que as principais causas que interferem no processo de carregamento estão posicionadas diagonalmente ao corpo principal da seta e são elas: a litologia do material devido às diferenças de característica dos materiais e a forma de lidar com cada um; a ferramenta de penetração de solo (FPS) mais indicado para a operação; as condições dos acessos e das praças de carregamento pois em más condições afetam o tempo de deslocamento dos equipamentos; a forma mais adequada para realizar os abastecimentos dos equipamentos levando em consideração as suas autonomias; às instruções de supervisores e/ou técnicos que causam paradas nas operações; definição da melhor altura de bancada com o intuito de gerar estabilidade, cargas descentralizadas e que gerem menor impacto no operado; definição do melhor ângulo de giro para haver a melhor condição operacional e menor tempo de carregamento; quantidade de caminhões alocados no equipamento de carga visando a diminuição da ociosidade das escavadeiras; o grau de habilidade, técnica e treino dos operadores

para conseguirem realizar serviços auxiliares necessários ao processo enquanto não estiverem operando; e, por fim, o fator de enchimento que será influenciado pelo número de passes que será necessário realizar e também pelo fato de existir, ou não, carga morta nos caminhões.

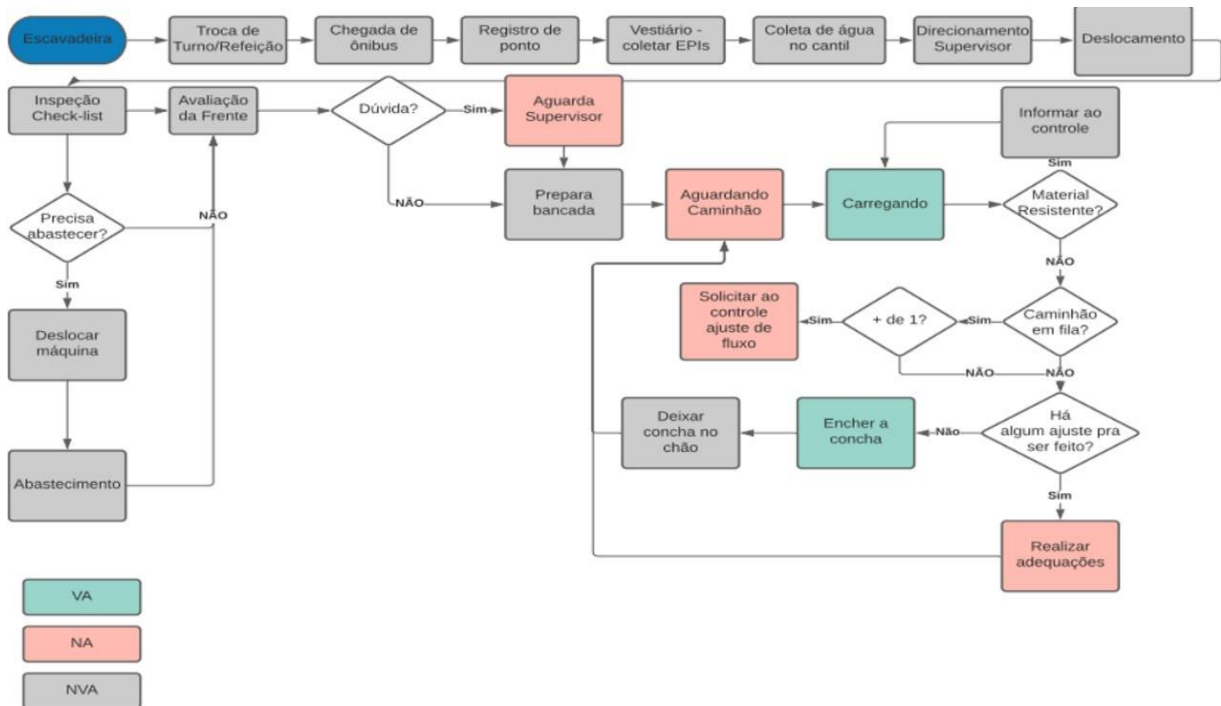
Visando mapear o fluxo de valor, foi realizado um mapa de cadeia de valor denominado de Value Stream Map, ou também VSM (FIGURA 20 e 21), com o intuito de analisar o processo de maneira mais ampla e definir quais são as etapas que realmente são importantes e quais podem ser excluídas sem que ocorra perdas significativas.

FIGURA 20: Value Map Stream Caminhões



Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 21: Value Map Stream Escavadeiras



Fonte: Acervo do projeto

Após a classificação das etapas, é possível encontrar onde ocorrem perdas (etapas NA) durante o processo e, assim, elaborar planos de ações afim de mitigar e/ou findá-las.

