

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

WARLEYSSON PHELIPE NOGUEIRA DIAS

**MONITORAMENTO DO TEMPO MÉDIO DE CARREGAMENTO COM
INTELIGÊNCIA DE DADOS E GESTÃO VISUAL: UM ESTUDO DE CASO**

**OURO PRETO - MG
2026**

WARLLEYSSON PHELIPE NOGUEIRA DIAS

**MONITORAMENTO DO TEMPO MÉDIO DE CARREGAMENTO COM
INTELIGÊNCIA DE DADOS E GESTÃO VISUAL: UM ESTUDO DE CASO**

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

Orientador: Prof. Helton Cristiano Oliveira e Gomes

**OURO PRETO - MG
2026**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Warleysson Phelipe Nogueira Dias

Monitoramento do Tempo Médio de Carregamento com Inteligência de Dados e Gestão Visual: um Estudo de Caso

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

Aprovada em 10 de julho de 2026.

Membros da banca

Doutor - Helton Cristiano Oliveira e Gomes - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Davi Neves Pavanelli - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Cristiano Luís Turbino de França e Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Helton Cristiano Oliveira e Gomes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/07/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Helton Cristiano Oliveira e Gomes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/07/2026, às 08:57, 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 **1137798** e o código CRC **1DBE1A29**.

*À minha família, por quem meu amor e sacrifício são incondicionais. À Jardim de Alah, que,
com seu infinito acolhimento, me permitiu ser quem sou.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, que dedicou grande parte da sua vida para criar os filhos e que, com o pouco que tinha, concedeu-nos o tudo. O seu sacrifício, a sua força e o seu amor são a verdadeira fundação desta conquista.

Ao meu irmão, o ser mais importante da minha vida, a minha mais profunda gratidão. Foi você quem me guiou e me mostrou com clareza que o estudo é o caminho definitivo, tornando-se o meu maior exemplo e a minha maior inspiração diária.

Aos meus grandes companheiros e amigos de república, que dividiram comigo o teto, os desafios, as alegrias e a experiência intensa que é a graduação. A amizade de vocês fez com que essa jornada se tornasse leve, prazerosa e, sobretudo, valiosa. Jamais esquecerei das nossas vivências.

À Mariana Andrade, minha orientadora de estágio, pela confiança, pelo acolhimento e por todo o conhecimento prático compartilhado, que foram essenciais para a minha inserção e o meu amadurecimento no ambiente corporativo.

Aos professores do curso de Engenharia de Produção, especialmente Prof. Helton Cristiano Oliveira e Gomes, por toda a dedicação ao ensino e por moldarem a minha visão crítica, analítica e técnica ao longo de todos estes anos na universidade.

Por fim, expresso o meu profundo respeito e agradecimento a todos os trabalhadores, especialmente aos da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por sua imensurável dedicação diária, que mantém a nossa instituição de pé. A vocês, deixo o meu sincero desejo de justiça, dignidade e o pleno reconhecimento de direitos fundamentais, como a educação, que tem o poder de transformar realidades da mesma forma que transformou a minha.

*De pouco e algumas faltas foi feito o meu passado.
Da resiliência e disciplina, firmei a minha presença.
Com conhecimento e humanidade, escolho o futuro.*
— Warlleysson Phelipe Nogueira Dias

RESUMO

A eficiência do escoamento logístico é um fator crítico para a rentabilidade e a segurança estrutural na mineração de grande porte. No Complexo Alfa, a Unidade Beta enfrentava desafios operacionais na gestão dos apontamentos, resultando em interpretações imprecisas sobre os gargalos do Tempo Médio de Carregamento (TMC) ferroviário. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um sistema automatizado de inteligência de dados e gestão visual para diagnosticar ineficiências logísticas no Centro de Operações Integradas (COI). A pesquisa, de natureza aplicada e intervencionista, estruturou-se sobre a reengenharia da coleta de dados com a aplicação do princípio Poka-Yoke e a modelagem de algoritmos de normalização e expurgo de restrições exógenas. Utilizando a linguagem Python, automatizou-se o processamento do banco de dados analítico para a renderização de painéis executivos interativos em HTML, viabilizando o monitoramento do TMC e a estruturação do empilhamento de causas, pautado no Princípio de Pareto. Os resultados evidenciaram a redução expressiva da sobrecarga de horas da equipe e a transição do setor para atuações logísticas preditivas. A inteligência de dados forneceu o respaldo técnico necessário para a mitigação de ofensores externos, permitindo zerar o impacto crônico associado à troca de turno da ferrovia. A consolidação da ferramenta viabilizou o cumprimento consistente das metas de carregamento, o reconhecimento corporativo com premiação em excelência operacional no Corredor Logístico e a replicação do modelo para as Unidades Gama e Delta. Conclui-se que a integração estruturada entre as metodologias da Engenharia da Qualidade e os recursos analíticos da Indústria 4.0 solucionou a baixa visibilidade gerencial, transformando históricos de operação em uma gestão de alta performance.

Palavras-chave: Engenharia de Produção. Indústria 4.0. Gestão Visual. Tempo Médio de Carregamento. Empilhamento de Causas. Python.

ABSTRACT

The efficiency of logistical outflow is a critical factor for profitability and structural safety in large-scale mining. At Complex Alpha, Unit Beta faced operational challenges in managing records, resulting in inaccurate interpretations of bottlenecks in the railway Average Loading Time (TMC). The present study aimed to develop and implement an automated data intelligence and visual management system to diagnose logistical inefficiencies in the Integrated Operations Center (COI). The research, applied and interventional in nature, was structured upon the reengineering of data collection through the application of the Poka-Yoke principle and the modeling of algorithms for mathematical normalization and purging of exogenous constraints. Using the Python language, the processing of the analytical database was automated to render interactive executive dashboards in HTML, enabling TMC monitoring and the dynamic structuring of cause stacking, based on the Pareto Principle. The results evidenced a significant reduction in the team's operational workload and the sector's transition towards predictive logistical actions. Data intelligence provided the necessary technical support for the mitigation of external offenders, allowing the chronic impact associated with the railway shift change to be nullified. The consolidation of the tool enabled the consistent achievement of loading targets, corporate recognition with an award for operational excellence in the Logistics Corridor, and the replication of the model to Units Gamma and Delta. It is concluded that the structured integration between Quality Engineering methodologies and Industry 4.0 analytical resources solved the low managerial visibility, transforming historical operation records into high-performance management.

Keywords: Production Engineering. Industry 4.0. Visual Management. Average Loading Time. Cause Stacking. Python.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Interface de apontamento padronizada com validação de dados (*Poka-Yoke*) [28]
- Figura 2 – Dashboard de monitoramento do TMC por produto – Complexo Alfa, Jan/2026 [29]
- Figura 3 – Gráfico de Pareto: frequência de eventos apontados como desvios – Expedição Alfa [30]
- Figura 4 – Gráfico de empilhamento de causas por tempo e duração – Expedição Alfa [31]
- Figura 5 – Demonstração do Comparativo Evolutivo Mensal de Causas Anormais (Março vs. Abril/2026) [32]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTF	– Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
BI	– <i>Business Intelligence</i>
CF	– Concessionária Ferroviária
COI	– Centro de Operações Integradas
DMAIC	– Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar
ETL	– Extraction, Transformation and Load
HTML	– <i>HyperText Markup Language</i>
IBRAM	– Instituto Brasileiro de Mineração
MFC	– Minério Fino Comum
MNP	– Minério Natural Pellet
MPF	– Minério Pellet Feed
MSF	– Minério Sínter Feed
MSFE	– Minério Sínter Feed Especial
PDF	– <i>Portable Document Format</i>
SOE	– <i>Sales and Operations Execution</i>
TMC	– Tempo Médio de Carregamento
UFOP	– Universidade Federal de Ouro Preto
VBA	– <i>Visual Basic for Applications</i>
VP	– Via Permanente
PDCA	– <i>Plan, Do, Check, Act</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização do Cenário e da Empresa	13
1.2 Problematização.....	13
1.3 O Gatilho da Mudança: Cultura de Dados e Higienização.....	14
1.4 Justificativa.....	14
1.5 Objetivos.....	15
1.5.1 Objetivo Geral	15
1.5.2 Objetivos Específicos	15
1.6 Estrutura do Trabalho	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 A Infraestrutura Física e o Ciclo de Carregamento na Mineração	17
2.2 A Física do Gargalo e os Impactos Sistêmicos.....	17
2.3 Gestão de Operações e o Papel dos Indicadores de Desempenho	18
2.3.1 Impactos Sistêmicos e Segurança Estrutural na Mineração	18
2.4 Dinâmica e Composição do Indicador TMC na Logística Minerária	19
2.4.1 A Confiabilidade Física no Escoamento de Ativos	20
2.5 Gestão da Qualidade e o Empilhamento de Causas	20
2.6 Gestão Visual e Filosofia <i>Lean</i>	21
2.7 <i>Business Intelligence</i> e Indústria 4.0	21
2.8 O Ciclo PDCA e o Monitoramento da Melhoria Contínua	23
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 Delineamento da Pesquisa e Objeto de Estudo	24
3.2 Reestruturação do Instrumento de Coleta e Aplicação do Princípio Poka-Yoke.....	24
3.3 Protocolo de Governança e Auditoria de Dados (Quality Assurance)	25
3.4 Engenharia de Dados Transacionais (ETL) e Normalização Matemática.....	25
3.5 Algoritmo de Expurgo e Isolamento de Variáveis Exógenas.....	26
3.6 Arquitetura do Banco de Dados Analítico.....	26
3.7 Modelagem Lógica do Empilhamento e Bifurcação de Pareto	27
3.8 Automação Computacional Integrada em Linguagem Python.....	28
3.9 Desenvolvimento do Front-end em HTML e Gestão Visual Interativa	28
3.10 Ciclo de Desenvolvimento e Refinamento do Algoritmo	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Confiabilidade de Dados na Coleta de Apontamentos	31

