



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



GABRIEL CORDEIRO MARQUES

**IMPACTO DO CARREGAMENTO SEQUENCIAL NO TEMPO DE OPERAÇÕES DE
CARREGAMENTO EM MINAS A CÉU ABERTO: UM ESTUDO DE CASO**

OURO PRETO
2024



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



GABRIEL CORDEIRO MARQUES

IMPACTO DO CARREGAMENTO SEQUENCIAL NO TEMPO DE OPERAÇÕES DE CARREGAMENTO EM MINAS A CÉU ABERTO: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Planejamento de lavra de mina e Operação de mina

Orientador: Prof. Dr Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M357i Marques, Gabriel Cordeiro.
Impacto do carregamento sequencial no tempo de operações de carregamento em minas a céu aberto [manuscrito]: um estudo de caso. / Gabriel Cordeiro Marques. - 2024.
39 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Engenharia de minas. 2. Minas e mineração. 3. Mineração a céu aberto. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.271

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Cordeiro Marques

Impacto do carregamento sequencial no tempo de operações de carregamento em minas a céu aberto: um estudo de caso

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 11 de outubro de 2024

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) (Universidade Federla de Ouro Preto)
Dr. Walter Schmidt Felsch Junior - Consultor
Eng. de Minas Bruno Nasser Arantes - VALE

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 14/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/10/2024, às 22:56, 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 **0795192** e o código CRC **94D4D616**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a graça da vida;

Aos meus pais, por todo o amor e dedicação;

A minha irmã, por todo o amor e companheirismo;

A minha família, por ser sempre minha base;

A minha namorada, por todo o amor e carinho;

Aos meus amigos e colegas de faculdade, pelo tempo de qualidade;

Aos professores, em especial Carlos Arroyo, pelo ensino e respeito;

A Escola de Minas e UFOP, pela educação gratuita e de qualidade;

A Vale, pelo estágio, em especial Naia, Palloma, Bruno, Felipe e Matheus.

RESUMO

O presente trabalho aborda a análise comparativa entre os métodos de carregamento tradicional e sequencial em uma mina de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero, com foco em eficiência operacional, custos e impactos ambientais. O objetivo principal é avaliar os impactos positivos do carregamento sequencial nessas operações. A metodologia empregada envolveu a análise dos tempos de carregamento, manobra e fila, utilizando sistemas de monitoramento em tempo real e ferramentas de simulação para obter dados precisos. Além disso, foram comparados os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa entre os dois métodos. Os principais resultados sugerem que o carregamento sequencial é mais eficiente, reduzindo significativamente o tempo ocioso dos caminhões e contribuindo para a descarbonização das operações. A conclusão reforça que o carregamento sequencial pode proporcionar vantagens operacionais e ambientais, tornando-o uma opção estratégica para aumentar a produtividade e reduzir o impacto ambiental no setor de mineração.

Palavras-chave: Carregamento. Descarbonização. Eficiência Operacional.

ABSTRACT

The present work addresses the comparative analysis between traditional and sequential loading methods in an iron mine located in the Iron Quadrangle, focusing on operational efficiency, costs and environmental impacts. The main objective is to evaluate the positive impacts of sequential loading in these operations. The methodology used involved the analysis of loading, maneuvering and queue times, using real-time monitoring systems and simulation tools to obtain accurate data. Furthermore, operational costs and greenhouse gas emissions between the two methods were compared. The main results suggest that sequential loading is more efficient, significantly reducing truck idle time and contributing to the decarbonization of operations. The conclusion reinforces that sequential loading can provide operational and environmental advantages, making it a strategic option to increase productivity and reduce environmental impact in the mining sector.