Entre os estudos estatísticos foram realizados os de estabilidade, variabilidade, comparação, priorização e correlação. A partir da análise dos gráficos de capacidade, histogramas provenientes do Minitab juntamente ao SIPOC, diagrama de Ishikawa e VSM foi concluído que o processo era estável, não havendo variação nos dias da semana ou entre os turnos, e que apenas ocorria variação acentuada quando se tratava dos modelos de equipamentos devido à diferença de porte.

Foram identificadas todas as causas, através de todo o processo de produção da mina, que influenciam na produtividade. Foi necessário gerar uma matriz de causa x efeito (FIGURA 22) com o intuito de identificar os principais X's (causas), que possuem maior correlação com o efeito (Y).

A elaboração da matriz foi realizada com o apoio do staff da gerência de operações de mina. Essas pessoas tiveram que avaliar o impacto que as causas listadas possuem sobre a redução da produtividade dos equipamentos em quatros níveis de correlações: Muito forte (9), forte (6), moderada (3) e fraca (1). Quanto maior a avaliação recebida pelo X, maior impacto ele terá sobre o Y estudado.

FIGURA 22: Matriz causa e efeito

MATRIZ DE CAUSA E EFEITO										
Aumento da produtividade em equipamentos de carga & transporte – Escavadeira e Caminhões na Ferro*										
Operação de Lavra										
Nº	Saída(s) do processo (Y): Nome do(s) participante(s) da votação: Possíveis Xs do processo (causas)	PROBLEMA PRIORITÁRIO								TOTAL
		Redução da produtividade								
		Rodrigo	Luz	Zaqueu	Ely	Wislen	Caio	Renado	Parreira	
1	Padronizar a troca de turno	9	9	6	6	6	6	9	9	60
2	Controlar a chegada dos ônibus	9	9	3	3	3	6	9	9	51
3	Instalar registro de ponto no escritório novo	3	9	3	3	6	3	9	9	45
4	Eliminar Armários	6	9	6	6	6	6	3	9	51
5	Finalizar distribuição de mochilas	6	9	3	3	6	3	3	9	42
6	Eliminar o Check-list de papel	6	3	1	9	6	6	3	9	43
7	Instalar Balança nas escavadeiras	3	3	3	3	9	9	6	9	45
8	Aumentar para 5% as pesagens internas	1	6	1	1	3	9	3	6	30
9	Controlar KPI Km cheio/KM vazio	9	6	6	3	9	9	6	6	54
10	Padronizar as configurações dos rádios	6	1	6	3	1	6	3	6	32
11	Uso de celular na mina	9	9	3	1	1	3	1	1	28
12	Fator de enchimento da caçamba	9	9	6	3	9	9	3	9	57
13	Número de passes	9	9	9	6	9	9	3	9	63
14	Velocidade média	9	9	9	3	6	3	9	6	54
15	Grade do acesso	9	9	6	6	9	9	6	9	63
16	Largura do acesso	9	9	9	6	9	6	6	9	63
17	Condição do piso	9	6	6	6	9	6	6	9	57
18	Despacho otimizado	9	6	9	9	9	6	9	6	63
19	Preferência pelo caminhão carregado	9	3	6	6	9	9	6	6	54
20	DMTs longas	9	9	3	9	6	3	3	9	51
21	Melhoria de sinal do smartmine	6	6	6	9	1	6	3	9	46
22	SETUP do inclinômetro	1	6	3	6	6	3	3	9	37
23	Utilização do rolo nas frentes de carregamento e basculamento	3	6	6	3	6	6	1	3	34
24	Pré-manobra	6	9	6	6	6	9	9	9	60
25	Volume de concha	9	9	3	6	9	9	9	9	63
26	Padronização da manobra	3	6	3	3	6	6	3	6	36
27	Automatização da manobra	6	9	3	6	6	9	3	3	45
28	Cerca virtual de velocidade	6	1	3	3	6	3	3	6	31
29	Continuidade de operação	6	9	6	9	6	6	6	9	57
30	Altura da bancada	9	6	9	6	6	9	9	9	63
31	Ângulo de giro	9	9	9	9	9	9	9	9	72
32	Preparação de carga	6	9	6	3	9	9	6	6	54
33	Desgaste do FPS	6	6	6	3	6	6	9	6	48
34	Alocação de caminhões	9	9	9	6	6	9	9	9	66
35	Carga morta	6	3	6	6	6	6	3	9	45

LEGENDA: 9 - Correlação Muito Forte 6 - Correlação Forte 3 - Correlação Moderada 1- Correlação Fraca

Fonte: Acervo do projeto

Foi elaborada uma matriz esforço x impacto (FIGURA 23) visando a determinação de quais variáveis seriam contempladas no projeto. Com o intuito de otimizar tempo e esforços, optou-se por investir nas ações que possuem alto impacto e um baixo esforço, pois ações com o alto esforço normalmente necessitam de maiores investimentos e ações com baixo impacto não resultam em melhoras significantes.