4.2 Consolidação da Base Histórica e Eliminação da Sobrecarga Operacional.....	32
4.3 Sinergia Organizacional e Nova Governança de Rotina	33
4.4 Diagnóstico Físico e Intervenções de Manutenção Preditiva.....	33
4.5 Otimização Logística Integrada e Atingimento de Resultados Superiores	34
4.6 Acompanhamento Evolutivo e Potencial Analítico para Melhoria Contínua	35
4.7 Escalabilidade do Projeto e Reconhecimento Institucional.....	36
5 CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Cenário e da Empresa

A empresa em estudo é uma mineradora global que atua na produção de minério de ferro, pelotas e metais para a transição energética, destacando-se pela integração de suas minas de excelência a uma extensa e complexa rede logística ferroviária e portuária. Conforme dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2024), a eficiência do escoamento de minério pelo Sistema Logístico é um dos pilares de sustentação financeira do setor, exigindo o gerenciamento de cadeias de suprimentos em elevada capacidade. Nessa estrutura, o Complexo Alfa destaca-se como um dos ativos mais estratégicos, cujo sucesso depende de uma conexão síncrona rigorosa entre os processos de extração mineral e o fluxo logístico ferroviário, garantindo a vazão de ativos em larga escala. Nesse contexto, a Unidade Beta utiliza o Centro de Operações Integradas (COI) como núcleo central de inteligência e governança. O COI funciona como um ponto de convergência de dados em tempo real, abrangendo desde as atividades de lavra na mina até as etapas finais de expedição, o que permite que as equipes de engenharia identifiquem desvios antecipadamente e gestionem os recursos de forma tática para assegurar que as metas produtivas diárias, semanais e mensais sejam buscadas de maneira segura, eficiente e otimizada.

Dentro dessa engrenagem produtiva, o carregamento ferroviário representa o elo de maior criticidade operacional. Conforme aponta a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF) (2023), a melhoria do tempo de carregamento nas unidades mineradoras é um fator determinante para a redução do ciclo geral dos lotes de vagões na malha ferroviária nacional. A fluidez da mina enquanto produção e expedição está diretamente ligada ao desempenho dessa etapa, visto que qualquer demora excessiva no carregamento gera gargalos que impactam a produtividade global do sistema. Assim, o aprimoramento e o controle de indicadores como o Tempo Médio de Carregamento (TMC) e as causas dos gargalos do escoamento de minério tornam-se uma prioridade no Complexo Alfa e no contexto regional, visto a ampla integração logística e se faz a busca central do estudo.

1.2 Problematização

O Tempo Médio de Carregamento (TMC) é o indicador logístico que mede o ciclo de carregamento dos vagões e dita a fluidez operacional da mina. Embora o monitoramento do

TMC e de suas justificativas de desvios sejam vitais, o COI da Unidade Beta enfrentava dificuldades estruturais na gestão dessa informação, o que resultava em uma performance de expedição frequentemente abaixo das metas.

A dificuldade em extrair valor prático de bases de dados não tratadas foi o primeiro grande obstáculo para o diagnóstico; como apontam Davenport e Harris (2007), dados sem o devido tratamento analítico não trazem vantagem competitiva. No cenário anterior a este trabalho, a falta de padronização nos registros preenchidos pelas equipes (com erros de digitação e fórmulas desajustadas) comprometia a acuracidade dos informes diários. Essa base de dados "suja" gerava uma visão fragmentada do processo e impedia a distinção clara entre os atrasos causados por gargalos inerentes à ferrovia ou por falhas nos processos internos da própria mina.

Diante desse cenário mitigável de ineficiência e da necessidade de apuração das causas-raiz, a questão central de pesquisa que norteia este estudo é: Como estruturar um sistema de monitoramento analítico capaz de padronizar a coleta de dados e segregar confiavelmente as causas de atraso logístico entre a mina e a ferrovia?

1.3 O Gatilho da Mudança: Cultura de Dados e Higiênização

O entendimento da problemática e a urgência em responder ao direcionamento da diretoria com diagnósticos precisos e baseados em fatos motivou o início de um processo de transformação estrutural em junho de 2025. O foco inicial não residiu na implementação de tecnologia de forma isolada, mas sim no desenvolvimento de métodos adequados e na preparação do ambiente para diagnosticar gargalos e trazer visualização. Partiu-se da premissa de que nenhuma solução digital ou inteligência artificial seria eficaz sem uma fundação de dados sólida e previamente tratada e conferida com os responsáveis. Esse alinhamento reflete os preceitos de Falconi (2004) sobre o gerenciamento da rotina, o qual propõe a padronização metódica e o compromisso ético com a integridade do dado no nível operacional como condições fundamentais para a sustentação de projetos de melhoria contínua.

1.4 Justificativa

A relevância desta pesquisa se sustenta tanto sob a ótica empresarial quanto pela sua contribuição acadêmica à Engenharia de Produção. Do ponto de vista corporativo e financeiro, a logística de expedição ferroviária representa um dos centros de custo mais expressivos e sensíveis da mineração. O desuso ou sobrecarga de ativos de grande porte, como recuperadoras,

silos de carregamento e composições locomotivas, gerado por um TMC elevado, resulta em perdas de produção, escoamento e, conseqüentemente, de receita. Assim, o desenvolvimento de um método confiável capaz de diagnosticar a raiz desses atrasos justifica-se pela necessidade corporativa imediata de proteger a capacidade de vazão do Complexo Alfa e assegurar o cumprimento das metas estipuladas no planejamento estratégico. Academicamente, o trabalho preenche uma lacuna prática ao demonstrar como metodologias clássicas da Qualidade podem ser digitalizadas e aplicadas a operações pesadas, validando a transição de um controle manual reativo para uma gestão visual proativa baseada nos pilares da Indústria 4.0 e demais ferramentas da Engenharia de Produção.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo central deste trabalho é desenvolver e implementar um sistema de monitoramento dinâmico e gestão visual para o TMC no COI da Unidade Beta, estruturando a metodologia de empilhamento de causas para diagnosticar falhas e segregar responsabilidades operacionais entre mina e ferrovia.

1.5.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Realizar o mapeamento e o tratamento metodológico da base de apontamentos efetuados pelos técnicos de expedição, eliminando inconsistências e garantindo a padronização da entrada de dados;
- b) Estruturar um modelo matemático para a normalização do TMC, referenciando os lotes em 84 vagões (ou 55 para carregamentos em cargueiros), criando uma base de comparação isonômica;
- c) Desenvolver um algoritmo condicional que estruture o empilhamento de causas, aplicando o desconto de interferências externas para separar a responsabilidade temporal da mina das restrições da malha ferroviária;
- d) Construir e validar painéis interativos de Business Intelligence (BI) com atualização consolidada em D-1, fomentando a gestão visual para o suporte à tomada de decisão diária.

