



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



ISABELA MARA DE OLIVEIRA

**AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DA FROTA DE CAMINHÕES FORA DE
ESTRADA POR MEIO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ABASTECIMENTO
EM OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO**

**Ouro Preto - MG
2026**

ISABELA MARA DE OLIVEIRA

**AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DA FROTA DE CAMINHÕES FORA DE
ESTRADA POR MEIO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ABASTECIMENTO
EM OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO**

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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Arroyo Ortiz

Ouro Preto - MG

2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isabela Mara de Oliveira

Aumento da Produtividade da Frota de Caminhões Fora de Estrada por Meio da Otimização do Processo de Abastecimento em Operação de Mineração

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 06 de Março de 2026

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Vladimir Kronemberger Alves - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Rita de Cássia Pedrosa Santos - Universidade Federal de Ouro Preto

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/03/2026, às 17:57, 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 **1071087** e o código CRC **6FA35088**.

À minha tia Valéria e ao meu tio Edson, que hoje brilham no céu. A saudade é grande, e eu gostaria muito que estivessem aqui para compartilhar esta conquista. Guardo comigo todas as lembranças, o carinho e o amor, certos de que vocês sempre serão minhas estrelinhas a iluminar o meu caminho.

AGRACECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, a Nossa Senhora Aparecida e a São José, por sempre guiarem meus passos, iluminarem meus caminhos e sustentarem minha fé em todos os momentos desta trajetória.

Aos meus pais, Aparecida e Haelton, minha base e meu maior exemplo. Sem o amor, o incentivo e os sacrifícios de vocês, nada disso seria possível. Essa conquista é, antes de tudo, nossa. Aos meus irmãos, Juninho e Fernando, e a toda a minha família, por serem meu porto seguro e por demonstrarem, todos os dias, o verdadeiro significado de união, apoio e amor.

Às minhas amigas de Belo Horizonte, por nunca deixarem a distância diminuir o carinho e a presença. Em especial, à Angela, Sofia e Marcelle, que foram apoio essencial para que este final se tornasse possível. Aos meus amigos do curso, Rafaela, Luísa, Luiz Felipe e Kelly, pelo companheirismo, pelas trocas, pelos desafios enfrentados juntos e por tornarem essa caminhada mais leve. Vocês são, sem dúvida, os melhores engenheiros que eu conheço.

À República do Drosófila e a todas as meninas que dividiram comigo esses anos em Ouro Preto: vocês tornaram essa experiência mais leve, mais especial e inesquecível.

Ao professor Carlos Arroyo, pela orientação, pela paciência, pela confiança e por todo o aprendizado compartilhado ao longo deste trabalho. À UFOP e ao DEMIN, pelo ensino público, gratuito e de qualidade, que transformou minha trajetória acadêmica e pessoal.

À Vale e à CSN, pelas oportunidades de estágio e pelos ensinamentos que enriqueceram profundamente minha formação profissional.

Por fim, a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada e contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, minha sincera gratidão

RESUMO

Este trabalho analisa a influência do processo de abastecimento de caminhões fora de estrada sobre a produtividade da frota em uma operação de mineração a céu aberto. O estudo considera que atividades auxiliares, quando não gerenciadas de forma eficiente, podem elevar as horas improdutivas e comprometer o desempenho global do sistema produtivo. A pesquisa avalia indicadores de desempenho relacionados à disponibilidade física, utilização física, horas improdutivas e produtividade, incorporando variáveis operacionais que interferem diretamente no tempo de ciclo, tais como distância média de transporte, carga média transportada, velocidade média e tempo fixo. O tempo fixo contempla o tempo de carga, tempo de fila, tempo de manobra, tempo de basculamento e tempo de espera no basculamento, permitindo identificar perdas associadas às etapas operacionais e às atividades de apoio logístico. O estudo adota abordagem quantitativa e caracteriza-se como pesquisa aplicada, fundamentada na coleta e análise de dados operacionais da frota. A análise comparativa dos indicadores possibilita avaliar o impacto das ineficiências do abastecimento sobre a produtividade da lavra e sobre a utilização dos ativos. Os resultados demonstram que falhas de planejamento, ausência de padronização e limitações estruturais no processo de abastecimento ampliam os tempos auxiliares e reduzem a eficiência operacional. O trabalho conclui que a gestão integrada dos indicadores e a otimização dos tempos fixos contribuem de forma significativa para o aumento da produtividade, para a melhoria da utilização física dos equipamentos e para a estabilidade do sistema produtivo.

Palavras-chave: Produtividade. Mineração a céu aberto. Indicadores de desempenho. Tempo de ciclo.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of the refueling process of off-highway trucks on fleet productivity in an open-pit mining operation. The research considers that auxiliary activities, when not efficiently managed, may increase idle hours and compromise overall system performance. The study evaluates performance indicators related to physical availability, physical utilization, idle hours, and productivity, incorporating operational variables that directly affect cycle time, such as average haul distance, average payload, average speed, and fixed time. The fixed time includes loading time, queuing time, maneuvering time, dumping time, and waiting time at the dumping point, allowing the identification of operational and logistical losses. The research adopts a quantitative approach and is characterized as applied research, based on the collection and analysis of fleet operational data. Comparative analysis of the indicators enables the assessment of the impact of refueling inefficiencies on mining productivity and asset utilization. The results demonstrate that planning deficiencies, lack of process standardization, and structural limitations in the refueling system increase auxiliary times and reduce operational efficiency. The study concludes that integrated performance management and optimization of fixed times significantly contribute to increased productivity, improved equipment utilization, and greater operational stability.

Keywords: Productivity. Open-pit mining. Performance indicators. Cycle time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método DMAIC.....	20
Figura 2 - Abastecimento de caminhão fora-de-estrada	22
Figura 3 - Distribuição estatística do ciclo (média, mediana e quartis)	29
Figura 4 - Carta de Controle do tempo total do ciclo de abastecimento antes das melhorias	30
Figura 5 - Árvore de estratificação do processo de abastecimento	31
Figura 6 - Distribuição do tempo de ciclo nos períodos seco e chuvoso.....	32
Figura 7 - Distribuição do tempo de ciclo por tipo de frota	32
Figura 8 - Distribuição do tempo de ciclo por turno operacional	33
Figura 9 - SIPOC do processo de abastecimento dos caminhões fora de estrada ..	33
Figura 10 - Ciclo de abastecimento detalhado: etapas e tempos médios observados	35
Figura 11 - Diagrama de Ishikawa das causas potenciais de aumento do ciclo de abastecimento	36
Figura 12 - Matriz de priorização das causas potenciais do ciclo de abastecimento	36
Figura 13 - Evolução do tempo total do ciclo de abastecimento antes e depois das melhorias	41
Figura 14 - Evolução do nível sigma do processo de abastecimento após as melhorias	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	Objetivo Geral.....	11
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Operações de Mineração a Céu Aberto.....	13
2.2	Produtividade no Transporte em Sistemas de Mineração.....	13
2.3	Indicadores de Desempenho (KPIs).....	15
2.3.1	Disponibilidade Física.....	16
2.3.2	Horas Calendário.....	16
2.3.3	Horas Improdutivas.....	17
2.4	Lean Seis Sigma e a Metodologia DMAIC.....	19
2.5	Variabilidade e Nível Sigma.....	20
2.6	Ferramentas de Análise de Causa.....	21
2.7	Abastecimento de Caminhões em Operações de Mineração.....	21
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Classificação da Pesquisa.....	24
3.2	Caracterização da Área de Estudo.....	24
3.3	Caracterização do Processo Estudado.....	25
3.4	Definição dos Indicadores e Variáveis Analisadas.....	25
3.5	Estratégia Metodológica.....	26
3.6	Variáveis, Indicadores e Ferramentas.....	27
3.7	Delimitações do Estudo.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1	Caracterização do Processo de Abastecimento e Identificação do Problema.....	28
4.2	Definição do Indicador e Estabelecimento da Meta.....	28

4.3 Análises Estatísticas e Estratificação do Processo (Measure)	30
4.4 Identificação das Causas-Raiz (Analyze)	34
4.5 Ações de Melhoria Implementadas (Improve)	37
4.6 Controle dos Resultados e Sustentação das Melhorias (Control)	39
4.7 Resultados Obtidos	40
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A mineração a céu aberto é caracterizada por operações de grande escala, elevada intensidade de capital e forte dependência da eficiência dos equipamentos móveis. Nesse contexto, a frota de caminhões fora de estrada desempenha papel essencial no desempenho global da mina, uma vez que é responsável pela movimentação contínua de material entre as frentes de lavra e os pontos de descarga. A produtividade desses equipamentos, usualmente expressa em toneladas por hora, constitui um dos principais indicadores operacionais do setor, refletindo diretamente a capacidade produtiva da operação.

Em sistemas produtivos de mineração, a geração de resultado está diretamente relacionada à maximização do tempo efetivamente disponível para transporte de material. Qualquer parcela do tempo operacional destinada a atividades que não envolvem deslocamento carregado ou vazio reduz, ainda que indiretamente, o volume anual movimentado. Entre essas atividades de suporte encontra-se o abastecimento de combustível, procedimento indispensável à continuidade da operação, porém potencialmente gerador de perdas quando conduzido sem padronização, controle e análise sistemática de desempenho.

Embora o abastecimento não agregue valor direto ao minério produzido, sua influência sobre a produtividade da frota é significativa. Tempos excessivos, filas, deslocamentos desnecessários ou variabilidade no processo podem comprometer a disponibilidade operacional dos caminhões e, conseqüentemente, reduzir a massa total transportada ao longo do ano. Assim, a gestão inadequada desse processo pode representar perda de capacidade produtiva sem que, necessariamente, haja limitação física de equipamentos.

A literatura de engenharia e gestão operacional destaca que o aumento da produtividade não depende exclusivamente da aquisição de novos ativos, mas também da otimização dos processos de suporte que sustentam o sistema produtivo. Nesse sentido, metodologias estruturadas de melhoria contínua, como o Lean Seis Sigma, têm sido amplamente aplicadas para reduzir desperdícios, controlar variabilidade e elevar a eficiência operacional com base em dados.

O Lean Seis Sigma, estruturado pelo ciclo Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (DMAIC), permite a identificação sistemática de problemas, a mensuração

precisa do desempenho atual e a implementação de soluções sustentáveis. Sua aplicação em processos auxiliares da mineração possibilita transformar ganhos de tempo em incremento efetivo de capacidade produtiva, fortalecendo a competitividade da operação.