FIGURA 23: Matriz esforço x impacto

MATRIZ DE ESFORÇO x IMPACTO			
Aumento da produtividade em equipamentos de carga & transporte – Escavadeira e Caminhões na Ferro+			
Operação de Lavra			
MATRIZ DE ESFORÇO x IMPACTO			
ESFORÇO	ALTO	Número de passes	Balança
		Largura do acesso	Controlar a chegada dos ônibus
		Continuidade de operação	SETUP do inclinômetro
		Despacho otimizado	Cerca virtual de velocidade
		DMTs longas	Uso de celular na mina
		Automatização da manobra	
ESFORÇO	BAIXO	ângulo de giro	Fator de enchimento da caçamba
		Alocação de caminhões	Desgaste do FPS
		Grade do acesso	Melhoria de sinal do smartmine
		Volume de concha	Carga morta
		Altura da bancada	
		Padronizar a troca de turno	
		Pré-manobra	
		Condição do piso	
		Velocidade média	
		Preferência pelo caminhão carregado	Aumentar para 5% as pesagens
		Preparação de carga	
		Instalar registro de ponto no escritório novo	
		Eliminar Armários	
		Eliminar o Check-list de papel	
		Finalizar distribuição de mochilas	
		Padronização da manobra	
		Controlar KPI Km cheio/KM vazio	
		Utilização do rolo nas frentes de carregamento e basculamento	
		Padronizar as configurações dos rádios	
		ALTO	BAIXO
		IMPACTO	

Fonte: Acervo do projeto

Após a tomada de decisão sobre os principais problemas a serem abordados, visando garantir a melhora dos processos através da padronização, foram realizadas ações para mitigar e/ou eliminar as ocorrências que estavam impactando negativamente no processo. Podemos agrupar as ações em três grupos, sendo eles: Mudanças de layout operacional, sistema de despacho e ajuste nos equipamentos.

5.1 MUDANÇAS DE LAYOUT OPERACIONAL

Inicialmente, dando-se início à série de padronizações, foi realizada uma melhoria dos acessos da mina através do aproveitamento de materiais descartados da usina (FIGURA 24). Tal material possuía granulometria conhecida por se tratar de refugo de classificação proveniente da usina.

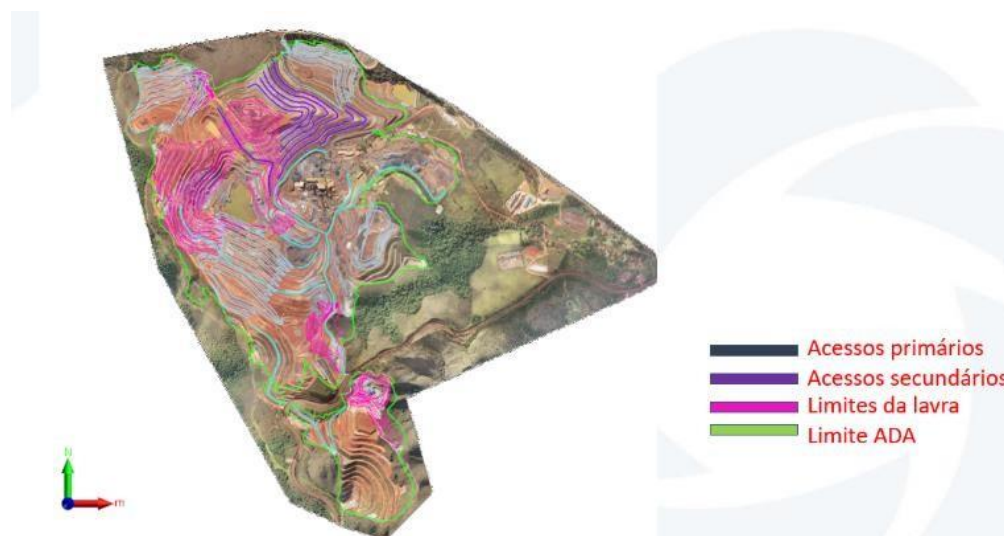
FIGURA 24: Acesso da mina após mudança



Fonte: Acervo do projeto

Foi realizado o mapeamento, classificação e definido um cronograma para manutenção dos acessos da mina (FIGURA 25). Os acessos de frente de lavra ou descarte, por serem os principais, possuem manutenção diário, os primários (encontram-se a 100 metros dos acessos de lavra) trimestralmente e, por fim, os secundários (estão a mais de 100 metros dos acessos de lavra) semestralmente.