1.6 Estrutura do Trabalho

A estrutura desta monografia foi organizada em cinco capítulos interconectados para facilitar o acompanhamento do raciocínio lógico desenvolvido. No presente Capítulo 1, introduz-se o contexto da mineração global e o cenário corporativo, evidenciando o problema enfrentado no Complexo Alfa, a justificativa para a intervenção e os objetivos traçados. O Capítulo 2 aborda o Referencial Teórico, estabelecendo as bases conceituais sobre Gestão de Operações, Engenharia da Qualidade, métodos de melhoria contínua (Six Sigma, Pareto), e a adoção de BI aliada à Gestão Visual. Com isso, o Capítulo 3 detalha a Metodologia empregada, desde a coleta de dados primários até as rotinas de normalização matemática e a criação complexa dos painéis gerenciais. O Capítulo 4 concentra-se nos Resultados e Discussão, evidenciando o impacto prático do empilhamento de causas sobre os indicadores logísticos e os bônus de mensurar corretamente o TMC. Por fim, o Capítulo 5 encerra o documento com a Conclusão, refletindo sobre o alcance dos objetivos propostos e orientando perspectivas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, abordam-se os parâmetros físicos e a infraestrutura do ciclo de carregamento, contextualizando a origem dos gargalos logísticos. Em seguida, discute-se o papel do indicador TMC e a aplicação de ferramentas clássicas da Engenharia da Qualidade, como o Diagrama de Pareto e a Estratificação de Causas, para o diagnóstico estruturado de falhas. Por fim, explora-se a integração dessas metodologias aos conceitos de Lean Manufacturing e Indústria 4.0, culminando no uso de modelagem de dados como facilitadora do ciclo de melhoria contínua (PDCA).

2.1 A Infraestrutura Física e o Ciclo de Carregamento na Mineração

Para compreender a criticidade do TMC, seus desvios e perdas, é necessário analisar a disposição física e o fluxo logístico de materiais inerentes às operações de mineração. A operação de escoamento não se resume a um evento isolado, mas constitui a etapa final de uma cadeia de processos pesados e interdependentes. Após a fase de beneficiamento, um setor que demanda controle contínuo e que tem sido objeto de modernizações, como a aplicação de sensores virtuais para a classificação em tempo real do minério (REIS, 2026) e o gerenciamento rigoroso de equipamentos de alta capacidade, como moinhos industriais (GARCIA, 2000), o produto final é direcionado e empilhado nos pátios de estocagem.

A retirada desse material do estoque para os vagões ferroviários exige uma sincronia mecânica e logística. O minério é retomado por recuperadoras de grande porte, tratores e empilhadeiras e transportado por meio de extensas redes de correias transportadoras até o silo de carregamento ferroviário. Estudos acadêmicos demonstram que a viabilidade econômica das mineradoras está intrinsecamente ligada à eficiência e ao custo contínuo dessa movimentação de insumos e produtos (OLIVEIRA, 2009). No silo, o processo de carregamento exige que a composição ferroviária passe em velocidade constante e extremamente reduzida (*creep speed*) sob as calhas, onde o minério é despejado sob rigoroso controle de peso para evitar sobrecarga ou subutilização dos ativos. Ademais, frequentemente, minérios advindos de outras fontes são integrados aos pontos de carga principais para serem expedidos, aumentando a complexidade da operação logística.

2.2 Parâmetros Físicos do Gargalo e os Impactos Sistêmicos

A operação física do carregamento está sujeita a severas variáveis ambientais e mecânicas que afetam o TMC. Fatores e características como a alta umidade do material podem gerar aderência e entupimento nas calhas do silo; falhas elétricas podem desarmar as correias transportadoras; e indisponibilidades nas recuperadoras de pátio podem interromper o fluxo de alimentação do silo. Quando essas falhas não são diagnosticadas com agilidade, o sistema entra em colapso logístico.

O impacto de um gargalo no silo deixa de ser um mero atraso do trem; se a expedição paralisa, a capacidade de vazão da usina é bloqueada. O acúmulo de material não escoado força a redução do ritmo de lavra, afeta os limites operacionais da planta, pode travar o processo na usina e esgotar a capacidade de armazenamento nos pátios. Na indústria mineral, a garantia do escoamento é também um fator de segurança ambiental, uma vez que desequilíbrios no fluxo produtivo podem gerar sobrecargas não planejadas no gerenciamento de rejeitos e nas estruturas de contenção, cuja estabilidade geotécnica exige monitoramento crítico e ininterrupto (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). Portanto, gerenciar o TMC e empilhar suas causas também consiste em uma ação de proteção sistêmica à infraestrutura da mina.

2.3 Gestão de Operações e o Papel dos Indicadores de Desempenho

A gestão de operações em ambientes logísticos de alta complexidade demanda o monitoramento das variáveis que configuram a capacidade do sistema. De acordo com Ballou (2006), o gerenciamento do tempo em redes de transporte de massa, como o modal ferroviário, é a variável de maior impacto na composição do custo logístico total, evidenciando que gargalos operacionais depreciam severamente as margens de lucro. Conforme sugere a visão clássica de Drucker (1998), a capacidade de gerir e aprimorar um processo é diretamente proporcional à capacidade organizacional de medi-lo com precisão. Neste sentido, o TMC configura-se não como um mero registro histórico, mas como um indicador crítico de desempenho; qualquer desvio na sua execução reflete instantaneamente no impacto dos ativos imobilizados e na subsequente restrição da cadeia de suprimentos mineral, além dos recursos humanos direcionados à programação do escoamento.

2.3.1 Impactos Sistêmicos e Segurança Estrutural na Mineração

A gestão logística em complexos minerários deixa de ser uma análise puramente financeira, configurando-se como um elemento crítico para a estabilidade e sucesso de toda a

cadeia produtiva. Na região do Quadrilátero Ferrífero, análises de projetos de produção evidenciam que a viabilidade e a segurança das operações dependem de um fluxo contínuo e ininterrupto (OLIVEIRA, 2009). Quando ocorrem gargalos severos na expedição, como a elevação descontrolada do TMC, o sistema sofre um efeito dominó. A incapacidade de escoar o minério processado obriga a planta a estocar material excedente nos pátios ou, em casos extremos, a paralisar o beneficiamento. Essa interrupção no fluxo de massa altera todo o planejamento de disposição de materiais. A literatura técnica aponta que o gerenciamento rigoroso dos volumes de produção está diretamente correlacionado à segurança geotécnica. Obras de contenção e barragens de rejeitos de minério de ferro demandam monitoramento constante, como demonstrado em avaliações de comportamento geotécnico mediante ensaios, onde a previsibilidade da carga de rejeitos é fundamental para a estabilidade estrutural (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). Dessa forma, o controle preditivo e estruturado do carregamento ferroviário atua como uma camada primária de proteção operacional, evitando sobrecargas não planejadas no sistema de contenção e garantindo a continuidade segura da mineração.

2.4 Dinâmica e Composição do Indicador TMC na Logística Minerária

As metas do TMC na operação mineral são estabelecidas por meio de um planejamento estruturado mensal denominado Sales and Operations Execution (SOE), ou Execução de Vendas e Operações. O SOE é um processo tático focado na execução de curto prazo (trinta dias) que garante o alinhamento estreito entre as estratégias comerciais de venda de minério e a real capacidade produtiva e de escoamento das instalações logísticas. A base que constitui essa programação mensal advém do plano trimestral recebido pelo COI, escalado até o período anual. Durante a elaboração desta programação integrada, as equipes multidisciplinares analisam um amplo escopo de fatores técnicos, considerando variáveis críticas como o volume de produção disponível, a alocação quantitativa de vagões, os tempos padrão de manobra e as condições macro da malha ferroviária para, assim, estabelecer um padrão de eficiência executável para cada frente de carregamento. Para o diagnóstico eficiente neste estudo, o TMC utilizado para o empilhamento de causas adota um critério estrito de segregação e filtro de responsabilidades. Nesta abordagem, as ineficiências e interferências atribuídas unicamente ao controle da concessionária ferroviária são descontadas matematicamente do tempo bruto apurado, permitindo que o indicador purificado reflita exclusivamente o desempenho, o

domínio e os gargalos inerentes aos processos da mina, fatos e problemas consumíveis pelo COI.