Key words: Loading. Decarbonization. Operational Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carregamento tradicional (Fonte: Almeri, 2023).....	7
Figura 2: Carregamento sequencial na Mina Alfa.....	10
Figura 3: Fases do desenvolvimento do estudo	20

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados diários do mês de maio:	23
Gráfico 2: Resultados diários do mês de maio:	23
Gráfico 3: Resultados diários do mês de maio:	23
Gráfico 4: Resultados diários do mês de maio:	23
Gráfico 5: Resultados diários do mês de junho:	24
Gráfico 6: Resultados diários do mês de junho:	24
Gráfico 7: Resultados diários do mês de junho:	24
Gráfico 8: Resultados diários do mês de junho:	24
Gráfico 9: Resultados diários do mês de julho:	25
Gráfico 10: Resultados diários do mês de julho:	25
Gráfico 11: Resultados diários do mês de julho:	25
Gráfico 12: Resultados diários do mês de julho:	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Tipos de Carregamento usados na Mina Alfa	5
2.1.1 Carregamento Tradicional	6
2.1.2 Carregamento Sequencial	9
2.2 Parâmetros importantes na comparativa entre métodos de carregamento.....	11
2.2.1 Eficiência Operacional	11
2.2.2 Custos Operacionais	13
2.2.3 Impacto Ambiental	13
2.2.4 Segurança e Riscos Operacionais	15
2.2.5 Sistemas de Despacho	16
2.2.6 Tempo de operação.....	18
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Pesquisa Bibliográfica	20
3.2 Estudo de Caso	20
3.2.1 Coleta de Dados.....	21
3.2.2 Apresentação dos Resultados	21
3.2.3 Discussão dos Resultados.....	21
4 ESTUDO DE CASO: MINA ALFA, COMPLEXO BETA.....	22
5 DISCUSSÃO.....	26
CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

A operação de carregamento de minério com carregadeiras em minas a céu aberto é um dos fatores determinantes para a eficiência e os custos operacionais das mineradoras. Com a crescente demanda por processos otimizados e mais sustentáveis, métodos como o carregamento sequencial têm se destacado por oferecer maior produtividade, redução de custos e contribuição para iniciativas de descarbonização. Segundo Coutinho (2024), a aplicação de melhorias contínuas no carregamento pode gerar avanços significativos, especialmente em termos de eficiência operacional, economia de recursos e redução da emissão de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade.

O carregamento tradicional é o mais amplamente utilizado em operações de mineração a céu aberto e caracteriza-se pelo carregamento de um caminhão de cada vez. Embora simples e de fácil implementação, o carregamento tradicional pode enfrentar desafios de eficiência, especialmente em minas de grande escala, onde o tempo ocioso entre o reposicionamento dos caminhões pode impactar a produtividade operacional, além de aumentar as emissões de carbono devido ao tempo prolongado de inatividade dos veículos (MELO, 2020). A busca pela descarbonização exige que mineradoras revisem esse modelo, buscando alternativas mais eficientes e menos poluentes.

O carregamento sequencial, por sua vez, permite que os caminhões sejam carregados em uma sequência contínua, sem necessidade de grandes manobras ou tempo ocioso. Este método tem se mostrado eficaz na redução do tempo de manobra de carga, no aumento da produtividade e na diminuição do consumo de combustível, impactando diretamente a redução das emissões de gases de efeito estufa. A evolução tecnológica, aliada ao uso de pás carregadeiras e sistemas de monitoramento em tempo real, contribui para operações mais seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis, permitindo maior controle e otimização dos processos, conforme observado por Hoose e Kripka (2023).

A competitividade crescente no setor de mineração e a busca por maior eficiência operacional têm levado à adoção de novas tecnologias e métodos de carregamento que, além de aumentar a produtividade, ajudam as empresas a cumprirem suas metas de descarbonização. No entanto, ainda há dúvidas sobre os impactos, em termos de custo-benefício e de emissões, da escolha do método de carregamento a ser utilizado. Neste contexto, a questão central desta pesquisa é: Qual o impacto do carregamento sequencial nas operações de carregamento em uma mina a céu aberto, especialmente no que diz respeito ao tempo de fila, tempo de carregamento e tempo de manobra?

O presente estudo foi desenvolvido com base na literatura disponível e na observação das operações realizadas na Mina Alfa, situada no Complexo Beta. Por razões de proteção ao sigilo empresarial, os nomes são fictícios. Nessa mina, são utilizadas pás carregadeiras alternando entre os métodos de carregamento tradicional e carregamento sequencial. Em ambos os casos, o material a ser carregado é desmontado por detonação eletrônica e, por conseguinte, a mina dispensa a adoção de escavadeiras, que fazem esse desmonte mecanicamente. A introdução de métodos mais eficientes de carregamento, como o sequencial, também tem contribuído para a redução do consumo de combustível, resultando em menores emissões de gases poluentes, um fator essencial para a descarbonização das operações.