Na empresa objeto deste estudo, o processo de abastecimento de caminhões fora de estrada realizado em posto fixo apresentou indícios de oportunidade de melhoria, especialmente no que se refere ao tempo total despendido na atividade e à variabilidade observada entre ciclos. Considerando que a produtividade média da frota é de 495 toneladas por hora, torna-se evidente que qualquer redução nas horas anuais destinadas ao abastecimento pode resultar em aumento expressivo de massa movimentada, sem necessidade de ampliação da frota ou de investimentos estruturais significativos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar e otimizar o processo de abastecimento de caminhões fora de estrada em uma operação de mineração, com foco no aumento da produtividade da frota. Busca-se reduzir o tempo anual destinado a essa atividade, elevar a estabilidade do processo e converter ganhos operacionais em incremento efetivo de toneladas movimentadas ao longo do ano.

Assim, o estudo insere-se na perspectiva de que a melhoria de processos de suporte pode gerar impactos relevantes na capacidade produtiva da mineração, reforçando a importância da gestão orientada por indicadores e da aplicação estruturada de metodologias de melhoria contínua.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e otimizar o processo de abastecimento de caminhões fora de estrada em uma operação de mineração a céu aberto, visando ao aumento da produtividade da frota por meio da redução do tempo anual destinado à atividade e da melhoria da estabilidade operacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Mapear e caracterizar o processo atual de abastecimento, identificando suas etapas, variáveis operacionais e principais fontes de variabilidade.
- Mensurar o desempenho do processo com base em indicadores operacionais, especialmente tempo de ciclo e horas anuais destinadas ao abastecimento.
- Avaliar o impacto do tempo de abastecimento na produtividade da frota, considerando a relação entre horas disponíveis e toneladas movimentadas.
- Identificar causas-raiz associadas a perdas de tempo e ineficiências no processo.
- Propor e implementar melhorias estruturadas com base na metodologia DMAIC, visando à redução de tempo e à padronização do processo.
- Estimar o potencial de incremento de massa movimentada decorrente da redução das horas anuais de abastecimento.
- Estruturar mecanismos de controle e monitoramento para assegurar a sustentabilidade dos ganhos obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Operações de Mineração a Céu Aberto

A mineração a céu aberto caracteriza-se por operações de grande escala, elevada intensidade de capital e forte dependência de ativos móveis de alto porte. De acordo com Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), o desempenho técnico-econômico dessas operações está diretamente associado à eficiência do sistema de lavra adotado, sendo o arranjo caminhão–escavadeira o mais difundido em minas de minério de ferro de grande porte, devido à sua flexibilidade operacional e adaptabilidade às condições geológicas variáveis.

Segundo Darling (2011), o transporte representa uma das atividades de maior impacto nos custos operacionais da mineração, podendo corresponder a parcela significativa do custo total de movimentação de material. Assim, pequenas variações no desempenho da frota podem resultar em impactos expressivos na produção anual.

No caso em estudo, a operação está localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, região reconhecida mundialmente pela relevância geológica e produção mineral. A mina apresenta produção anual aproximada de 42 milhões de toneladas de minério de ferro, operando com uma frota composta por 64 caminhões fora de estrada Caterpillar 793D e 793F. Esses equipamentos possuem peso bruto aproximado de 404.000 kg e capacidade de carga de até 240 toneladas por ciclo, desempenhando papel central na movimentação do material desde as frentes de lavra até os pontos de descarga definidos pelo planejamento operacional.

Nesse contexto, o transporte configura-se como elo crítico do sistema produtivo, pois sua eficiência condiciona diretamente a taxa de alimentação das unidades subsequentes do processo.

2.2 Produtividade no Transporte em Sistemas de Mineração

A produtividade em sistemas produtivos pode ser definida como a relação entre o volume produzido e os recursos empregados para sua obtenção (SLACK et al., 2018). Em operações de mineração a céu aberto, especificamente no transporte, essa

relação é usualmente expressa em toneladas por hora, sendo fortemente influenciada por variáveis operacionais que determinam o número de ciclos executados ao longo do tempo disponível.

No transporte por caminhões fora de estrada, a produtividade não depende apenas da capacidade nominal de carga do equipamento, mas do desempenho integrado do ciclo operacional. De acordo com Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), a produção horária de uma frota de transporte é função direta da carga média transportada por ciclo e do número de ciclos realizados por hora, o qual é condicionado pelo tempo total de ciclo.

O tempo de ciclo, por sua vez, é influenciado por quatro variáveis principais: a Distância Média de Transporte (DMT), a velocidade média de deslocamento (carregado e vazio), a carga média efetivamente transportada e o tempo fixo associado às atividades complementares do ciclo.

A DMT exerce impacto direto sobre o tempo de deslocamento, sendo que maiores distâncias implicam aumento do tempo variável do ciclo. A velocidade média, condicionada por fatores como condições de rampa, geometria da via e estado de conservação do piso, determina o tempo gasto nos trechos de ida e retorno.

Já a carga média efetiva pode diferir da capacidade nominal do caminhão, uma vez que fatores como fragmentação do material, estratégia de carregamento e controle operacional influenciam o volume realmente transportado por ciclo.

Além do tempo variável de deslocamento, existe o chamado tempo fixo do ciclo, que engloba atividades que ocorrem independentemente da distância percorrida. Esse tempo fixo compreende:

- tempo de carga;
- tempo de fila para carregamento;
- tempo de manobra;
- tempo de basculamento;
- tempo de espera no ponto de descarga.

Embora não estejam diretamente associados ao deslocamento, esses componentes impactam significativamente o número de ciclos possíveis dentro de determinado intervalo de tempo.

Assim, a produtividade do transporte pode ser representada conceitualmente como a Equação 1:

$$\text{Produtividade} = (\text{Carga média por ciclo} \times \text{Número de ciclos por hora})(1)$$

E o número de ciclos por hora é inversamente proporcional ao tempo total de ciclo, conforme a Equação 2:

$$\text{Tempo total de ciclo} = \text{tempo de deslocamento} + \text{tempo fixo} \quad (2)$$

Nesse contexto, qualquer redução nos componentes do tempo fixo ou melhoria nas condições de deslocamento contribui para aumento do número de ciclos executados por hora, ampliando a massa movimentada no período analisado.

Dessa forma, ao analisar a produtividade da frota, torna-se essencial considerar não apenas a capacidade dos caminhões, mas também as variáveis operacionais que influenciam o tempo de ciclo, especialmente aquelas relacionadas a processos auxiliares e tempos não agregadores de valor.

2.3 Indicadores de Desempenho (KPIs)

Os Indicadores-Chave de Desempenho (Key Performance Indicators – KPIs) constituem instrumentos essenciais para monitoramento sistemático do desempenho organizacional. Conforme Parmenter (2015), os KPIs representam um conjunto restrito de métricas críticas que refletem os fatores determinantes para o sucesso estratégico da organização.

Kaplan e Norton (1997), ao estruturarem o Balanced Scorecard, ressaltam que os indicadores devem estar alinhados à estratégia corporativa, possibilitando o desdobramento dos objetivos estratégicos em métricas operacionais mensuráveis. Complementarmente, Neely, Gregory e Platts (1995) destacam que a eficácia de um sistema de medição depende da seleção criteriosa dos indicadores, evitando excesso de métricas que possam comprometer a clareza analítica e a tomada de decisão.

A utilização de indicadores de desempenho permite acompanhar a evolução dos resultados ao longo do tempo, possibilitando comparações históricas e análises de tendência. Segundo Francischini (2017), os indicadores geram informações relevantes para o processo decisório, subsidiando escolhas estratégicas e operacionais, além de contribuir para o aprimoramento contínuo dos processos organizacionais.

No setor mineral, os indicadores são amplamente empregados em praticamente todas as etapas da operação, com o objetivo de maximizar produtividade, controlar custos e aumentar a confiabilidade dos ativos. Indicadores

operacionais como tempo de ciclo, taxa de utilização, disponibilidade física e variabilidade de processo são frequentemente utilizados para mensurar eficiência e estabilidade operacional (SLACK et al., 2018). No contexto específico deste estudo, o abastecimento de caminhões fora de estrada insere-se como atividade de suporte diretamente relacionada ao desempenho global da frota, influenciando indicadores como disponibilidade, tempo improdutivo e produtividade da lavra.

2.3.1 Disponibilidade Física

A Disponibilidade Física (DF) corresponde ao percentual de tempo em que determinado equipamento encontra-se apto a operar dentro de um intervalo previamente definido. Em termos operacionais, representa o período em que o ativo não está submetido a intervenções de manutenção preventiva ou corretiva, estando, portanto, em condições técnicas de desempenhar sua função.

Matematicamente, a Disponibilidade Física pode ser expressa conforme a Equação (3):

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

Onde:

- **HC** = Horas Calendário
- **HM** = Horas de Manutenção (preventiva e corretiva)

No contexto da mineração, a Disponibilidade Física é um dos principais indicadores de desempenho da frota, uma vez que influencia diretamente a capacidade produtiva da operação. Ainda que o abastecimento não seja classificado como manutenção, atrasos ou ineficiências nesse processo podem impactar indiretamente a disponibilidade operacional do equipamento, sobretudo quando geram filas ou prolongam tempos auxiliares.

2.3.2 Horas Calendário

As Horas Calendário (HC) representam o total de horas teóricas disponíveis para operação durante o período analisado. Esse indicador é obtido a partir do número

de equipamentos considerados, multiplicado pela quantidade de dias do período de análise e pelas horas diárias de operação da unidade.

Em operações minerárias que funcionam em regime contínuo, geralmente 24 horas por dia e 7 dias por semana, o cálculo pode ser representado pela Equação (4):

$$HC = \text{Número de equipamentos} \times \text{Quantidade de dias} \times 24 \text{ Horas} \quad (4)$$

As Horas Calendário constituem a base para cálculo de diversos indicadores, como Disponibilidade Física e taxa de utilização, sendo fundamentais para análise de desempenho da frota.

2.3.3 Horas Improdutivas

As Horas Improdutivas (HI) compreendem o período em que o equipamento não está executando atividades produtivas, tampouco submetido a intervenções de manutenção programada ou corretiva. Enquadram-se nessa categoria situações como:

- Espera por carregamento;
- Aguardando manobras;
- Ociosidade operacional;
- Filas em pontos de apoio logístico;
- Tempo excessivo em atividades auxiliares, como abastecimento.