2.4.1 A Confiabilidade Física no Escoamento de Ativos

O indicador TMC não é apenas uma métrica abstrata de tempo, mas um reflexo direto da confiabilidade dos equipamentos de grande porte instalados na operação de expedição. A mineração atual trabalha com maquinários de altíssima capacidade e elevado custo de capital, cuja ociosidade ou quebra gera passivos milionários. Estudos focados na adequação e no gerenciamento de manutenções industriais de grande escala demonstram que a complexidade física dessas estruturas exige paradas milimetricamente calculadas e controle preditivo (GARCIA, 2000). De maneira análoga, os silos de carregamento ferroviário, as recuperadoras contínuas de pátio e as correias transportadoras funcionam sob regimes severos de fadiga estrutural. A técnica de monitoramento avançado do TMC permite diagnosticar microfalhas mecânicas corriqueiras que, historicamente, passariam despercebidas ou escondidas em meios de controle manuais. Integrar a medição temporal da logística com as diretrizes da engenharia de manutenção garante que a disponibilidade física dos ativos seja preservada, validando o retorno sobre o capital investido na planta e eliminando o desgaste precoce dos equipamentos.

2.5 Gestão da Qualidade e o Empilhamento de Causas

A Engenharia da Qualidade oferece a base metodológica e estrutural para a investigação de desvios e o aprimoramento contínuo dos processos. Trata-se de uma disciplina essencial focada na aplicação de técnicas matemáticas, estatísticas e gerenciais para desenhar, controlar e elevar os padrões de uma operação, garantindo que as entregas finais ou intermediárias atendam às especificações exigidas com o mínimo de variação. Dentro deste escopo analítico, Werkema (2006) destaca que o Princípio de Pareto é uma ferramenta premeditada para a hierarquização de problemas. Este princípio, frequentemente referido como a regra 80/20, diz que, por norma, aproximadamente 80% das consequências ou perdas produtivas em um sistema derivam de apenas 20% de causas específicas, orientando as equipes de engenharia a direcionarem seus esforços corretivos aos "poucos ofensores vitais" ao invés de se esgotarem com os "muitos problemas triviais". Em projetos de melhoria contínua de alta exigência, essas premissas são frequentemente potencializadas pela adoção e utilização da metodologia Six Sigma. O Six Sigma é um sistema gerencial e analítico abrangente, pautado pela premissa da decisão baseada em dados reais, que emprega o método DMAIC (Definir, Medir, Analisar,

Melhorar, Controlar) e ferramentas estatísticas rigorosas para rastrear a causa raiz de defeitos, visando a redução da variabilidade dos processos e a eliminação sistêmica de desperdícios operacionais (MONTGOMERY, 2016). Para operacionalizar essas teorias consagradas na rotina de logística do Complexo Alfa, instituiu-se a aplicação da técnica de empilhamento de causas. O empilhamento de causas é um método estruturado que agrega, filtra e categoriza os apontamentos dos movimentos que ocorrem de forma isolada ao longo de sucessivos turnos, consolidando a somatória total do tempo perdido por cada tipo específico de falha. Essa técnica representa uma evolução prática dos conceitos de Pareto aplicada estritamente à dimensão do tempo operacional, revelando à liderança o impacto cumulativo e sistêmico de ineficiências recorrentes que não seriam notadas em análises diárias superficiais e pouco sólidas.

2.6 Gestão Visual e Filosofia *Lean*

A capacidade de resposta ágil perante os desvios operacionais depende diretamente da velocidade com que a informação traduzida chega aos tomadores de decisão, uma necessidade primária que encontra profundo respaldo na Gestão Visual, um dos pilares estruturantes do Sistema Toyota de Produção e da mentalidade Lean Manufacturing. A Gestão Visual é uma técnica de comunicação organizacional focada em utilizar dispositivos gráficos interativos, painéis intuitivos e alertas evidenciados por cores sensíveis para tornar o status em tempo real de um processo, as metas vigentes e as eventuais discrepâncias imediatamente transparentes e compreensíveis para qualquer indivíduo presente na operação. O principal propósito dessa abordagem é dispensar a dependência de interpretações matemáticas morosas ou a leitura de relatórios descritivos extensos. De acordo com as diretrizes de Liker (2005), os controles visuais no ambiente industrial devem ser projetados para acionar um senso de urgência imediato, facilitando a aplicação do ciclo de correção de rumos enquanto a operação ainda está acontecendo. Mais recentemente, em um contexto de transição tecnológica, Claudino e Calado (2020) observam que a integração e a migração dessas ferramentas enxutas tradicionais para dentro de plataformas digitais em tempo real potencializam a padronização comunicativa no chão de fábrica. Essa modernização assegura que os princípios de visibilidade e transparência tática contidos no Lean sejam escalados, com sucesso, para o ambiente administrativo automatizado que rege a mineração.

2.7 *Business Intelligence* e Indústria 4.0

A transição dos sistemas de captura manual de dados para o processamento inteligente insere integralmente as melhorias deste projeto nos modelos da Indústria 4.0. Schwab (2016) define esta era industrial contemporânea não apenas por atualizações de maquinário, mas pela fusão de tecnologias de fronteira que promovem a integração fluida entre os componentes ciberfísicos e os tomadores de decisão humanos, conferindo às plantas produtivas autonomia e adaptabilidade. Como principal fator impulsionador desse cenário, destaca-se o uso do Business Intelligence (BI). Almeida (2023) argumenta que as soluções de BI transcendem a simples geração de gráficos; elas fornecem a infraestrutura computacional necessária para modelar bancos de dados volumosos, cruzar metadados e expor padrões ou tendências ocultas, organizando massas informacionais que excederiam a capacidade de tabulação analógica da engenharia de rotina. Somado a isso, o emprego de linguagens de programação versáteis, a exemplo do Python, juntamente com bibliotecas especializadas no tratamento matricial como o Pandas, firmou-se como o padrão ouro para a manipulação autônoma e eficiente de grandes tabelas relacionais (MCKINNEY, 2018). A incorporação das inovações digitais no setor mineral já se apresenta como uma realidade fundamentada nas etapas primárias de extração e tratamento. A implementação e validação de sistemas de controle matemático avançado, a exemplo do uso prático de sensores virtuais em malhas fechadas, comprovam que a modelagem contínua de dados e a inferência em tempo real elevam a robustez da tomada de decisão, sobrepondo-se à latência das análises físicas laboratoriais (REIS, 2026). O presente estudo, por sua vez, assume o protagonismo de transportar essa aplicação tecnológica para a malha logística. Ao erradicar a dependência do preenchimento e da análise reativa de planilhas locais e, em seu lugar, introduzir algoritmos dedicados à consolidação autônoma do empilhamento de causas atreladas ao TMC, o setor de expedição passa a atuar de maneira sistêmica. Esta integração operacional confere a eliminação histórica das lacunas de informações nos departamentos, consolidando definitivamente o COI como um autêntico núcleo gerencial de dados e performance, integralmente alinhado e aderente às premissas fundamentais de eficiência impulsionadas pela Quarta Revolução Industrial.

Para operacionalizar essas teorias consagradas na rotina de logística do Complexo Alfa, instituiu-se a aplicação da técnica de empilhamento de causas. O empilhamento atua como uma extensão natural de ferramentas clássicas da Qualidade, como a Estratificação de Dados e o Diagrama de Ishikawa. Ele consiste em um método estruturado que agrega, filtra e categoriza os apontamentos isolados, consolidando a somatória total do tempo perdido por cada macrocausa. Essa técnica representa a aplicação do conceito de Pareto estritamente à dimensão

do tempo operacional, revelando à liderança o impacto cumulativo de ineficiências que não seriam notadas em análises diárias não estratificadas.

2.8 O Ciclo PDCA e o Monitoramento da Melhoria Contínua

A sustentabilidade das otimizações em ambientes de alta complexidade exige a aplicação de metodologias sistemáticas de controle. Nesse contexto, o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) consolida-se como o método iterativo fundamental para o gerenciamento da rotina e a garantia da melhoria contínua (FALCONI, 2004). O método estabelece um fluxo estruturado que abrange desde o planejamento de metas e execução das tarefas até a verificação sistemática dos resultados (*Check*) e a subsequente tomada de ações corretivas ou de padronização (*Act*).