O uso de ferramentas de simulação, como o SIMMIM, discutido por Alexandre et al. (2014), tem permitido a otimização de operações dentro das minas, inclusive a de carregamento, fornecendo dados valiosos para o planejamento das operações e para a redução de emissões. A introdução de carregadeiras de grande porte e sistemas de monitoramento em tempo real revolucionou a forma como o carregamento é realizado, proporcionando um fluxo contínuo e minimizando o tempo ocioso dos caminhões, o que também resulta na diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o uso de pás carregadeiras permite uma movimentação eficiente do material, garantindo que os ciclos de carregamento sejam rápidos e precisos, com menor impacto ambiental (AMJATH et al., 2022).

Na Mina Alfa, localizada no Complexo Beta, essas tecnologias foram aplicadas com sucesso e toda a operação é feita com o uso de sistemas de despacho de caminhões e máquinas de alta precisão. O plano de lavra online e o controle rigoroso dos ciclos de carregamento tornaram o processo mais eficiente, permitindo que as operações de carregamento fossem realizadas de forma contínua, com menor tempo de espera entre os ciclos de carga e menor consumo de combustível, o que contribui diretamente para a descarbonização das operações (ANDRADE, 2014).

O presente trabalho analisa os impactos do carregamento sequencial sobre os ciclos de tempo das operações na Mina Alfa. Acredita-se que o uso do carregamento sequencial gera um resultado positivo nas operações de carregamento em comparação ao desempenho do carregamento tradicional e, conseqüentemente, na operação de um modo geral. Além disso, a redução do tempo ocioso e do consumo de combustível durante as manobras e o carregamento tem um impacto direto nas emissões de carbono, tornando o carregamento sequencial uma ferramenta importante para alcançar as metas de descarbonização da indústria.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo oferece uma contribuição significativa para o conhecimento sobre métodos de carregamento em minas a céu aberto, ao explorar o impacto do

carregamento sequencial no desempenho operacional e na redução de emissões de gases de efeito estufa. Essa análise permite que o trabalho forneça novos insights sobre a eficiência dos diferentes métodos e apresente soluções práticas para otimizar o tempo de operação nas frentes de lavra, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade ambiental.

No contexto mercadológico, este estudo oferece relevância prática para o setor de mineração, principalmente em regiões de alta produção, como o Quadrilátero Ferrífero, onde a mina Alfa e o Complexo Beta estão situados. Empresas que buscam melhorar sua competitividade, reduzir custos operacionais e cumprir suas metas de descarbonização podem se beneficiar das descobertas sobre o impacto do carregamento sequencial. A análise do tempo de fila, carregamento e manobra, juntamente com a avaliação das emissões de carbono, pode auxiliar as mineradoras a escolherem as melhores estratégias operacionais, garantindo maior produtividade, segurança e menor impacto ambiental nas operações.

A originalidade deste estudo reside na análise detalhada do carregamento sequencial, uma área ainda pouco explorada na literatura acadêmica. Embora existam muitos estudos sobre operações de carregamento em minas a céu aberto, não foram encontrados trabalhos que se concentram especificamente no método de carregamento sequencial e suas implicações operacionais e ambientais. Este estudo visa iniciar o preenchimento dessa lacuna, oferecendo uma nova perspectiva sobre a otimização das operações de carregamento em minas, com foco também na descarbonização.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos positivos do processo de carregamento sequencial numa mina de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os tempos de carregamento, manobra e fila nas operações de carregamento sequencial em comparação com o método tradicional, identificando como esses fatores influenciam a eficiência operacional e a produtividade da mina.

- Comparar o carregamento tradicional e o sequencial, com base nos indicadores de eficiência, como tempos de carregamento, manobra e fila, destacando os pontos fortes e fracos de cada método.
- Identificar os impactos ambientais do carregamento sequencial em comparação ao tradicional, com ênfase na contribuição para a descarbonização das operações de mineração.
- Avaliar os custos operacionais associados ao carregamento sequencial e ao tradicional, destacando os benefícios de longo prazo do método sequencial na redução de custos relacionados ao consumo de combustível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lavra de uma mina de ferro é um processo complexo e rigorosamente planejado, que envolve uma série de operações interdependentes para a extração eficiente e segura do minério. O ciclo típico de lavra em minas a céu aberto engloba quatro etapas fundamentais: perfuração, detonação, carregamento e transporte. Esses procedimentos, além de essenciais para o funcionamento das minas, determinam diretamente a eficiência operacional e os custos envolvidos (ANDRADE, 2014).