Na prática, o abastecimento torna-se um fator decisivo na composição das horas improdutivas quando ocorre de forma ineficiente, seja por baixa vazão da bomba, falhas de comunicação ou ausência de padronização do processo. Assim, embora seja uma atividade necessária ao funcionamento da frota, o tempo excedente associado ao abastecimento pode representar parcela significativa das perdas operacionais.

A mensuração adequada dessas horas permite identificar oportunidades de melhoria, reduzir desperdícios e aumentar a eficiência global do sistema produtivo.

2.3.4 Utilização Física

A Utilização Física (UF) corresponde ao percentual do tempo disponível em que o equipamento está efetivamente operando e executando sua função produtiva.

Enquanto a Disponibilidade Física está associada à condição técnica do equipamento, a Utilização Física relaciona-se ao nível de aproveitamento operacional do ativo quando este se encontra apto a operar.

Matematicamente, a Utilização Física pode ser expressa pela Equação (5):

$$UF = \frac{HO}{HC-HM} \quad (5)$$

Onde:

- HO = Horas Operadas
- HC = Horas Calendário
- HM = Horas de Manutenção

O termo (HC – HM) representa o tempo disponível para operação, ou seja, o período em que o equipamento não está em manutenção. A Utilização Física indica, portanto, quanto desse tempo disponível foi efetivamente convertido em atividade produtiva.

No contexto da mineração, esse indicador é fundamental para avaliação da eficiência operacional da frota, uma vez que elevados níveis de disponibilidade não garantem, necessariamente, alta produtividade. Um equipamento pode estar mecanicamente apto a operar, mas apresentar baixa utilização em razão de esperas, falhas de planejamento, desbalanceamento entre carregamento e transporte ou excesso de tempo em processos auxiliares.

Nesse sentido, as Horas Improdutivas exercem influência direta sobre a Utilização Física, pois reduzem o tempo efetivamente convertido em ciclos produtivos. Atividades como filas para abastecimento, tempo excessivo no posto fixo, deslocamentos não planejados e ausência de padronização operacional impactam negativamente esse indicador.

Considerando que a produtividade do transporte está associada ao número de ciclos executados por unidade de tempo, a elevação da Utilização Física representa estratégia relevante para aumento da massa movimentada sem necessidade de ampliação da frota. Assim, a otimização do processo de abastecimento contribui não apenas para redução de horas improdutivas, mas também para incremento da utilização dos ativos e, conseqüentemente, da produtividade global da operação.

2.4 Lean Seis Sigma e a Metodologia DMAIC

O Lean Seis Sigma combina princípios da produção enxuta com ferramentas estatísticas do Seis Sigma, visando redução de desperdícios e diminuição da variabilidade dos processos.

Segundo George (2002), o Seis Sigma é uma metodologia orientada por dados que busca reduzir defeitos e variabilidade, melhorando a capacidade do processo. Montgomery (2013) afirma que o Seis Sigma se baseia na análise estatística para compreender o comportamento dos processos e implementar melhorias sustentáveis.

A metodologia DMAIC — Define, Measure, Analyze, Improve, Control — estrutura-se como um ciclo disciplinado para solução de problemas. Conforme Werkema (2012), cada etapa possui objetivos específicos, especificados na Figura 1.

- Define: delimitação clara do problema;
- Measure: coleta e validação dos dados;
- Analyze: identificação das causas-raiz;
- Improve: implementação de soluções;
- Control: garantia de sustentabilidade.

SIGLAS	ETAPAS	OBJETIVOS
D	→ <i>Define</i> (Definir)	Detalhar o problema e definir a meta do projeto.
M	→ <i>Measure</i> (Medir)	Mesurar o desempenho do processo, que durante a coleta de dados possibilita obter as primeiras ideias da causa do problema e identificar os pontos fortes e as oportunidades para sua melhoria.
A	→ <i>Analyse</i> (Analisar)	Analisar os dados coletados na fase anterior, identificar e organizar as causas potenciais do problema quantificar a importância das causas potenciais.
I	→ <i>Improve</i> (Melhorar)	Propor, avaliar e implementar soluções potenciais com o objetivo de eliminar as causas fundamentais do problema prioritário analisado na fase anterior.
C	→ <i>Control</i> (Controlar)	Garantir o alcance da meta em longo prazo. São adotadas diversas ferramentas para controlar continuamente o desempenho dos processos.

Figura 1 - Método DMAIC

Fonte: Werkema (2012)

Werkema (2012) destaca que a aplicação disciplinada do DMAIC aumenta a probabilidade de sucesso dos projetos de melhoria.

2.5 Variabilidade e Nível Sigma

A variabilidade é inerente aos processos produtivos. Montgomery (2013) explica que processos sob controle estatístico apresentam variabilidade natural (causas comuns), enquanto desvios significativos podem indicar causas especiais.

O nível sigma representa a capacidade do processo em atender às especificações. Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2000), quanto maior o nível sigma, menor a taxa de defeitos e maior a confiabilidade do processo.

O Seis Sigma corresponde a aproximadamente 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), sendo considerado padrão de excelência operacional.

A aplicação do conceito de nível sigma em indicadores de tempo permite avaliar não apenas a média do processo, mas sua estabilidade e dispersão ao longo do tempo.

2.6 Ferramentas de Análise de Causa

O Diagrama de Ishikawa, proposto por Ishikawa (1993), é amplamente utilizado para identificação estruturada de causas potenciais de problemas, agrupadas em categorias como método, máquina, mão de obra, meio ambiente, material e medição.

O método dos 5 Porquês, difundido por Ohno (1997) no Sistema Toyota de Produção, busca aprofundar a investigação até a identificação da causa-raiz do problema.

A priorização de causas por meio de matrizes de impacto e frequência permite direcionar recursos às variáveis com maior influência no desempenho do processo (WERKEMA, 2012).

2.7 Abastecimento de Caminhões em Operações de Mineração

O abastecimento de caminhões fora de estrada, ilustrado na Figura 2 constitui atividade crítica nas operações de mineração a céu aberto, impactando diretamente a disponibilidade física dos equipamentos e, conseqüentemente, a produtividade da mina.



Figura 2 - Abastecimento de caminhão fora-de-estrada
Fonte: Autor (2024)

Darling (2011) destaca que a eficiência da frota de transporte é determinante para o desempenho global da operação, sendo o abastecimento um dos principais fatores que influenciam o tempo improdutivo dos equipamentos. Hustrulid, Kuchta e Martin (2013) complementam que o gerenciamento eficiente de frotas requer controle rigoroso dos tempos de parada para abastecimento e manutenção, pois esses compõem a parcela não produtiva do ciclo operacional.

Segundo o Caterpillar Performance Handbook (2019), o ciclo operacional do caminhão inclui carregamento, transporte, descarga e tempos auxiliares, dentre os quais se insere o abastecimento. A redução desses tempos auxiliares contribui para aumento da utilização do equipamento e redução do custo por tonelada transportada.

A literatura também aponta que gargalos em processos de apoio podem gerar perdas significativas de produtividade (WILLS; FINCH, 2016). Nesse contexto, o

abastecimento deve ser estruturado de modo a minimizar esperas e ineficiências operacionais, uma vez que, sob a ótica Lean, atividades que não agregam valor devem ser reduzidas (WOMACK; JONES, 2004).

Assim, o abastecimento pode ser compreendido como processo auxiliar estratégico, cuja eficiência influencia diretamente o tempo de ciclo operacional, a disponibilidade da frota, os custos e a produtividade da lavra, justificando a aplicação de metodologias estruturadas de melhoria, como o Lean Seis Sigma.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, melhoria do processo de abastecimento de caminhões fora de estrada.

Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa. Segundo Creswell (2010), a abordagem quantitativa envolve a coleta e análise de dados numéricos com aplicação de métodos estatísticos para avaliação de variáveis e desempenho do processo. No presente estudo, essa abordagem foi empregada na análise do tempo de ciclo, cálculo do nível sigma, elaboração de cartas de controle e avaliação da variabilidade. A abordagem qualitativa, conforme Lakatos e Marconi (2003), baseia-se na interpretação e descrição dos fenômenos, sendo aplicada por meio de observações in loco, entrevistas com operadores e mapeamento do fluxo operacional.

Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa classifica-se como exploratória. De acordo com Gil (2008), pesquisas exploratórias buscam proporcionar maior familiaridade com o problema e possibilitar a construção de hipóteses. Vergara (2016) complementa que esse tipo de pesquisa é indicado quando se pretende aprofundar o entendimento de processos organizacionais e identificar variáveis relevantes. Nesse contexto, o estudo buscou compreender as causas da variabilidade do tempo de abastecimento e estruturar intervenções para melhoria do desempenho operacional.

Assim, o trabalho enquadra-se como uma pesquisa exploratória de abordagem quali-quantitativa, desenvolvida por meio de estudo de caso aplicado.

3.2 Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido em uma mina de ferro com produção anual aproximada de 42 milhões de toneladas. A operação utiliza sistema de transporte composto por 64 caminhões fora de estrada Caterpillar modelos 793D e 793F, com capacidade nominal de carga de até 240 toneladas por ciclo e peso bruto aproximado de 404.000 kg.

A frota opera em regime contínuo, 24 horas por dia, sob sistema de turnos. A produtividade média observada no período analisado foi de 495 toneladas por hora por caminhão, indicador utilizado como referência para mensuração do impacto das melhorias implementadas.

3.3 Caracterização do Processo Estudado

O objeto de estudo consiste no processo de abastecimento de caminhões fora de estrada realizado em posto fixo de combustível de uma empresa de mineração. O ciclo de abastecimento foi definido como o intervalo entre a chegada do caminhão ao posto e o retorno do equipamento à operação na frente de lavra

O escopo do trabalho foi delimitado exclusivamente ao posto fixo de abastecimento, não sendo considerados os abastecimentos realizados em posto móvel, conforme definição estabelecida na fase inicial do projeto.

3.4 Definição dos Indicadores e Variáveis Analisadas

A análise metodológica foi estruturada a partir de indicadores operacionais que influenciam diretamente a produtividade do transporte, sendo eles:

- Produtividade horária (t/h);
- Massa anual movimentada (t/ano);
- Disponibilidade Física (DF);
- Utilização Física (UF);
- Horas Calendário (HC);
- Horas de Manutenção (HM);
- Horas Improdutivas (HI).