FIGURA 25: Classificação dos acessos



Fonte: Acervo do projeto

Outra necessidade foi a definição de entradas e saídas nas áreas de basculamento de ROM da usina e abastecimento dos equipamentos, que eram realizadas de maneira despadronizada (FIGURA 26).

Para o basculamento de ROM usina, além de evitar a aproximação de um equipamento do outro, a uniformização do procedimento fez com que os ciclos pudessem ser melhor ajustados ao se definir a entrada e saída dos caminhões nas pilhas de ROM (FIGURA 27). Tendo as rotas mais bem definidas, foi possível controlar melhor a condição de filas durante o basculamento.

FIGURA 26: Área de basculamento ROM antes da padronização



Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 27: Área de basculamento após padronização



Fonte: Acervo do projeto

Da mesma forma, objetivando ordenar o abastecimento dos equipamentos, foi estabelecido pontos de abastecimento em locais estratégicos na mina para dar maior celeridade ao processo e, com isso, evitar filas no posto de gasolina da empresa fazendo com que as frotas fiquem mais tempo executando suas atividades (FIGURA 28).

FIGURA 108: Abastecimento por comboio



Fonte: Acervo do projeto

5.2. SISTEMA DE DESPACHO

Nas últimas décadas, a redução no custo de transporte foi alcançada principalmente por economia de escala, com o aumento do porte dos caminhões. Porém, devido ao gigantismo da indústria, os equipamentos chegaram próximo ao limite de tamanho. As oportunidades de redução de custo estão ligadas às possibilidades de aumento de produtividade com o gerenciamento ótimo do sistema de despacho na alocação de caminhões (MENA et al, 2013).

Com o intuito de robustecer o sistema de despacho, os estados passaram a ter definições lógicas entre si criando um ciclo dentro do próprio sistema. O sistema só poderá registrar movimentação vazio após acionar o basculamento e o mesmo aconteceria para os estados carregando e movimentando cheio (FIGURA 29).

FIGURA 156: Tela de apontamento de estados do sistema de despacho



Fonte: SmartMine®

Ao estabelecer esses critérios, obteve-se maior confiabilidade e assertividade dos dados provenientes do sistema de despacho.

5.3. AJUSTES NOS EQUIPAMENTOS

Outro inconveniente durante as operações foi a presença de carga morta nos caminhões, principalmente nos que se encontravam realizando transporte de estéril. A carga morta, normalmente argila ou terra que ficam aderidos à balsa, faz com que o caminhão não consiga desempenhar da melhor forma possível devido à perda de capacidade de carga, assim como causa o aumento da quantidade de horas paradas caso seja necessário lavar a balsa para retirar o material da caçamba.

Com o intuito de colocar um fim a essa situação, foi realizado a pesquisa no mercado de forros para as caçambas dos caminhões. Após encontrar o forro ideal, foram instalados e reduziram a zero o problema da carga morta (FIGURA 30).

Desse modo, os caminhões passaram a utilizar cem por cento de sua capacidade de carga durante as operações.

FIGURA 332: Caçambas de caminhões forradas



Fonte: Acervo do projeto

5.4. RESULTADOS OBTIDOS APÓS AS AÇÕES

Para critério comparativo, foram levantadas as massas realizadas de minério lavrado para a alimentar a usina denominada de “ROM”, para suprir as peneiras foi chamado de “ROM Peneira” e a quantidade de estéril extraída (TABELA 3). A partir disso, foi possível obter a produtividade tanto das escavadeiras quanto dos caminhões. Para a realização deste trabalho foi estipulada como as médias dos primeiros quatro meses do ano.

Tomou-se como base para os equipamentos de carga a produtividade de 475.40 *t/h* e para os caminhões 145.34 *t/h* para realizar os cálculos do ganho do projeto realizado.

Tabela 83: Dados anteriores ao projeto

MÊS	ROM	ROM PENEIRA	ESTÉRIL	PROD. CARGA	PROD. TRANSPORTE
Janeiro	463,967.75	50,382.44	835,166.70	475.16	125.30
Fevereiro	409,546.62	52,237.67	590,368.07	473.00	139.99
Março	428,205.22	68,365.62	766,859.50	446.92	153.33
Abril	545,113.80	83,318.97	838,142.52	506.52	162.74

Fonte: Acervo do projeto

Ao final da implantação das ações, foram coletados os dados referentes à quantidade de minério extraído tanto para alimentar a usina (“ROM”) quanto para as peneiras (“ROM Peneiras”) (TABELA 4), além do estéril produzido durante os meses de maio até dezembro do mesmo ano. Tais informações permitiram calcular a produtividade dos equipamentos de carga e de transporte, elaborar a tabela X e, assim, confrontá-los com os obtidos anteriormente.