Para que a etapa de verificação seja operacionalmente viável, é imprescindível o acompanhamento evolutivo dos indicadores de desempenho. A capacidade de agir e corrigir desvios depende diretamente da qualidade e da prontidão das informações coletadas. Em operações logísticas de mineração, a automação do tratamento de dados e a emissão de relatórios comparativos funcionam como os pilares que habilitam o ciclo PDCA, garantindo que a liderança possua fundamentação analítica rigorosa para retroalimentar o sistema e promover o amadurecimento constante da planta.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação e Delineamento da Pesquisa

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, fundamentada em uma abordagem quantitativa. Do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa possui caráter descritivo e explicativo, pois não apenas mapeia as falhas do processo, mas investiga as causas de suas variações (GIL, 2002). Quanto aos procedimentos técnicos, a investigação estruturou-se sob o delineamento de um estudo de caso focado nas operações logísticas da Unidade Beta, pertencente ao Complexo Alfa, assumindo uma postura intervencionista visando a resolução de um problema prático da engenharia local.

O ambiente de estudo apresenta alta complexidade operacional: o processo de expedição funciona em regime ininterrupto de 24 horas por dia, sete dias por semana. A alimentação da base de dados logísticos é realizada de forma simultânea e descentralizada por uma equipe composta por vários técnicos de expedição, analistas e operadores distribuídos em turnos rotativos. Esta característica impôs o primeiro grande desafio metodológico da pesquisa: garantir a integridade, a padronização e a rastreabilidade da informação na origem.

Nota de Confidencialidade e Tratamento de Dados: Em estrita observância às políticas de conformidade corporativa (Compliance) e aos acordos de sigilo industrial da companhia, informa-se que os nomes das unidades operacionais, da concessionária parceira e as nomenclaturas específicas dos produtos minerais foram anonimizados ou substituídos por termos genéricos neste documento. Ressalta-se, contudo, que o volume de dados transacionais, a proporção matemática dos gargalos, os métodos de cálculo do TMC e os resultados de produtividade discutidos mantêm estrita fidelidade à operação real, preservando integralmente o rigor metodológico e a validade científica do presente estudo de caso.

3.2 Reestruturação do Instrumento de Coleta e Aplicação do Princípio Poka-Yoke

A fase inicial do projeto consistiu em um diagnóstico minucioso do instrumento inicial de coleta de dados. Em seu formato original, a ferramenta baseada em planilhas eletrônicas permitia a inserção de textos livres por parte dos apontadores e de quem tivesse acesso à mesma. Essa liberdade sistêmica resultava em alta variabilidade interpretativa, erros ortográficos recorrentes e multiplicidade de nomenclaturas para uma mesma falha, criando uma base de dados "suja" que inviabilizava a automação de relatórios gerenciais e a aplicação de técnicas de

BI. Para erradicar essa restrição, a arquitetura da planilha de controle de turnos foi integralmente redesenhada com base na engenharia de confiabilidade humana, aplicando-se o conceito japonês de Poka-Yoke (dispositivo à prova de falhas). O método consistiu em bloquear sistemicamente as células de apontamento livre e parametrizar a interface mediante validações de dados e listas suspensas restritas (drop-downs). A partir dessa intervenção, o técnico de expedição perdeu a capacidade de digitar informações de forma arbitrária. A sua atuação passou a ser restrita à seleção de variáveis exatas contidas em um dicionário de dados previamente mapeado e chancelado pela engenharia. Esse controle rigoroso abrangeu todas as dimensões do apontamento:

- a) Identificação Física: seleção padronizada do ponto de carga e do equipamento utilizado;
- b) Especificação de Produto, Silo e Responsável: restrição às nomenclaturas oficiais do mix de produção, do silo de carregamento e do responsável pelo movimento (Mina ou Concessionária Ferroviária – CF);
- c) Eventos de Parada: mapeamento e consolidação de uma lista de justificativas formais para falhas mecânicas, elétricas e operacionais e demais movimentos que ocorrem no carregamento, sendo possível adicionar mais opções conforme autorização e necessidade.

3.3 Protocolo de Governança e Auditoria de Dados (Quality Assurance)

A implementação do sistema Poka-Yoke mitigou os erros de digitação. Contudo, para assegurar a veracidade cronológica dos eventos, estabeleceu-se uma rotina analítica de Governança de Dados (Quality Assurance). Diariamente (em D-1), a equipe de Gestão da Performance do COI executa a auditoria dos apontamentos, cruzando os horários de início e fim reportados pelos operadores com os relatórios eletrônicos do sistema da planta. Apenas após esta certificação formal, a base de dados é considerada validada e apta para alimentar a camada transacional do algoritmo, garantindo que o diagnóstico analítico seja fundamentado em registros fidedignos.

3.4 Engenharia de Dados Transacionais (ETL) e Normalização Matemática

Com os dados primários higienizados e validados, o fluxo da informação entra na fase de Extraction, Transformation and Load (ETL). Utilizando algoritmos de referenciamento e fórmulas lógicas embutidas, a arquitetura computacional extrai os registros das abas diárias e

os consolida automaticamente em uma aba matriz, denominada "Dados de Carregamento". O papel desta aba central é processar as grandezas temporais e calcular o desempenho bruto de escoamento, além de trazer todas as informações sobre números de lotes, programações e realizados. Neste estágio, a metodologia deparou-se com uma variável complexa inerente à operação ferroviária: a variabilidade dos vagões na malha. A CF disponibiliza composições com tamanhos e capacidades variáveis, o que distorce a comparação direta de tempos brutos de carregamento entre lotes diferentes. Para solucionar esse viés e garantir a apuração matemática correta na avaliação de desempenho, estruturou-se um modelo de Normalização do TMC. O algoritmo converte o tempo real gasto em qualquer lote para uma grandeza equivalente-padrão referenciada em 84 vagões (ou 55 vagões, para a especificidade de trens cargueiros). Esta equalização matemática é o que permite à gestão comparar, na mesma escala, o TMC executado contra a meta horária rigorosa estabelecida nos planejamentos e reprogramações.

3.5 Algoritmo de Desconto de Interferências Exógenas

Na essência do cálculo do TMC validado, desenvolveu-se uma regra de negócio condicional para a justiça do indicador: o algoritmo de expurgo. Em processos logísticos integrados, a mineração frequentemente sofre impactos causados por condições externas incontornáveis, os quais estão fora da governança da gerência da usina e do COI. Quando o técnico de expedição aponta, através da lista de justificativas validada, que uma restrição foi originada pela ferrovia, como, por exemplo, "Atraso na Liberação da Via Permanente (VP)", "Defeito na Locomotiva" ou "Manobra da CF", o sistema ativa uma verificação de concorrência temporal. Se esse evento exógeno ocorrer de maneira sobreposta (concorrente) ao tempo regulamentar de carregamento da mina, a fórmula matemática executa o expurgo, deduzindo automaticamente a duração desse atraso do tempo total computado para o lote. O resultado desta operação é a geração de um indicador de TMC intrínseco e purificado. Ele reflete de forma assertiva a eficiência interna do ponto de carregamento (processos, ativos e equipes da mina), blindando os indicadores da unidade contra penalizações geradas por ineficiências que fogem do escopo de atuação.

3.6 Arquitetura do Banco de Dados Analítico

A maturidade de um sistema de inteligência de dados reside na separação entre a operação e a análise. Manter o processamento pesado de investigação de falhas dentro da mesma planilha diária de controle geraria lentidão, travamentos e risco de corrupção do arquivo

alimentado por diversas pessoas com maneiras diferentes de utilização. Diante disso, a metodologia previu a segregação estrutural da informação. Após a validação diária, as linhas de dados referentes a eventos são migradas para uma planilha paralela, formatada estritamente como um Banco de Dados Relacional Mensal. Esta nova base herda todas as informações validadas: o prefixo do lote, o quantitativo de vagões, o mix do produto carregado, a classificação do responsável (Mina ou CF) e a justificativa raiz. A criação desse ambiente analítico limpo e dedicado foi o pré-requisito técnico para viabilizar a implantação automatizada do método de empilhamento de causas, além de facilitar a construção do código de geração dos informes e construir uma base mensal sólida para se ter histórico. Nesta etapa, ocorre um pilar importante: a classificação das ocorrências identificadas como normais ou anormais. O algoritmo, por sua vez, reconhece em sua base de justificativas e as classifica da maneira correta. Garante-se, portanto, a nutrição dos dados do empilhamento com os desvios corretos.