A Disponibilidade Física foi calculada conforme a Equação (1) e a Utilização Física foi determinada pela Equação (3).

As Horas Improdutivas foram definidas como o período em que o equipamento não se encontrava em manutenção nem executando atividade produtiva, incluindo tempos associados a filas, esperas operacionais e processos auxiliares, dentre os

A produtividade do transporte foi considerada função da carga média transportada por ciclo e do número de ciclos executados por hora, sendo este influenciado pelo tempo total de ciclo, composto por tempo variável (relacionado à DMT e velocidade média) e tempo fixo (carga, fila, manobra, basculamento e espera no basculamento).

3.5 Estratégia Metodológica

A pesquisa foi conduzida por meio da metodologia DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), integrante do Lean Seis Sigma, aplicada de forma sequencial e orientada por dados.

Na fase Define, foram estabelecidos o problema, o escopo, os clientes internos impactados, o indicador principal e a meta de desempenho. O processo foi mapeado em nível macro por meio do SIPOC, complementado pela árvore de estratificação, além do cálculo preliminar do nível sigma.

Na fase Measure, foram coletados e analisados dados históricos extraídos dos Sistemas, Aplicações e Produtos em Processamento de Dados (SAP) e do Centro de Controle Operacional (CCO). Realizaram-se análises estatísticas descritivas, testes de normalidade, histogramas, boxplots e cartas de controle elaboradas no software Minitab. Também foi conduzido estudo de tempos por cronometragem in loco das etapas do ciclo de abastecimento, permitindo a identificação de atividades agregadoras e não agregadoras de valor. Adicionalmente, foram realizados testes para verificar a influência de variáveis externas, como turno operacional, período seco ou chuvoso e porte da frota.

A fase Analyze teve como objetivo identificar as causas da variabilidade do processo. Foram aplicados o Diagrama de Ishikawa, a matriz de priorização de causas e o método dos 5 Porquês. Ao final, foram identificadas sete causas-raiz,

considerando a convergência de duas causas priorizadas para um mesmo fator causal.

Na fase Improve, foram definidas e implementadas ações corretivas e preventivas voltadas à eliminação das causas-raiz, estruturadas por meio da ferramenta 5W2H. Entre as principais ações destacam-se a criação de sala adequada para os operadores, a instalação de campainha sonora e visual junto à bomba, a padronização do POP, a manutenção da bomba para restabelecimento da vazão ideal, a padronização dos registros e o treinamento das equipes.

Por fim, na fase Control, foram estabelecidas rotinas de monitoramento contínuo do indicador, utilizando cartas de controle, checklist operacional, auditorias de aderência ao POP e plano de resposta a desvios. Também foi realizada nova avaliação do nível sigma para mensurar o desempenho após as melhorias.

3.6 Variáveis, Indicadores e Ferramentas

O indicador principal analisado foi o tempo total do ciclo de abastecimento (minutos). Como indicadores complementares, foram considerados tempo de espera, tempo de comunicação operador–frentista, tempo efetivo de abastecimento, vazão média da bomba, variabilidade entre turnos e nível sigma.

Foram utilizados os sistemas SAP e CCO, o software Minitab, planilhas eletrônicas, ferramentas Lean Seis Sigma (SIPOC, Ishikawa, 5 Porquês, 5W2H) e cronometragem manual em campo.

3.7 Delimitações do Estudo

O estudo limitou-se ao posto fixo de abastecimento, não contemplando abastecimentos realizados em posto móvel, alterações estruturais de grande porte ou fatores externos não controláveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do Processo de Abastecimento e Identificação do Problema

O processo de abastecimento da frota de caminhões fora de estrada apresenta papel crítico para o desempenho operacional da mina, uma vez que impacta diretamente a disponibilidade da frota, os indicadores de utilização, o consumo de combustível e a eficiência global das operações. Durante o diagnóstico inicial verificou-se que, ao longo de um ano, aproximadamente 16.194 horas foram perdidas devido ao tempo elevado de abastecimento, incluindo deslocamento até o posto, fila, entrega de crachá e execução da atividade.

A magnitude desse valor evidencia a relevância do abastecimento como um gargalo operacional. Não se trata apenas de um processo auxiliar, mas de uma etapa com impacto direto na produção. Devido a isso tornou-se necessária a aplicação de uma metodologia estruturada de melhoria contínua. Assim, optou-se pela utilização do DMAIC (Lean Seis Sigma) para reduzir a variabilidade do processo, padronizar práticas operacionais e minimizar perdas de tempo.

Além da representatividade operacional, o volume anual de 16.194 horas associadas ao abastecimento apresenta impacto direto na capacidade produtiva da frota. Considerando que a produtividade média do transporte é de 495 toneladas por hora verifica-se que o tempo destinado ao abastecimento representa potencial expressivo de massa movimentada ao longo do ano. Dessa forma, a análise do processo não se limita à redução do tempo de ciclo, mas à conversão dessas horas em incremento efetivo de produção.

4.2 Definição do Indicador e Estabelecimento da Meta

O indicador selecionado para acompanhamento foi o tempo total de ciclo do abastecimento, definido como o intervalo entre a chegada do caminhão ao posto e o retorno do equipamento à operação. A caracterização estatística do processo revelou os seguintes valores, como mostra a Figura 3:

- Tempo médio inicial do ciclo: 21,77 minutos
- Mediana: 21,74 minutos
- Primeiro quartil (Q1): ~20,71 minutos

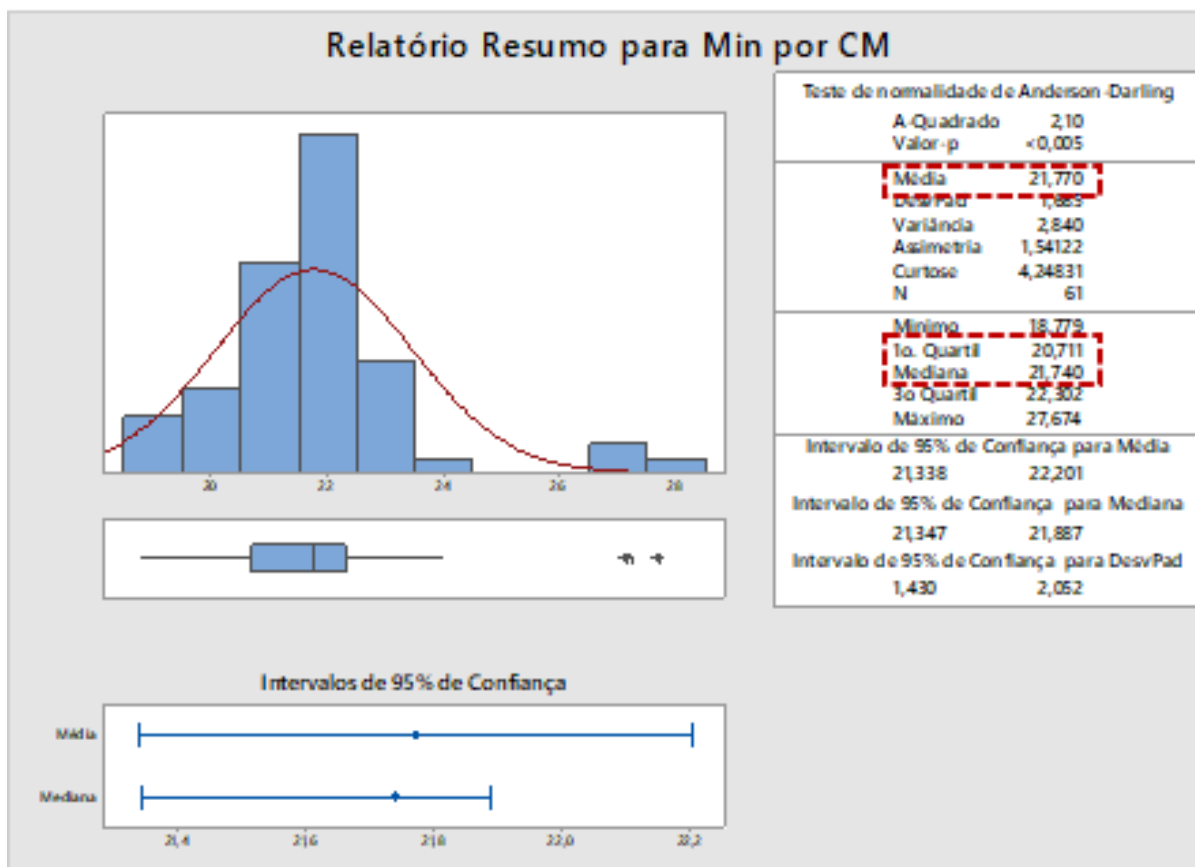


Figura 3 - Distribuição estatística do ciclo (média, mediana e quartis)
 Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A distribuição mostrou leve assimetria à direita reforçando que parte das ocorrências era influenciada por tempos maiores associados a atrasos e atividades não produtivas. Para aprofundar a avaliação da estabilidade do processo, foi elaborada uma carta de controle estatístico de processo (CEP), demonstrada na Figura 4, no Minitab, utilizando-se médias diárias do indicador. A análise do gráfico evidenciou um processo instável, com grande amplitude entre pontos, presença de variações especiais e falta de previsibilidade operacional.