Tabela 4: Dados após a implantação do projeto

MÊS	ROM	ROM PENEIRA	ESTÉRIL	PROD. CARGA	PROD. TRANSPORTE
Janeiro	494,959.51	55,205.70	767,089.90	650.70	183.67
Fevereiro	445,527.38	71,814.40	859,190.92	565.70	182.95
Março	493,566.22	65,545.45	1,058,747.68	649.70	189.83
Agosto	477,701.67	76,737.57	908,097.63	614.40	178.82
Setembro	491,740.13	63,702.58	883,437.53	650.50	180.89
Outubro	464,015.88	60,181.90	617,609.46	626.60	179.89
Novembro	469,079.32	52,434.68	708,243.57	615.03	173.67
Dezembro	432,330.06	58,942.94	596,635.89	619.65	173.32

Fonte: Acervo do projeto

Pode-se perceber a melhoria da produtividade dos equipamentos de carregamento e de transporte ao confrontar os dados adquiridos antes e após a implantação do projeto, referentes aos meses do ano de 2021, antes e depois da aplicação das melhorias.

Para comparar a efetividade, houve um cálculo de um delta de horas (TABELA 5) em que os equipamentos realizariam uma mesma massa orçada considerando as produtividades anteriores e após ao projeto. Percebe-se que antes da implantação do projeto, havia um enorme gasto de horas para realizar uma massa orçada previamente definida. No primeiro trimestre teve-se uma média de 60,67h nos equipamentos de carga e 436,26h nos de transporte a mais para conseguir realizar o previsto. Tomando-se o mês de abril como ponto de partida de desenvolvimento das ações, pode-se perceber a evolução que o processo demonstrou nos meses seguintes. As escavadeiras conseguiram realizar a massa orçada com uma diminuição de 708,59h em média, enquanto para os caminhões houve uma redução média de 1793,98h.

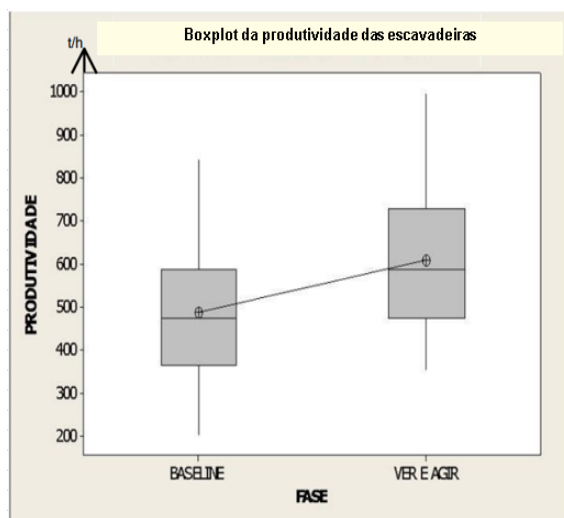
Tabela 5: Delta de horas por tipo de equipamento

MÊS	Delta Horas (h)	
	CARGA	TRASPORTE
Janeiro	-1.44	-1485.18
Fevereiro	-11.21	-276.61
Março	-169.36	453.02
Abril	177.76	1011.94
Mai	746.47	1891.41
Junho	799.39	1947.03
Julho	912.61	2586.37
Agosto	696	1884.04
Setembro	814.71	1945.65
Outubro	579.56	1508.86
Novembro	587.26	1380.09
Dezembro	532.72	1208.39

Fonte: Acervo do projeto

Para se comprovar estatisticamente a melhoria em relação ao processo foi realizado o teste *Two-Sample T* (FIGURA 31 e FIGURA 32) para realizar a comparação entre as médias das produtividades anteriores ao projeto (*baseline*) e as médias após as ações tomadas. Ao avaliar o Valor-P menor que 0,05, comprova-se a mudança estatística no processo e rejeita-se a hipótese nula (as mudanças não ocorreram ao acaso). Sendo que a produtividade média das escavadeiras atingiu o patamar de 622,83 *t/h* (FIGURA 33) e dos caminhões de 179,21 *t/h* (FIGURA 34).