3.7 Modelagem Lógica do Empilhamento e Bifurcação de Pareto

O diagnóstico avançado do COI apoia-se na metodologia de empilhamento, cuja lógica matemática processa o banco de dados analítico em busca de gargalos. O sistema computa todos os eventos classificados como anormais (desde paralisações de minutos até quebras severas de horas) e executa o somatório integral do tempo perdido por cada categoria de justificativa. Nenhuma ineficiência validada é descartada; a premissa é garantir a captura de todos os movimentos anormais sem distinção e empilhá-los em gráficos segregados por produtos. O modelo analítico foi desenhado para atuar sob uma bifurcação de critérios de severidade, extraindo percepções gerenciais sob duas óticas simultâneas:

- a) Maior Impacto por Duração (Empilhamento): o ranqueamento das falhas que, somadas, mais consumiram horas de operação, independentemente de terem ocorrido uma ou cem vezes;
- b) Maior Impacto por Ocorrência (Pareto): a contagem absoluta da frequência com que os eventos se repetem, destacando falhas intermitentes que degradam a confiabilidade do sistema.

A intersecção destas duas grandezas mapeia os verdadeiros gargalos da expedição, isolando os ofensores que se enquadram na regra 80/20. Isso permite à liderança direcionar os recursos de manutenção, pessoas e processos exatamente para as causas raízes de maior impacto no carregamento de minério da Unidade Beta.

3.8 Automação Computacional Integrada em Linguagem Python

O estágio mais avançado do projeto focou na substituição dos processos manuais de análise. Inicialmente, tarefas como o agrupamento das falhas, a criação dos gráficos de Pareto e a formatação visual das células por tipo de produto eram feitas de maneira artesanal no Excel, o que consumia uma carga horária excessiva da equipe de engenharia e grande possibilidade de inconsistências. Para alinhar a solução aos conceitos da Indústria 4.0, todo o fluxo analítico foi automatizado utilizando a linguagem Python. Para alinhar a solução aos conceitos da Indústria 4.0, todo o fluxo analítico foi automatizado utilizando a linguagem Python. É imperativo ressaltar que o emprego de ferramentas de Inteligência Artificial (Large Language Models) ocorreu estritamente como suporte técnico à escrita e otimização do código-fonte durante a fase de desenvolvimento, não compondo a solução de software final que opera no chão de fábrica. Esse algoritmo foi configurado para ler a base de dados mensal, classificar os eventos, separar as responsabilidades entre a Mina e a CF, e calcular o tempo acumulado das paradas de forma autônoma e rápida. A escolha pelo Python ocorreu por ser uma linguagem leve e adaptável, permitindo que a solução rodasse sem problemas em diferentes computadores do setor. Essa transição eliminou os travamentos e a lentidão que eram comuns ao tentar processar grandes volumes de dados em planilhas saturadas de macros (VBA), garantindo que o sistema de monitoramento fosse escalável e seguro para o uso diário na operação.

3.9 Desenvolvimento do Front-end em HTML e Gestão Visual Interativa

A entrega de valor da automação resultou no desenvolvimento de uma interface de usuário de alto nível (Front-end). O script em Python foi parametrizado, utilizando bibliotecas gráficas avançadas como Plotly.js, para compilar as matrizes de dados e renderizar um painel executivo (Dashboard) exportável em formato HyperText Markup Language (HTML). O painel foi desenhado sob preceitos rigorosos de Gestão Visual interativa, superando as limitações estáticas do Excel. Para garantir total clareza na interpretação das grandezas de tempo e frequência, a disposição dos eixos e rótulos de dados foi mapeada detalhadamente. As principais funcionalidades programadas na interface web incluíram:

- a) Filtros Dinâmicos Táticos: implementação de segmentadores interativos ("Todos", "CF", "MINA"), concedendo aos visualizadores a capacidade de isolar, com um clique, a matriz de responsabilidade desejada, acionando o recálculo instantâneo de toda a interface;

- b) Pareto Automatizado (Visão de Frequência): plotagem simultânea da frequência de eventos, onde o eixo X categoriza o evento restritivo, o eixo Y primário quantifica as ocorrências absolutas em colunas e o eixo Y secundário orienta a curva de percentual acumulado (linha de Pareto), evidenciando de imediato os ofensores vitais;
- c) Gráfico de Barras Empilhadas por Produto (Visão de Impacto Temporal): visualização estratificada onde o eixo X identifica o movimento anormal e o eixo Y computa a duração acumulada em horas, com rótulos flutuantes exibindo o tempo total paralisado no formato HH:MM e o número de ocorrências, além de barra segmentada por cores institucionais atreladas aos produtos;
- d) Geração de Relatórios Executivos: função de layout de impressão responsivo que, com o acionamento de um botão no navegador, consolida o painel em formato Portable Document Format (PDF) para as rotinas táticas, pronto para subsidiar as reuniões diárias de produtividade.

3.10 Ciclo de Desenvolvimento e Refinamento do Algoritmo

A construção da versão definitiva do sistema de empilhamento de causas não ocorreu de forma linear. O desenvolvimento do script em Python exigiu um ciclo iterativo de testes, validações e reescritas de código para garantir que a automação refletisse a realidade operacional do COI com exatidão. Nas versões iniciais do projeto, o maior desafio consistiu em alinhar a lógica de processamento da máquina com a variabilidade dos apontamentos humanos. Como a base de dados de expedição apresenta exceções, sobreposições de horários e diferentes formatos de dados, o algoritmo passou por diversas adaptações estruturais. Foram necessárias múltiplas revisões nas linhas de código para refinar a regra de expurgo matemático, garantindo que o sistema não contabilizasse o tempo de atraso em duplicidade e não omitisse microfalhas importantes durante a soma das horas. Além da consolidação matemática das planilhas, a construção da interface visual em HTML também passou por sucessivas atualizações. A integração simultânea da curva de Pareto com o gráfico de barras empilhadas exigiu testes exaustivos com a biblioteca gráfica para assegurar que a segmentação de cores por produto e os botões de filtro (Mina e CF) funcionassem de forma fluida, sem erros de renderização. Para atingir a versão consolidada, adotou-se um período de transição e homologação. O algoritmo rodou em paralelo com o fechamento manual antigo, permitindo que a equipe comparasse os resultados. Cada divergência encontrada entre o cálculo humano e o processamento da máquina gerava um novo ajuste no código-fonte. Esse esforço de melhoria contínua garantiu que a versão

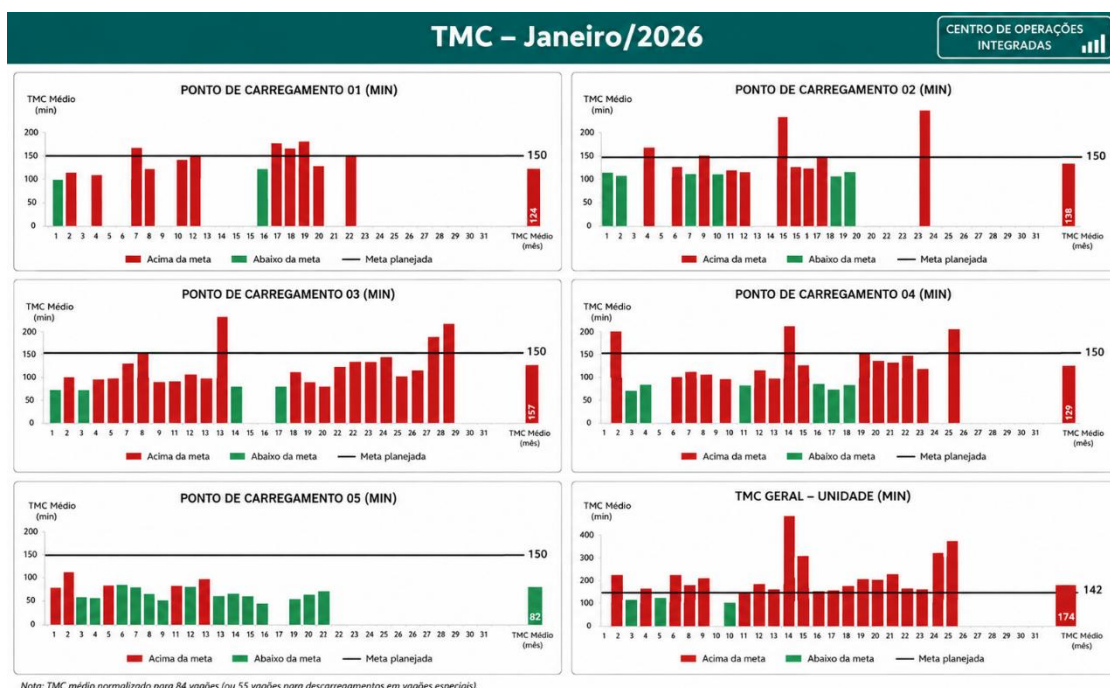
final do sistema alcançasse a robustez e a confiabilidade exigidas pela diretoria para a tomada de decisão estratégica.

dados exportada seja processada com precisão pelo algoritmo em Python, viabilizando a correta segregação das responsabilidades e a precisão do painel de monitoramento.