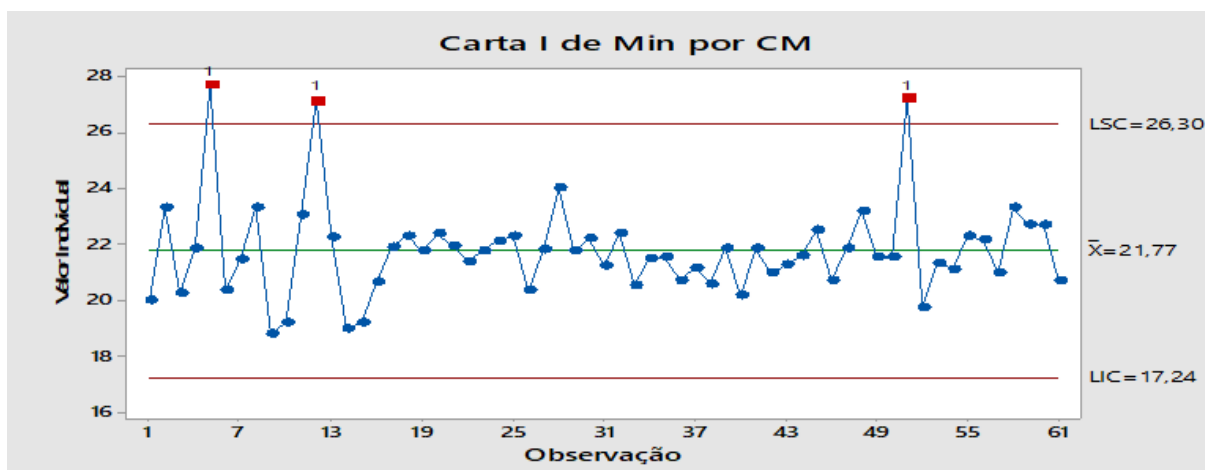


Figura 4 - Carta de Controle do tempo total do ciclo de abastecimento antes das melhorias
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os indícios de instabilidade vistos no CEP reforçaram que naquele estágio, não seria adequado definir metas agressivas, já que o processo ainda não operava sob controle estatístico. Com isso, adotou-se a abordagem típica do Seis Sigma para processos em fase de estabilização: a meta foi definida com base na relação entre Q1 e a mediana, que expressa o comportamento “natural” do processo em condições normais e sem interferência de causas especiais.

Dessa forma, estabeleceu-se uma meta de redução de 3,5%, direcionada para o retorno à média desejada de 21 minutos por ciclo um valor historicamente praticado e consistente com as capacidades operacionais do posto de abastecimento.

4.3 Análises Estatísticas e Estratificação do Processo (Measure)

Diversas análises estatísticas foram conduzidas para verificar se havia fatores externos influenciando o tempo de abastecimento.

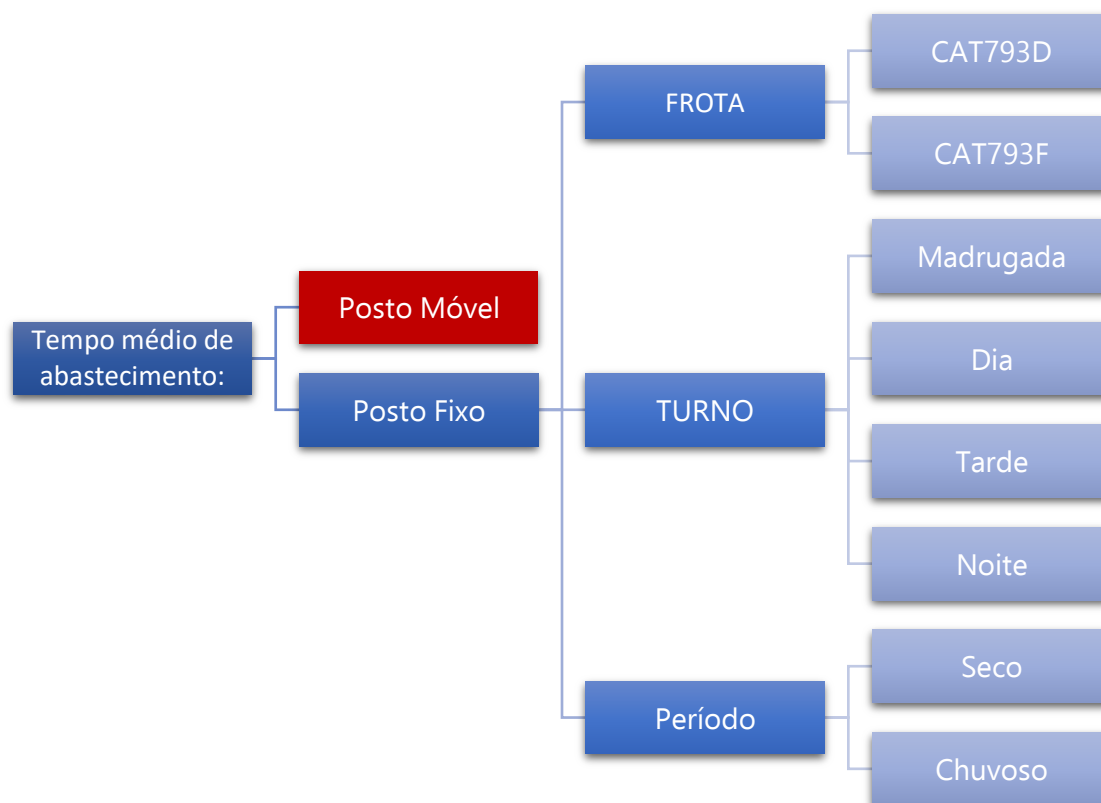


Figura 5 - Árvore de estratificação do processo de abastecimento

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A Árvore de Estratificação, conforme a Figura 5 foi utilizada como ferramenta inicial para segmentar o processo e definir quais fatores deveriam ser avaliados. Nessa representação, o posto móvel aparece destacado em vermelho, pois foi deliberadamente excluído da análise. Essa exclusão ocorreu porque o escopo definido para o projeto contemplou exclusivamente o posto fixo de abastecimento, com foco em seus gargalos, recursos, layout e condições operacionais. Dessa forma, os dados referentes ao abastecimento no posto móvel não foram considerados nas análises subsequentes, garantindo coerência metodológica e direcionamento preciso do estudo.

Com base nessa estrutura, foram selecionadas as estratificações relacionadas

a:

- período seco x período chuvoso;
- turnos operacionais;
- tipo ou porte da frota.

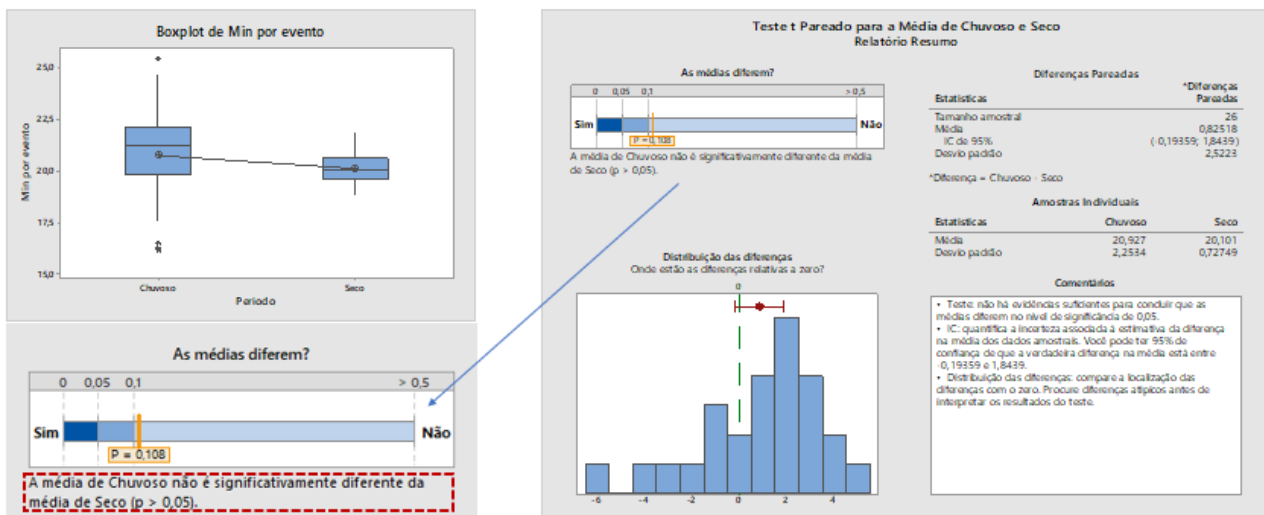


Figura 6 - Distribuição do tempo de ciclo nos períodos seco e chuvoso
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

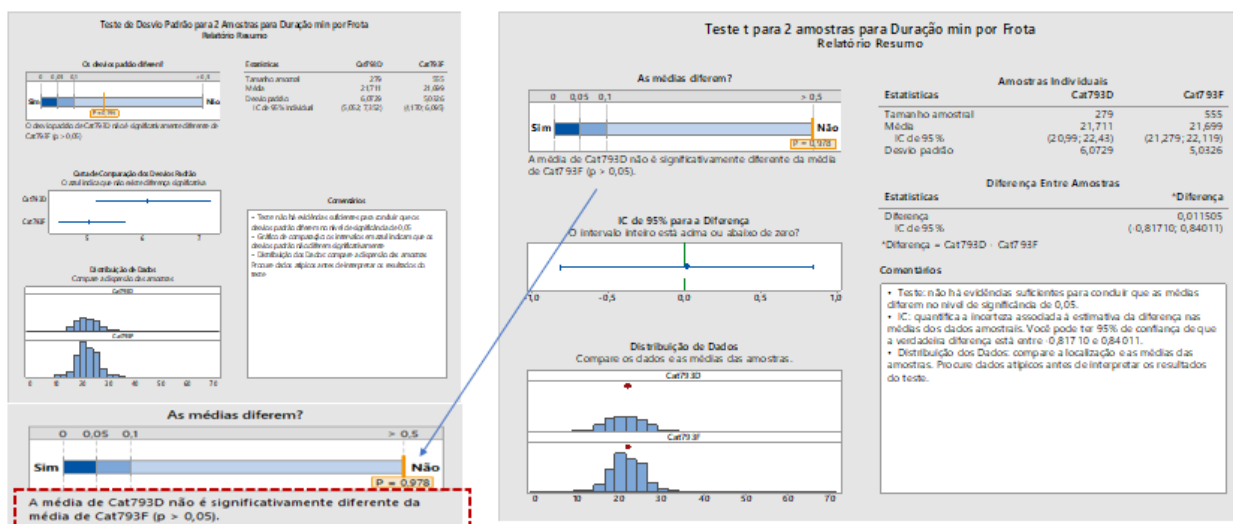


Figura 7 - Distribuição do tempo de ciclo por tipo de frota
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