FIGURA 380:Boxplot escavadeiras



Two-Sample T-Test and CI: PRODUTIVIDADE; FASE

Two-sample T para PRODUTIVIDADE

FASE	N	Média	Dp (σ)	Erro médio
BASELINE	598	475	155	6,4
VER E AGIR	735	622	162	6,0

Difference = mu (BASELINE) - mu (VER E AGIR)

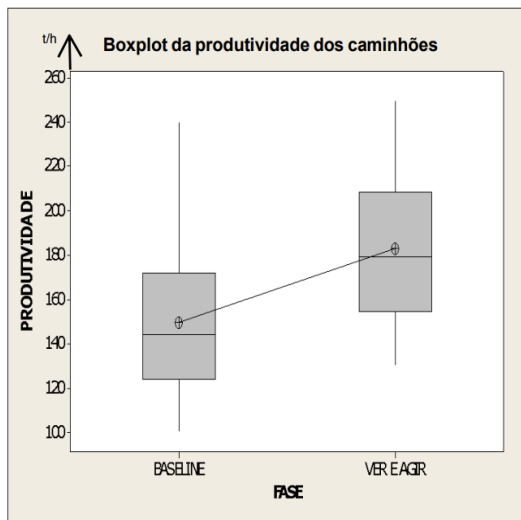
Diferença estimada: -121,892

95% interval de confiança para diferença:
(-139,001; -104,783)

T-Test da diferença = 0 (vs não =): T-Value = -13,98 P-Value = 0,000 DF = 1295

Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 32 - Boxplot dos caminhões



Two-Sample T-Test and CI: PRODUTIVIDADE; FASE

Two-sample T para PRODUTIVIDADE

FASE	N	Média	Dp (σ)	Erro médio
BASELINE	3440	145,34	32,1	0,55
VER E AGIR	2181	179,21	32,9	0,70

Difference = μ (BASELINE) - μ (VER E AGIR)

Diferença estimada: -33,0844

95% intervalo de confiança para diferença:
(-34,8315; -31,3373)

T-Test da diferença = 0 (vs não =):