4.2 Consolidação da Base Histórica e Eliminação da Sobrecarga Operacional

O resultado inicial materializou-se na confiabilidade dos registros. Segundo Falconi (2004), o gerenciamento da rotina se sustenta sobre bases padronizadas e íntegras. A parametrização dos apontamentos consolidou o histórico analítico e auditável, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 2 – Dashboard de monitoramento do TMC por produto – Jan/2026



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A automação em Python gerou a supressão de atividades braçais da operação. A construção do informe, que demandava esforço e formatação manual prolongada, passou a ser processada em tempo minimizado. Houve a redução expressiva do tempo empregado pela equipe em reuniões que antes eram ocupadas integralmente com conferências de divergências informacionais. O sistema unificou a visualização dos dados, de modo que o núcleo de performance do COI (setor responsável pelas estratégias de planejamento e alinhamento do escoamento) assumiu uma postura analítica focada exclusivamente na resolução das variações da planta produtiva.

4.3 Sinergia Organizacional e Nova Governança de Rotina

Os painéis interativos em HTML alteraram a governança da unidade. Conforme Liker (2005), mecanismos visuais devem gerar um senso de urgência técnica para correção de desvios. A plataforma estruturou a dinâmica das reuniões de alinhamento logístico. A digitalização de fundamentos do modelo Lean favorece a comunicação no chão de fábrica (CLAUDINO; CALADO, 2020). As reuniões tornaram-se o ponto de convergência de engenheiros e supervisores de operação e manutenção, discutindo a estratégia baseados em um painel coeso e apartidário, conforme apresentado na Figura 2. O histórico de apurações subjetivas foi substituído pelo acompanhamento das métricas baseadas no tempo verificado em sistema.

Figura 3 – Gráfico de Pareto: frequência de eventos apontados como desvios – Expedição Alfa



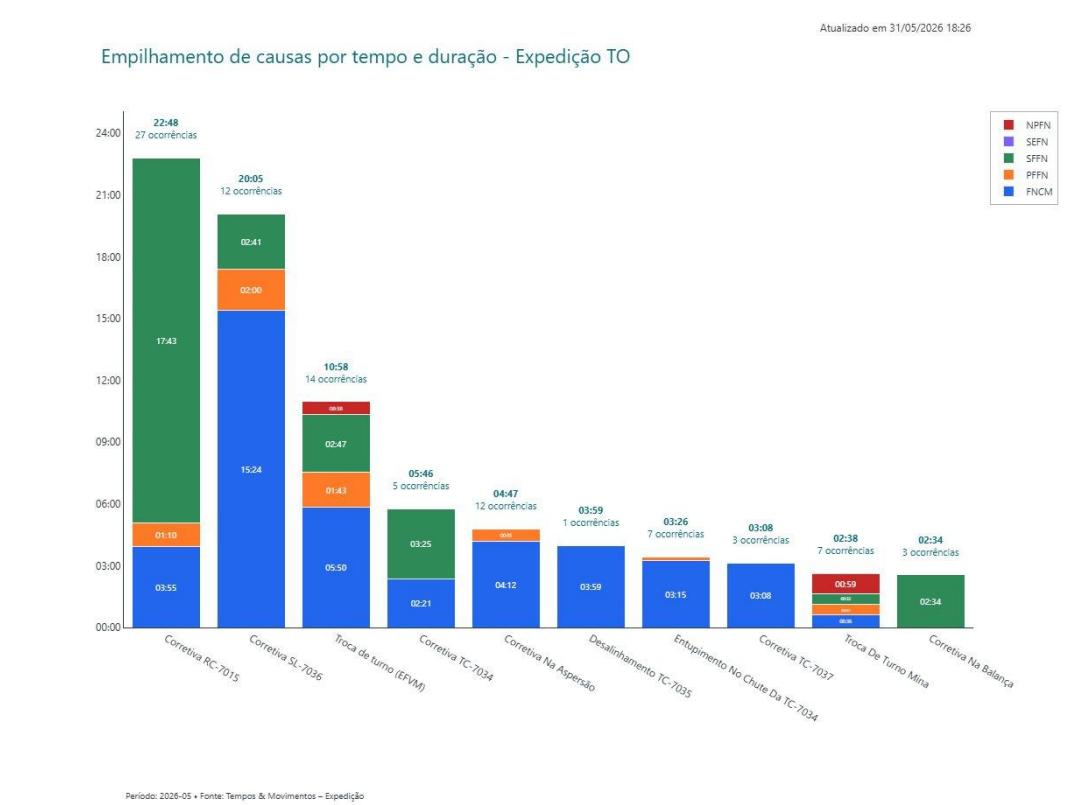
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4 Diagnóstico Físico e Intervenções de Manutenção Preditiva

Werkema (2006) indica que o agrupamento pelo Princípio de Pareto orienta as ações corretivas aos gargalos de maior intensidade. A estratificação por tipo de minério evidenciou falhas operacionais crônicas ocultas na média global de desempenho. Pela avaliação das informações interativas, a equipe mapeou que o Minério Fino Comum (MFC) representava a origem mecânica primária das aderências e entupimentos de alta severidade nas calhas de transferência inclinadas (chutes de descarga). Munido do diagnóstico analítico preditivo atestando que os níveis de umidade deste produto comprometiam o fluxo do sistema, o planejamento operacional adaptou sua programação. Implementaram-se rotinas logísticas focadas e intervenções preventivas de limpeza nas estruturas físicas do silo antes das expedições do MFC, garantindo a redução sistemática das quebras corretivas de equipamento. Esse

diagnóstico é evidenciado na Figura 3, que demonstra o empilhamento de causas por tempo e duração, segregado por produto.

Figura 4 – Gráfico de empilhamento de causas por tempo e duração – Expedição Alfa



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.5 Otimização Logística Integrada e Atingimento de Resultados Superiores

O gerenciamento dos intervalos em redes ferroviárias é variável de alto custo na mineração (BALLOU, 2006). A aplicação do painel isolou as interferências exógenas e destacou a "Troca de Turno da Ferrovia" como uma ineficiência crítica contínua na análise visual. Com o lastro métrico evidenciando o montante de horas retidas no processo, conforme quantificado na Figura 2, o COI viabilizou as tratativas junto à CF. A revisão procedimental conjunta proporcionou a eliminação prática dos atrasos logísticos pertinentes unicamente ao fluxo das trocas das equipes ferroviárias. Os impactos refletiram na otimização ampla do carregamento e habilitaram a revisão dos índices projetados de tempo por lote de expedição. A unidade demonstrou consistência no escoamento e elevação da confiabilidade diária do transporte frente a parâmetros operacionais anteriormente reprimidos.

4.6 Acompanhamento Evolutivo e Potencial Analítico para Melhoria Contínua

A transição para uma rotina pautada por inteligência de dados viabilizou não apenas o diagnóstico diário da operação, mas também a capacidade estrutural de realizar fechamentos mensais logísticos precisos. Na Engenharia de Produção, o monitoramento evolutivo de gargalos é a premissa que sustenta o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act). A consolidação da nova planilha de apontamentos, aliada ao cálculo automatizado do TMC e ao empilhamento visual de causas, criou a base metodológica necessária para medir, de forma confiável, a evolução ou regressão dos eventos anormais da planta ao longo do tempo.

Para exemplificar o potencial analítico propiciado por essa nova arquitetura de dados, a Figura 5 apresenta uma demonstração do rastreo comparativo das causas críticas extraídas da ferramenta entre os meses de março e abril de 2026.