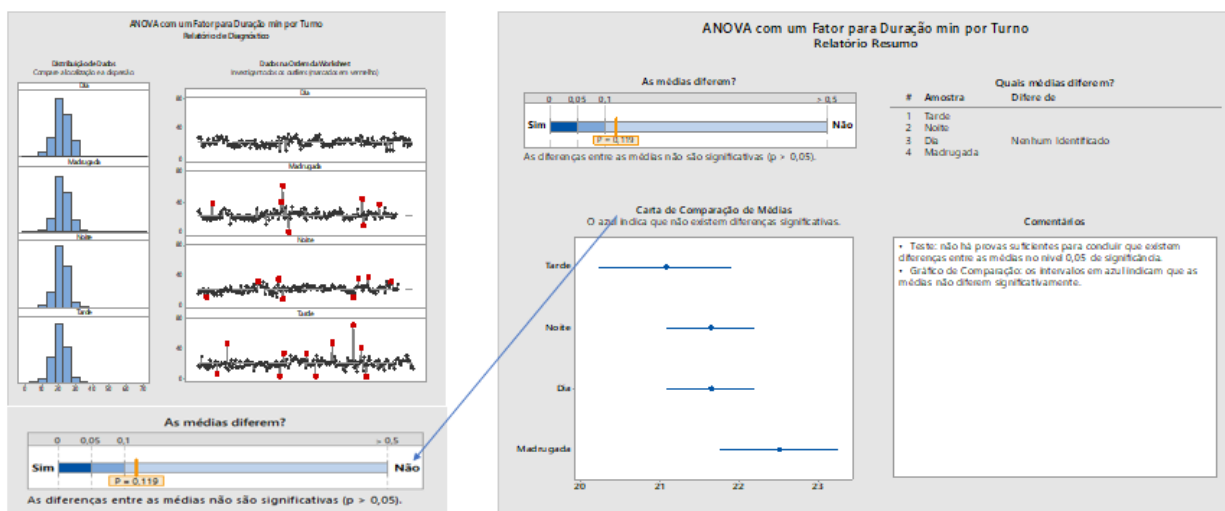


Figura 8 - Distribuição do tempo de ciclo por turno operacional
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os resultados demonstraram que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados, conforme a Figura 6 e Figura 7.

Esses achados permitiram concluir que o comportamento do indicador é estável independentemente das variáveis ambientais ou de turno, o que possibilitou manter uma meta única para todo o processo, sem necessidade de segmentações específicas.

Além disso, foi elaborado o SIPOC completo do processo, detalhando fornecedores, entradas, atividades críticas, saídas e clientes internos, como observa-se na Figura 8.



Figura 9 - SIPOC do processo de abastecimento dos caminhões fora de estrada
Fonte: Adaptado da empresa (2025).

Essa ferramenta evidenciou pontos de variabilidade relevantes, especialmente relacionados a:

- Execução do abastecimento por frentistas;
- Condições dos filtros e bombas da ilha;
- Integração entre sistemas SAP e CCO;
- Layout e fluidez operacional do posto.

4.4 Identificação das Causas-Raiz (Analyze)

A etapa Analyze iniciou-se com a realização de um estudo detalhado do ciclo de abastecimento, conduzido no posto, acompanhando diretamente a rotina dos frentistas e operadores durante diferentes turnos. O objetivo foi compreender, de forma verdadeira, quanto tempo cada etapa do processo consumia e identificar onde se concentravam as principais perdas.

Durante esse estudo, foi realizada uma coleta representativa, envolvendo vários caminhões, turnos e frentistas, registrando-se o tempo individual de cada uma das operações. A equipe acompanhou o ciclo completo, desde a chegada do caminhão ao posto até o retorno à operação. As seguintes etapas foram cronometradas:

- descida do operador do caminhão;
- entrega do crachá ao frentista;
- fila ou tempo de espera para liberação;
- preparo do frentista para iniciar o abastecimento;
- tempo efetivo de abastecimento (bomba abastecendo);
- finalização, devolução do crachá e retorno do operador ao equipamento.

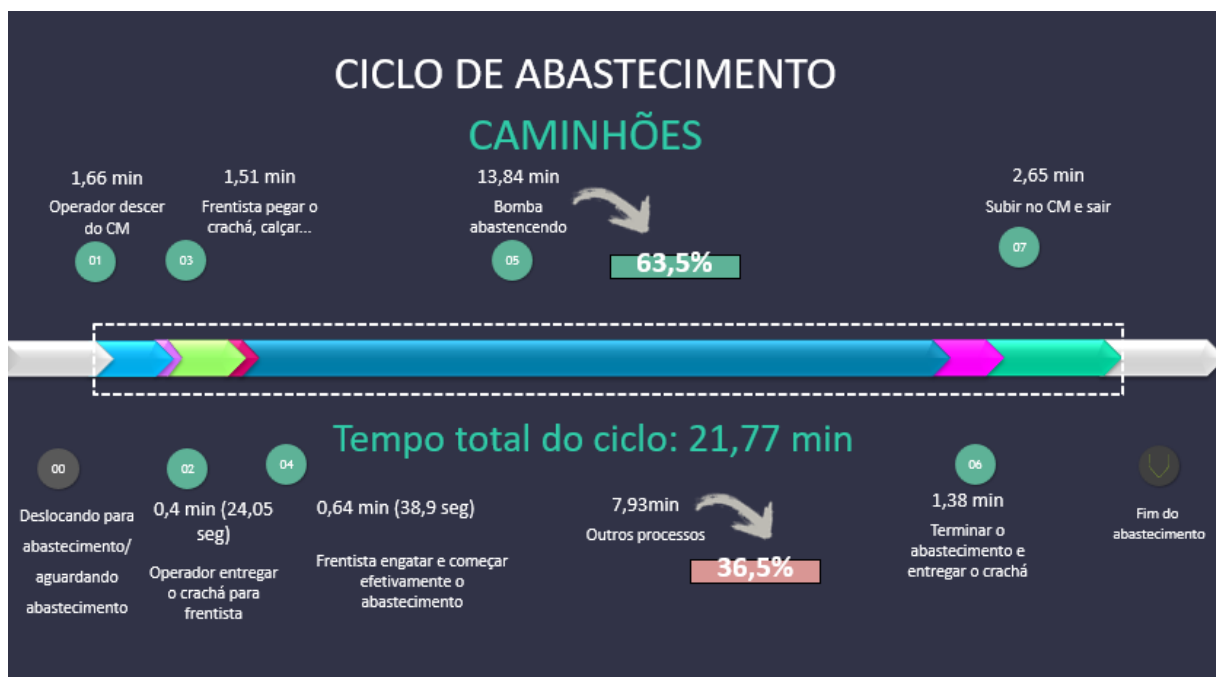


Figura 10 - Ciclo de abastecimento detalhado: etapas e tempos médios observados
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise dos tempos coletados mostrou um achado crítico: o tempo efetivo de abastecimento (bomba abastecendo) representava apenas 13,84 minutos do ciclo, ou seja, 36,5% do tempo total médio (21,77 minutos). Esse comportamento é evidenciado na Figura 9.

Isso significa que 63,5% do ciclo estava associado a atividades indiretas, como preparação, comunicação, posicionamento, espera e finalização — abrindo espaço evidente para oportunidades de melhoria.

Com base nos resultados do time study, foi elaborado um Diagrama de Ishikawa para identificar, de maneira estruturada, todos os fatores que poderiam impactar o tempo total do ciclo. As potenciais causas foram distribuídas conforme os 6Ms da qualidade como representado na Figura 10.

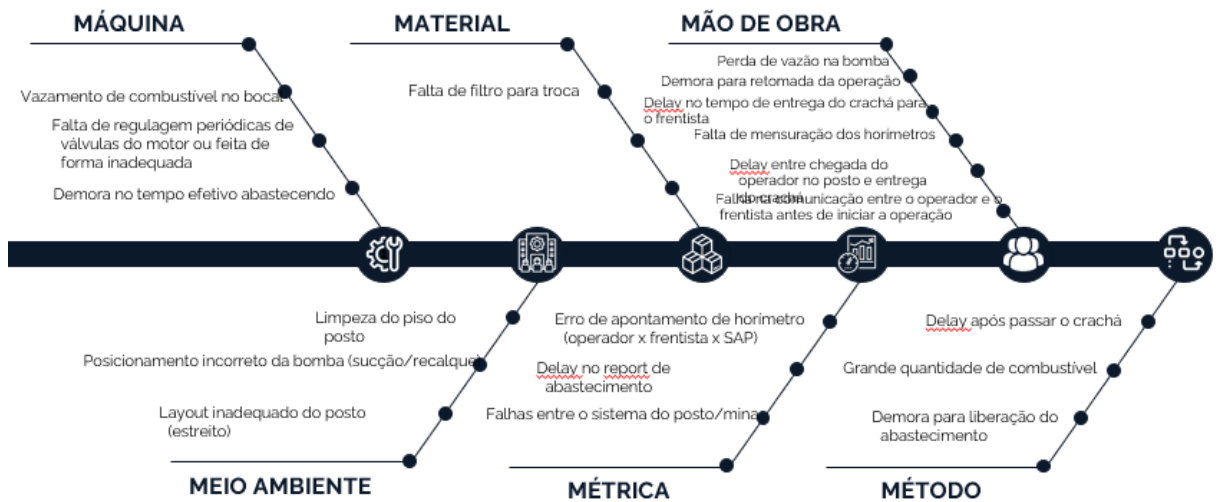


Figura 11 - Diagrama de Ishikawa das causas potenciais de aumento do ciclo de abastecimento

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O Ishikawa permitiu evidenciar que a maior parte das perdas estava concentrada antes e depois do abastecimento efetivo, corroborando os resultados do estudo de tempos.

Com base no Ishikawa e conforme a Figura 11, aplicou-se uma Matriz de Priorização (gravidade x urgência x tendência), permitindo selecionar as causas com maior impacto operacional e maior potencial de redução do ciclo.



Figura 12 - Matriz de priorização das causas potenciais do ciclo de abastecimento

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Após a aplicação do Diagrama de Ishikawa e da Matriz de Priorização, oito causas foram selecionadas como críticas para explicar a variabilidade do ciclo de abastecimento. Em seguida, aplicou-se o método dos 5 Porquês para cada uma dessas causas, de forma a identificar o motivo fundamental por trás de cada problema.

A aplicação sistemática dos 5 Porquês possibilitou aprofundar cada uma das causas priorizadas. Embora oito causas tenham sido abordadas, verificou-se que duas delas compartilhavam o mesmo conjunto de causas-raiz, convergindo para o mesmo problema estrutural. Assim, ao final do processo, foram identificadas sete causas-raiz distintas, conforme demonstrado nas tabelas a seguir.