T-Value = -37,12

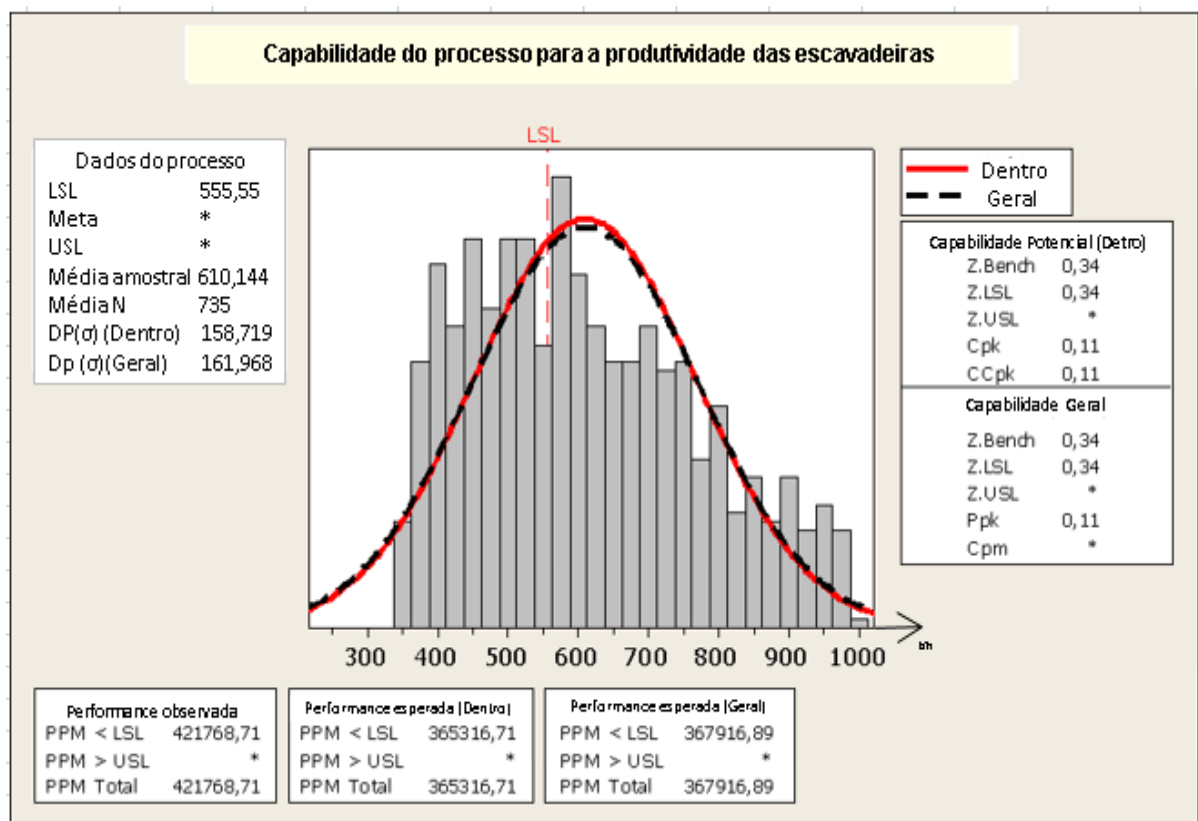
P-Value = 0,000

DF = 4551

Fonte: Acervo do projeto

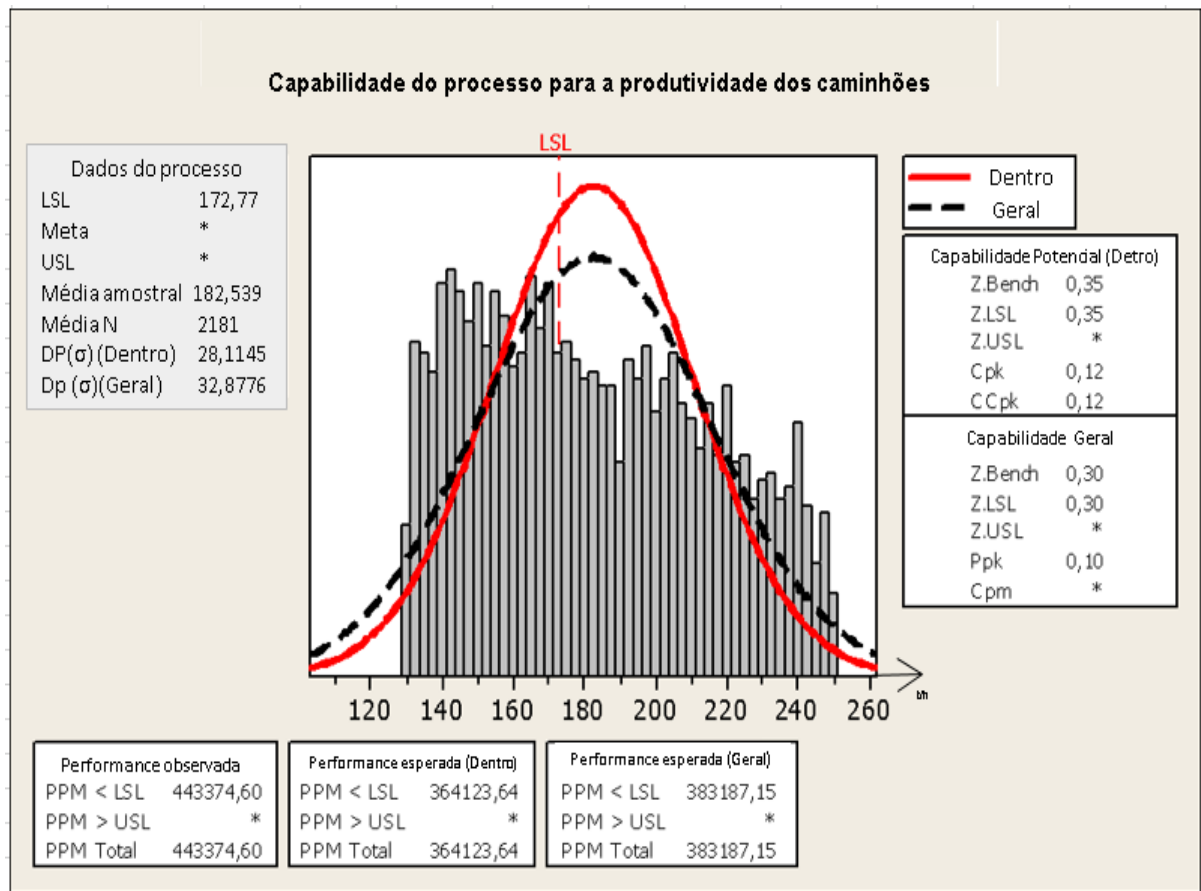
Após a rejeição da hipótese nula através do teste Two-Sample T, é viável assumir que houve um aumento da capacidade (nível sigma), número que mede a quantidade de perdas por milhão, atingiu $1,84\sigma$ para escavadeiras (FIGURA 33) e $1,8\sigma$ para caminhões(FIGURA 34).

FIGURA 33: Capacidade das escavadeiras após o projeto



Fonte: Acervo do projeto

FIGURA 34: Capacidade dos caminhões após o projeto



Fonte: Acervo do projeto

Devido ao fato de as ações terem sido implementadas concomitantemente, não foi possível medir os impactos na produtividade dos caminhões e das escavadeiras de forma individual. Entretanto, pode-se afirmar que a padronização baseada na metodologia *Lean Seis Sigma* trouxe melhorias para o processo. Isso também pode ser visto ao se analisar a proximidade entre as linhas de alcance (*within*) e geral (*overall*) presentes nos gráficos das capacidades acima. Pode ser afirmado que o processo ficou mais confiável estatisticamente e, conseqüentemente, mais produtivo.