Figura 5 – Demonstração do Comparativo Evolutivo Mensal de Causas Anormais (Março vs. Abril/2026)

Causa (Anonimizada)	Horas (Mar/26)	Horas (Abr/26)	Ocorr. (Mar/26)	Ocorr. (Abr/26)	Δ Horas %	Δ Ocorr. %	Média h/ev (Mar)	Média h/ev (Abr)
Troca de turno - Área A	27:46:00	38:17:00	46	54	37.9%	17.4%	0.604	0.709
Corretiva na TC- XXXX	25:53:00	34:53:00	36	39	34.8%	8.3%	0.719	0.894
Corretiva na TC- YYYY	08:54:00	10:59:00	10	3	23.4%	-70.0%	0.890	3.661
Corretiva na TC- ZZZZ	05:40:00	08:40:00	6	9	52.9%	50.0%	0.944	0.963
Limpeza programada	12:46:00	05:49:00	12	6	-54.4%	-50.0%	1.064	0.969
Atraso logístico	09:20:00	04:55:00	3	2	-47.3%	-33.3%	3.111	2.458

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os dados contidos neste comparativo atuam como uma prova de conceito prático do sistema desenvolvido. Eles demonstram que, a partir da implementação do projeto, a gestão passou a dispor de subsídios matemáticos para avaliar o comportamento sistêmico do escoamento. É possível identificar com clareza que, enquanto o processo de "Limpeza de Linha" apresentou redução no tempo retido, o gargalo de "Troca de Turno Ferrovia" acumulou uma elevação severa de 37,9% nas horas perdidas. A literatura técnica de planejamento logístico (BALLOU, 2006) corrobora esse achado ao definir que transições de equipe são janelas de alta vulnerabilidade, onde a falha de comunicação (handover) e a ociosidade do maquinário impactam diretamente o ciclo logístico. Identificada essa anomalia pelo painel, a ação gerencial imediata consistiu na revisão do protocolo de handover e alinhamento

procedimental junto aos supervisores da concessionária, visando padronizar o repasse das composições.

Além do volume de horas, a estrutura de dados destacou o comportamento de severidade do equipamento "TC-xxxx" reduziu sua frequência de quebras em 70%, porém elevou o seu tempo médio de reparo de 0,89 horas para 3,66 horas. Dessa forma, conclui-se que o verdadeiro resultado consolidado desta pesquisa não se limita à modernização visual dos dados, mas à entrega definitiva de um ambiente analítico que, doravante, suportará e direcionará possíveis as medidas de mitigação e tomadas de decisão táticas da liderança da unidade.

4.7 Escalabilidade do Projeto e Reconhecimento Institucional

A viabilidade de integrar BI com a teoria metodológica validou a capacidade de desenvolver bases de dados em autonomia decisória analítica (SCHWAB, 2016; ALMEIDA, 2023). O trabalho promovido pelo setor alcançou destaque institucional na corporação, sendo consagrado, por períodos seguidos, com prêmios de excelência em gestão operacional no contexto das avaliações do Corredor Logístico regional. A validação técnica dos relatórios fundamentou a integração deste padrão corporativo logístico nas Unidades Gama e Delta, confirmando que a parametrização por dados impulsiona a evolução contínua da capacidade processual de toda a malha produtiva.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de pesquisa aplicada teve como propósito desenvolver e implementar um sistema de monitoramento analítico para o TMC no COI da Unidade Beta. Diante da fundamentação explorada e dos resultados empíricos, conclui-se que o objetivo geral foi alcançado, confirmando a premissa de que a ineficiência no escoamento logístico possuía como causa-raiz uma limitação de tratamento de dados, e não puramente uma limitação física dos ativos.

A resposta aos objetivos específicos evidencia o rigor da solução. A padronização via *Poka-Yoke* eliminou o viés qualitativo na coleta primária. Posteriormente, o modelo matemático de normalização atendeu à meta de equalizar os tempos brutos, convertendo todos os ciclos para uma base de comparação isonômica estruturada em 84 vagões (ou 55 para carregamentos de massa). Em paralelo, o algoritmo de desconto de interferências cumpriu sua função de

segregação, permitindo à unidade isolar o tempo das restrições da concessionária ferroviária e diagnosticar os atrasos internos reais através do empilhamento de causas.

O sistema, chancelado pelas diretorias operacionais, substituiu o controle reativo em planilhas por um ambiente automatizado com programação em Python. Esta mudança não apenas anulou a sobrecarga braçal da engenharia, mas capacitou a equipe a focar em intervenções preditivas, como a manutenção corretiva nos silos atrelada às propriedades físicas do Minério Fino Comum (MFC). O trabalho alcançou a premiação de excelência operacional do Corredor Logístico e resultou na replicação técnica para as Unidades Gama e Delta.

Apesar dos avanços inequívocos na governança do carregamento, o sistema apresenta fronteiras tecnológicas relacionadas à sua arquitetura atual. O principal desafio incide na intervenção primária dos usuários: a confiabilidade do diagnóstico matemático continua ligada à precisão dos fatos inseridos pelos apontadores locais. O sistema assume que a indicação contida nas interfaces confere exatidão com o movimento temporal ocorrido na máquina, o que demanda que as coordenações de performance realizem inspeções ou dupla checagem rigorosa para assegurar a autenticidade diária do acervo registrado. Computacionalmente, a base repousa sob planilhas corporativas compartilhadas. Esse fator logístico organizacional engendra limitações de interoperabilidade e latência, restringindo o acoplamento de painéis avançados automatizados em nuvem. Como consequência estrutural dessa variável sistêmica, o código de geração gráfica depende estritamente do processamento em lotes diários acionados pelo usuário gerencial, impedindo a alimentação orgânica e contínua do banco de horas em visualizações de tempo real.

Visando a evolução da arquitetura desenvolvida e sua aderência às inovações do planejamento digital logístico, recomendam-se implementações estruturais nos períodos subsequentes da gestão do COI. O horizonte tecnológico do projeto direciona-se para a conversão do atual banco de dados e suas planilhas integradas em uma plataforma computacional centralizada dedicada exclusivamente aos apontamentos da malha de expedição. A referida plataforma viabilizaria conexões operacionais orgânicas (via *Application Programming Interfaces* – APIs) integradas aos sistemas nativos de *Enterprise Resource Planning* (ERP) da corporação e às pranchas logísticas atualizadas (SOE). O mapeamento sistêmico mitigaria o preenchimento exaustivo e automatizaria a captação temporal e mecânica inerente ao carregamento, suprimindo a carência por *Dashboards* integralmente vinculados à nuvem e autoatualizáveis. Por fim, no campo algorítmico avançado, a adoção e a pesquisa de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) atuariam em processos preditivos focados na acuracidade primária da anotação, cruzando desvios numéricos irreais informados em

apontamentos de frente de carga. A manutenção das dinâmicas visuais pautadas no modelo *Poka-Yoke*, acompanhada pelo treinamento virtual e padronizado em usabilidade funcional para as equipes de base, elevaria em definitivo o nível de conformidade, consolidando as operações do controle de carregamento na referência tecnológica setorial.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ALMEIDA, R. Business Intelligence: tecnologias para a tomada de decisão. São Paulo: Atlas, 2023.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). Relatório Anual do Setor Ferroviário 2023. Brasília: ANTF, 2023.
- BALLOU, R. H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- CLAUDINO, C.; CALADO, R. Avaliação da integração entre a abordagem Lean e a Indústria 4.0: uma revisão da literatura. Journal of Lean Systems, v. 4, n. 2, p. 78-95, 2020.
- DAVENPORT, T. H.; HARRIS, J. G. Competição analítica. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- DRUCKER, P. F. Fator humano e desempenho. São Paulo: Pioneira, 1998.
- FALCONI, V. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia. 9. ed. Nova Lima: INDG, 2004.
- FALCONI, V. TQC: controle da qualidade total (no estilo japonês). 8. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços, 2004.
- FORTULAN, M. R.; GONÇALVES FILHO, E. V. Uma proposta de aplicação de business intelligence no chão-de-fábrica. Gestão & Produção, v. 10, n. 3, p. 253-268, 2003.

- GARCIA, A. D. Experiência de gerenciamento da reforma e adequação de um moinho de bolas de 4000 HP para nova aplicação. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Informações sobre a Economia Mineral Brasileira 2024. Brasília: IBRAM, 2024.
- LIKER, J. K. O modelo Toyota: 14 princípios de gestão. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- MCKINNEY, W. Python para Análise de Dados. São Paulo: Novatec, 2018.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- OLIVEIRA, N. C. Análise do projeto de produção de fécula de mandioca para abastecer as mineradoras do entorno de Mariana em Minas Gerais. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, Mariana, 2009.
- REIS, J. S. Sensor virtual para classificação da sílica no produto de um processo de flotação de minério de ferro. 2026. Monografia (Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2026.
- SANTOS, K. M.; COSTA, C. A. Dashboards aplicados no apoio a gestão da produção. Revista Produção Online, v. 22, n. 4, 2022.
- SCHWAB, K. A quarta revolução industrial. São Paulo: Edipro, 2016.
- WERKEMA, C. Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.