As sete causas-raízes finais são:

1. Falta de rotina padronizada de manutenção preventiva.
2. Ausência de Procedimento Operacional Padrão (POP).
3. Falta de protocolo formal de comunicação operador–frentista.
4. Ausência de padrão e integração nos registros SAP/CCO.
5. Layout inadequado e nunca revisado.
6. Falta de checklist estruturado e rotina de inspeção.
7. Processo historicamente informal, sem estudos de tempos e indicadores.

Essas causas-raiz fundamentaram a elaboração das ações corretivas da etapa *improve*.

4.5 Ações de Melhoria Implementadas (Improve)

Com base nas sete causas-raiz identificadas na etapa Analyze, foram definidas ações de melhoria voltadas a eliminar desperdícios, padronizar o processo e restabelecer a capacidade operacional do posto fixo. As iniciativas foram estruturadas considerando os princípios Lean Six Sigma, buscando reduzir variações, eliminar atividades que não agregam valor e melhorar o fluxo do abastecimento. Para organizar a implementação, todas as ações foram detalhadas e consolidadas utilizando a ferramenta 5W2H, que permitiu definir com clareza o que seria executado, por quem, quando, onde, por que motivo, como e quanto custaria, garantindo planejamento robusto e alinhamento entre todos os envolvidos.

A primeira frente de trabalho envolveu a padronização do processo, uma das principais deficiências encontradas. Foi elaborado e implantado um Procedimento Operacional Padrão (POP), estabelecendo a sequência ideal de execução, responsabilidades do frentista e do operador, tempo esperado por etapa e orientações visuais no próprio posto. Esse POP reduziu a variabilidade entre turnos, eliminou multitarefas indevidas dos frentistas e atacou diretamente problemas de demora na entrega e devolução do crachá e falhas de comunicação.

Como complemento essencial ao POP, foi implementado um protocolo formal de comunicação entre frentista e operador. Entre as melhorias, destaca-se a instalação de uma campainha sonora e visual, localizada próxima à bomba, que podia ser acionada pelo frentista para avisar o operador sobre o início ou fim do abastecimento. Essa solução eliminou a necessidade de deslocamento do frentista até o operador, reduziu o tempo ocioso e trouxe mais precisão ao processo.

Com o objetivo de dar suporte ao novo método, foi criada uma área adequada e segura para os operadores aguardarem durante o abastecimento, que contava com iluminação, cobertura, que prevenia de chuvas, assentos e sinalização. Esse ambiente garantiu condições de segurança, conforto e praticidade, além de organizar o fluxo de movimentação dentro do posto fixo, reforçando o controle operacional. A combinação entre o espaço de espera e a campainha padronizada trouxe ganhos relevantes em eficiência e diminuição do tempo de espera pré e pós abastecimento.

Outra alteração importante foi a revisão do layout do posto fixo, uma vez que a maneira anterior dificultava manobras e aumentava o tempo de posicionamento. Foram redesenhados os acessos, com simples alterações de locais de rotatórias e leiras, e foram reorganizados os equipamentos simples do posto e aplicados os conceitos do 5S, resultando em um fluxo mais contínuo e menos deslocamentos desnecessários.

No campo técnico, foram executadas melhorias para restabelecer a vazão da bomba, incluindo troca de filtros saturados, padronização dessas trocas, limpeza das linhas, substituição de bocais desgastados e criação de rotina de manutenção preventiva. Simultaneamente, criou-se um checklist diário de inspeção, garantindo verificação sistemática das condições da ilha e dos acessórios utilizados no abastecimento.

As divergências entre os registros do SAP, CCO e frentistas também foram tratadas por meio da definição de um padrão único de registro, integração das fontes

de informação e capacitação dos envolvidos. Isso ampliou a confiabilidade do indicador e eliminou retrabalhos decorrentes de divergências de apontamento.

Por fim, todas as ações foram acompanhadas por um programa de capacitação dirigido aos frentistas, operadores e supervisores, assegurando compreensão clara dos novos padrões, da lógica de fluxo, das ferramentas implantadas e da importância do cumprimento rigoroso do POP.

As melhorias implementadas abordaram diretamente todas as causas-raiz identificadas e essas ações criaram condições favoráveis para estabilização do processo e geraram ganhos imediatos, que serão apresentados na etapa Control.

4.6 Controle dos Resultados e Sustentação das Melhorias (Control)

A etapa Control teve como objetivo assegurar a manutenção das melhorias implementadas na fase *improve* e garantir que o processo permanecesse estável, padronizado e com baixo nível de variabilidade. Para isso, o tempo total do ciclo de abastecimento passou a ser monitorado diariamente, utilizando registros padronizados entre SAP, CCO e frentistas. Esse acompanhamento mostrou uma redução consistente do ciclo, principalmente na etapa de espera, além da diminuição da variabilidade entre turnos.

Além do ciclo total, as etapas críticas também foram avaliadas, observando-se melhorias expressivas na comunicação operador–frentista, redução do deslocamento dos frentistas devido à campanha instalada e melhor desempenho da bomba após intervenções de manutenção.

Para garantir a continuidade dos resultados, foram formalizadas rotinas operacionais, como o checklist diário da ilha, manutenção preventiva programada, verificação da sala de operadores e testes periódicos da campanha sonora/visual. Indicadores permanentes, como tempo médio do ciclo, vazão da bomba, confiabilidade dos registros e aderência ao POP, passaram a orientar o monitoramento contínuo do processo.

Controles visuais também foram estabelecidos, incluindo placas de orientação, marcações no piso, POP exposto na sala de operadores e tabela de limites aceitáveis do ciclo. Além disso, foi estruturado um plano de resposta rápida para investigação e correção imediata de eventuais desvios.

Os resultados consolidados demonstram que o processo de abastecimento se tornou mais eficiente, estável e seguro. Entre os principais ganhos estão: redução do tempo total do ciclo, diminuição da espera antes do abastecimento, melhoria na comunicação, aumento da vazão da bomba, maior uniformidade entre turnos, registros mais confiáveis e melhor organização do posto. Esses resultados comprovam a sustentabilidade das melhorias e o atendimento pleno das causas-raiz identificadas na etapa Analyze.

Do ponto de vista operacional, a estabilização do processo e a redução do tempo de ciclo contribuíram diretamente para a elevação da Utilização Física da frota. A diminuição das horas improdutivas associadas ao abastecimento ampliou o tempo efetivamente disponível para execução de ciclos produtivos, favorecendo o aumento do número de ciclos por hora e, conseqüentemente, da produtividade operacional do transporte.

4.7 Resultados Obtidos

Os resultados alcançados após a implementação das melhorias demonstraram a eficácia da metodologia DMAIC na redução do tempo total do ciclo de abastecimento. A comparação entre os períodos antes e depois das intervenções revelou uma redução de 5,15% no tempo médio, passando de 21,77 minutos para 20,65 minutos, superando a meta estabelecida de 3,5%.

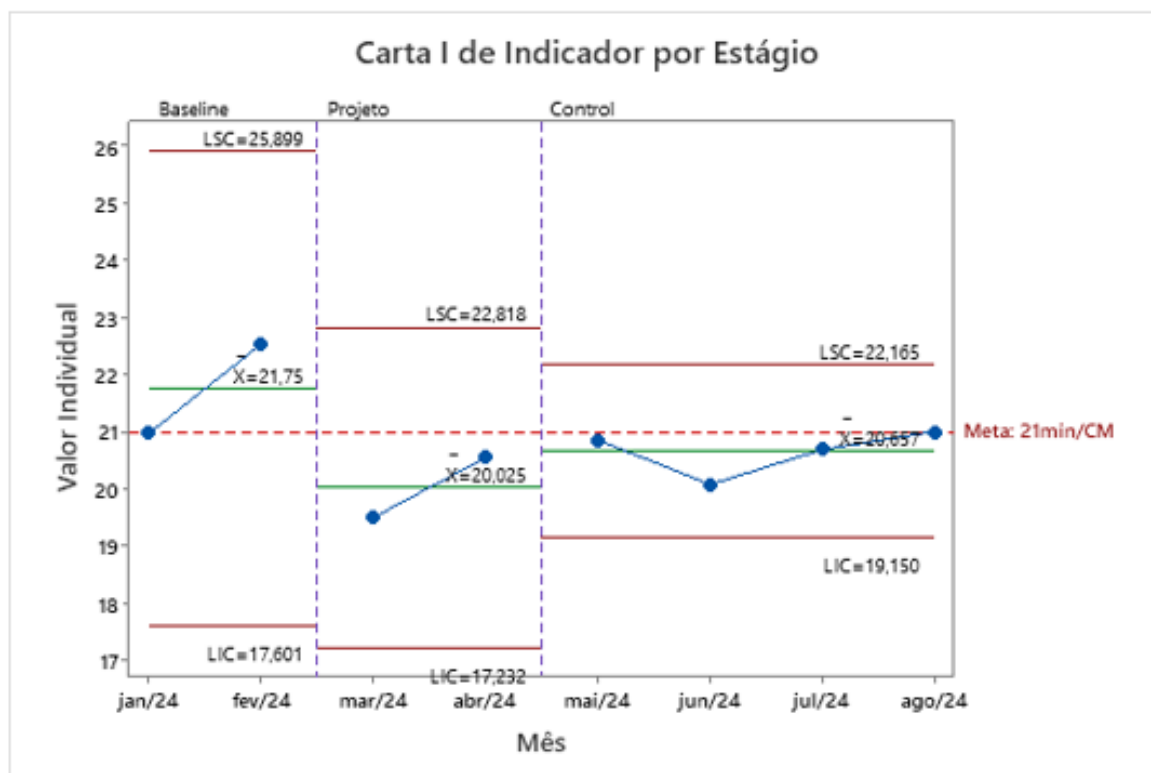


Figura 13 - Evolução do tempo total do ciclo de abastecimento antes e depois das melhorias

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A análise da série histórica, apresentada na Figura 12, evidencia que o ciclo, além de reduzir sua média, apresentou comportamento mais estável e menos disperso após as intervenções. Essa estabilidade também se refletiu na evolução do nível sigma do processo. Inicialmente, o abastecimento operava em um nível sigma de $-0,47$, indicando elevada variabilidade e baixa capacidade de atender ao limite estabelecido. Após a implementação das ações, especialmente a padronização do POP, a reorganização do posto, a criação da sala de operadores e o restabelecimento da vazão da bomba, o processo passou a operar em $2,95$ sigma, representando um aumento de $3,42$ pontos sigma conforme a Figura 13.