6. CONCLUSÃO

Ao utilizar a metodologia do *Lean Six Sigma* é possível observar melhor os problemas existentes em quaisquer processos. Dessa forma, ao se aplicar na mineração, iremos dispor de diversas ferramentas para definir, medir e analisar um determinado problema e, conseqüentemente, elaborar um projeto de melhoria contínua sobre ele.

No estudo de caso deste trabalho, o uso do LSS e as ações tomadas durante à execução do projeto fez com que fosse possível aumentar a produtividade das frotas de transporte e carga do empreendimento.

Analisando cada ação individualmente podemos estabelecer em quais KPIs foram obtidos ganhos relevantes para o resultado final.

A melhoria/manutenção dos acessos foi significativa para a velocidade média, sendo que com acessos com melhores forros e mantidos com determinada frequência os equipamentos podem desenvolver da melhor forma.

A padronização da manobra de basculamento de ROM para a usina fez com que, além aumentar a segurança ao determinar o local de entrada e de saída dos caminhões, fosse diminuída o tempo em filas provenientes da não padronização.

A definição de locais específicos na mina para os equipamentos se deslocarem para serem abastecidos pelo caminhão comboio permitiu que os equipamentos pudessem ser abastecidos em menor tempo do que se precisassem se deslocar até o posto de gasolina. Conseqüentemente, houve ganhos em horas trabalhadas.

Após a definição lógica entre os estados do sistema de despacho, os dados passaram a ter uma maior confiabilidade e assertividade.

Ao realizar o ajuste nos equipamentos de transporte, colocando forro em suas caçambas, deu-se fim ao problema da carga morta e essa frota passou a utilizar integralmente sua capacidade de carga.

Desse modo, ao analisarmos as conquistas do presente trabalho, pode-se dizer que foi um sucesso pois foram atingidos tanto os objetivos gerais quanto os específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, Caio Torres de. Proposta de redução da variabilidade do teor de ferro na alimentação do primeiro estágio da concentração magnética através da metodologia Lean Seis Sigma. Ouro Preto: DEMIN/UFOP, 2021

COUTINHO, Heitor Lobo. Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral): Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DANTAS, Ana Carolina Cardoso et al. Aplicabilidade da metodologia seis sigma para a diminuição da ocorrência de infecções vulvovaginais. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 7523:7538, 2021

DIAS, S. M. 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. 2011

DOMENECH, C. Estratégia Lean Seis Sigma. 1ª Edição. São Paulo: M. I. Domenech, 2015.

GELDERMAN, C. e WEELE, A. V. Purchasing Portfolio Models: A Critique and Update. Journal of Supply Chain Management 4. P 19:28. 2011.

GEORGE, M.; Rowlands, D.; Price, M.; MAXEY, J. Lean Six Sigma Pocket Book. 2005.

LOPES, J. R. Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel "In Pit" auto propelido. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil. 2010.

Masuti, P. M., & Dabade, U. A. (2019). Lean manufacturing implementation using value stream mapping at excavator manufacturing company. Materials Today: Proceedings, (xxxx), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.740>.

MENA, R.; ZIO, E.; KRISTJANPOLLER, F.; ARATA, A.; Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. International Journal of Mining Science and Technology. 113– 119. 2013.

NT Desenvolvimento Gerencial. Introdução Lean Seis Sigma Champion. Apostila do treinamento.

PEREIRA, Bruno Inácio. Seleção e dimensionamento da frota de carregamento via simulação estudo de caso mina Ferro+ Mineração. 2019. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

Pinto, J. P. (2014). Pensamento Lean: A filosofia das organizações vencedoras. Lisboa: Lidel.

RODRIGUES, Jéssica Dias. Proposta de melhoria da produtividade da escavadeira Liebherr R 954 SME através da metodologia Lean Seis Sigma. 2018. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas): Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

RODRIGUES, Marcus Vinicius. Ações para a qualidade GEIQ: Gestão integrada para a Qualidade: Padrão Seis Sigma – Classe Mundial. 2 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

Santos, João Victor de Castro. Análise e acompanhamento do desempenho dos equipamentos de transporte da mineradora Ferro+ Mineração com o KPI movimentando cheio / movimentando vazio. Ouro Preto: DEMIN/UFOP, 2021

SUZUKI, T. New Directions for TPM Cambridge, Massachussetts: Productivity Press, 1992. p. 133:141,

TRUEMAN, E. In pit crushing: tha application and benefits of track mounted crushing equipment. Goldfields mining expo. Wertern Austrália. 2001.

WERKEMA, C., 2004. Criando a Cultura Seis Sigma. Belo Horizonte: Werkema Editora.

WERKEMA, Cristina. Criando a Cultura Lean Seis Sigma. Elsevier Brasil, 2012.