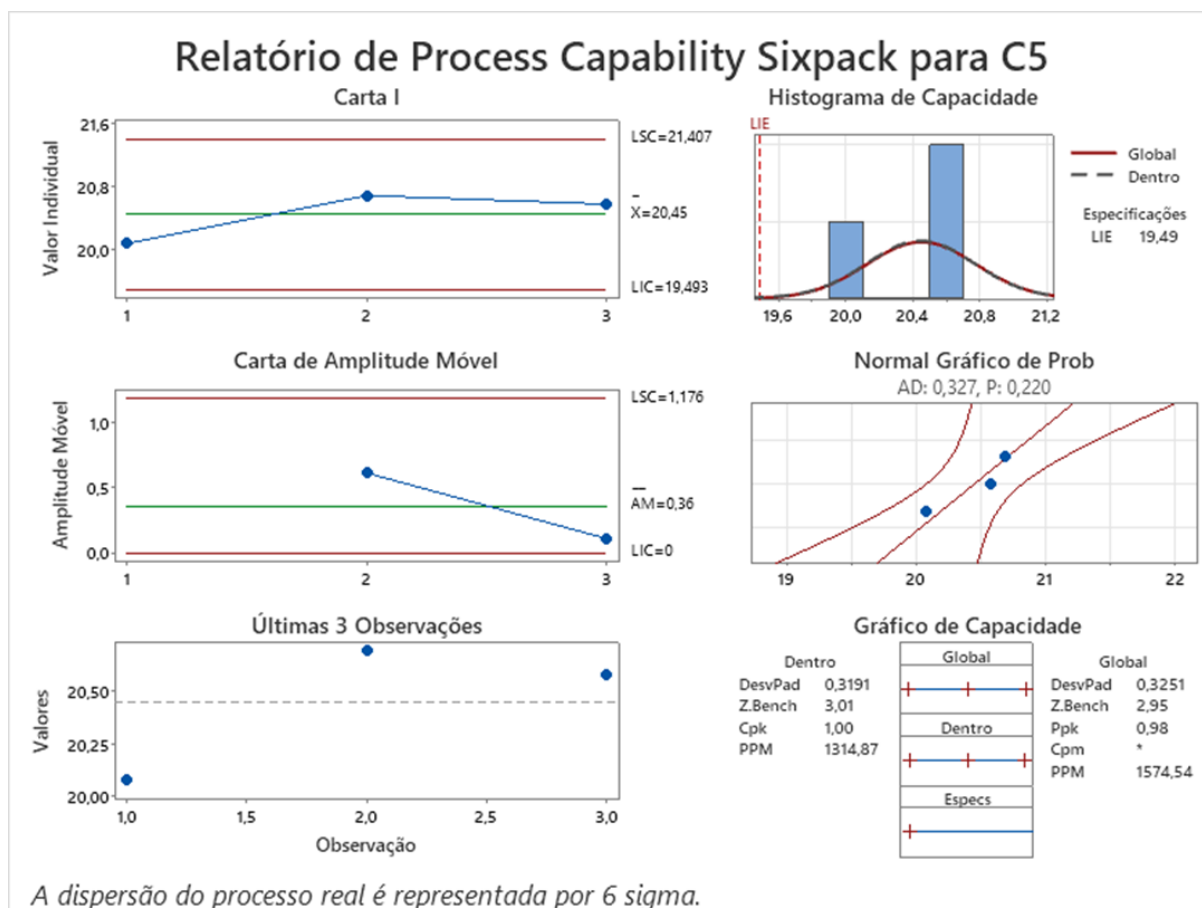


Figura 14 - Evolução do nível sigma do processo de abastecimento após as melhorias

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Do ponto de vista produtivo, a redução do tempo médio de ciclo foi importante para o aumento na disponibilidade de horas para transporte. Considerando que o processo, antes, apresentava 16.194 horas anuais associadas ao abastecimento e que as melhorias permitiram redução estimada de 834 horas ao ano, tem-se um ganho operacional importante.

Tomando como referência a produtividade média de 495 toneladas por hora por caminhão, a recuperação dessas 834 horas representa potencial adicional de movimentação de aproximadamente:

Massa adicional \approx 412.830 toneladas por ano.

$$\text{Massa adicional} = 495 \frac{t}{h} \times 834 h = 412.830 t/\text{ano}$$

Esse resultado evidencia que a otimização de um processo auxiliar, ainda que não agregue valor direto ao produto final, possui capacidade de impactar

significativamente o volume anual transportado e, conseqüentemente, o desempenho econômico da operação, uma vez que o aumento da massa movimentada amplia o potencial de geração de receita do empreendimento mineral.

A partir do incremento estimado de massa movimentada, também foi possível avaliar o impacto econômico potencial decorrente das melhorias implementadas. Considerando parâmetros operacionais da mina, como a relação estéril-minério, a recuperação máxima da usina e a cotação média do minério de ferro no período analisado, verificou-se que o aumento da massa transportada representa um ganho financeiro relevante para a operação. Ainda que os valores monetários específicos não sejam apresentados neste estudo por questões de confidencialidade empresarial, a estimativa indica um impacto econômico expressivo, evidenciando que melhorias em processos auxiliares podem gerar retornos financeiros significativos ao longo do tempo.

Considerando o tempo de ciclo, a redução de 5,15% no tempo médio indica aumento do número de ciclos executados por hora. Como o número de ciclos por hora depende diretamente da duração do ciclo, qualquer redução no tempo total permite que mais viagens sejam realizadas dentro do mesmo intervalo.

Os registros de SAP e CCO passaram a apresentar maior confiabilidade após a padronização dos critérios de apontamento, reduzindo divergências e retrabalhos. Além dos ganhos mensuráveis, o projeto proporcionou benefícios intangíveis relevantes, como maior organização, segurança e padronização no posto fixo, contribuindo para um ambiente operacional mais eficiente.

De modo geral, os resultados mostram que as melhorias implementadas reduziram variabilidade, eliminaram desperdícios e elevaram o desempenho do processo de abastecimento, tornando-o mais estável, seguro e alinhado às necessidades operacionais da mina.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o processo de abastecimento de caminhões fora de estrada em uma operação de mineração a céu aberto, buscando compreender de que forma essa atividade impactava a produtividade da frota. O diagnóstico inicial mostrou que, embora o abastecimento seja uma atividade de suporte, seu tempo acumulado ao longo do ano representava parcela significativa das horas operacionais disponíveis.

A partir da análise dos dados, verificou-se que o processo apresentava variabilidade elevada e ausência de padronização, operando com tempo médio de ciclo de 21,77 minutos e nível sigma de $-0,47$. Além disso, o levantamento anual indicou aproximadamente 16.194 horas associadas ao abastecimento, o que evidenciou a necessidade de investigação mais aprofundada. Considerando a produtividade média de 495 toneladas por hora, tornou-se claro que pequenas reduções no tempo de ciclo poderiam gerar impactos relevantes na massa movimentada.

A aplicação do DMAIC possibilitou estruturar o problema de forma organizada, identificar causas-raiz e direcionar ações específicas. A padronização do processo, a reorganização do layout, a melhoria da vazão da bomba e a formalização da comunicação entre operador e frentista contribuíram para reduzir desperdícios e tornar o processo mais previsível.

Após as intervenções, o tempo médio do ciclo foi reduzido para 20,65 minutos, superando a meta inicialmente estabelecida. O nível sigma evoluiu para 2,95, indicando maior estabilidade. A estimativa de recuperação de 834 horas anuais reforça que ganhos obtidos em processos auxiliares podem ser convertidos diretamente em aumento de capacidade produtiva, sem necessidade de ampliação da frota.

Além do impacto operacional, a análise também indicou potencial de geração de ganhos financeiros relevantes para a empresa. A partir da estimativa de incremento de massa movimentada e considerando parâmetros operacionais da mina, bem como a cotação do minério de ferro no período analisado, verificou-se que melhorias em processos de apoio podem resultar em impactos econômicos expressivos, reforçando a importância da gestão eficiente dessas atividades dentro do sistema produtivo.

Os resultados demonstram que a melhoria de atividades consideradas rotineiras pode gerar efeitos expressivos quando analisadas com base em dados e metodologia estruturada. Mais do que a redução do tempo de abastecimento, o projeto evidenciou a importância da padronização e do monitoramento contínuo como instrumentos de gestão operacional.

Vale destacar, como limitação, que o estudo se concentrou apenas no posto fixo de abastecimento, não contemplando o posto móvel nem análises financeiras detalhadas. Trabalhos futuros podem ampliar essa abordagem para outros processos logísticos da mina, avaliando impactos integrados na operação.

Conclui-se, portanto, que a otimização do abastecimento representa uma oportunidade concreta de ganho operacional, reforçando que a eficiência do sistema produtivo depende não apenas dos equipamentos principais, mas também da qualidade dos processos de apoio que sustentam a operação.

REFERÊNCIAS

- CATERPILLAR INC. **Caterpillar performance handbook**. 49. ed. Peoria: Caterpillar Inc., 2019.
- CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- DARLING, Peter (ed.). **SME mining engineering handbook**. 3. ed. Englewood: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2011.
- FRANCISCHINI, Paulino G. **Indicadores de desempenho: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Atlas, 2017.
- GEORGE, Michael L. **Lean Six Sigma: combining Six Sigma quality with Lean production speed**. New York: McGraw-Hill, 2002.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- ISHIKAWA, Kaoru. **Controle da qualidade total: à maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.
- KAPLAN, Robert S.; NORTON, David P. **A estratégia em ação: Balanced Scorecard**. Rio de Janeiro: Campus, 1997.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- NEELY, Andy; GREGORY, Mike; PLATTS, Ken. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 4, p. 80–116, 1995.
- OHNO, Taiichi. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.
- PANDE, Peter S.; NEUMAN, Robert P.; CAVANAGH, Roland R. **The Six Sigma way**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- PARMENTER, David. **Key performance indicators: developing, implementing, and using winning KPIs**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2015.
- SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

WERKEMA, Cristina. **Criando a cultura Lean Seis Sigma**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WILLS, Barry A.; FINCH, James. **Wills' mineral processing technology**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. **A mentalidade enxuta nas empresas**. Rio de Janeiro: Campus, 2004.