Na fase de perfuração, são feitos furos no terreno que posteriormente serão preenchidos com explosivos. Esta etapa é crucial para a preparação do desmonte de rochas, pois a precisão na perfuração influencia diretamente o sucesso das próximas fases (ACD, 2023). Logo em seguida, ocorre a detonação, que consiste na utilização de explosivos para fragmentar o minério, permitindo o acesso ao material de forma mais eficiente e facilitando o trabalho das máquinas de carregamento (ANDRADE, 2014).

O carregamento é a etapa na qual o minério fragmentado é removido da frente de lavra por meio de pás carregadeiras ou escavadeiras, que depositam o material em caminhões ou sistemas de transporte automatizados (MELO, 2020). Por fim, o transporte envolve o deslocamento do minério até áreas de processamento ou beneficiamento, utilizando caminhões de grande porte ou transportadores de correia (AMJATH et al., 2022).

Cada uma dessas etapas é orientada por parâmetros chave que influenciam diretamente o desempenho das operações, como a eficiência dos equipamentos, tempo de ciclo de carregamento e transporte, capacidade de produção e sincronização das atividades. A integração adequada dessas operações permite a otimização do processo de extração, garantindo a produtividade, segurança e sustentabilidade da lavra, especialmente em minas de grande porte, como as de ferro (CERNA; OBREDOR-BALDOVINO, 2024).

2.1 Tipos de Carregamento usados na Mina Alfa

Os métodos de carregamento em minas a céu aberto são de ampla relevância para a eficiência das operações, afetando diretamente os custos operacionais, o tempo de execução e a segurança nas atividades. Várias abordagens são utilizadas para otimizar o carregamento, desde métodos

tradicionais, como o carregamento convencional com uso de pás carregadeiras, até técnicas mais avançadas, como o carregamento sequencial, cada uma com suas particularidades e vantagens.

De acordo com Carneiro (2014), a escolha apropriada do método de carregamento, aliada à eficiente coordenação dos equipamentos, é essencial para aumentar a produtividade em operações de mineração. Nesse sentido, a análise de diferentes métodos de carregamento é fundamental para melhorar a tomada de decisões, tanto operacionais quanto estratégicas, em minas a céu aberto. O carregamento sequencial, em particular, tem se destacado por seu potencial de reduzir tempos ociosos e otimizar o uso de pás carregadeiras no carregamento contínuo de caminhões.

A correta escolha e implementação desses métodos podem levar a ganhos substanciais em eficiência operacional, com impacto direto sobre a segurança e a produtividade da mina, consolidando a importância de uma análise detalhada de cada abordagem (CERNA; OBREDOR-BALDOVINO, 2024).

2.1.1 Carregamento Tradicional

O carregamento tradicional em minas a céu aberto é amplamente empregado em cenários de mineração onde a simplicidade operacional e a eficiência são fatores importantes. Esse método, segundo Coutinho (2024), é frequentemente escolhido devido à simplicidade na operação e à sua adaptabilidade em diferentes tipos de terreno e condições operacionais. Embora seja um método tradicional, sua eficiência depende diretamente da escolha e do dimensionamento correto dos equipamentos, bem como da capacidade de coordenação entre os sistemas de carregamento e transporte.

Nesse método, a pá carregadeira tem a função principal de transportar o material já fragmentado por explosivos para caminhões de transporte. Diferente das escavadeiras, as carregadeiras não precisam desmontar mecanicamente o material, pois este já foi previamente fragmentado durante o processo de desmonte. Isso permite que a pá carregadeira se concentre na movimentação de grandes volumes de material, melhorando a eficiência do processo.

Segundo a ACD Mineração (2023), o desmonte por explosivos é essencial para garantir que o minério seja fragmentado em partes menores e manejáveis, facilitando o trabalho das pás carregadeiras. Sem essa etapa, o carregamento seria mais demorado e demandaria maior esforço mecânico por parte das máquinas, impactando diretamente a produtividade da operação. Em cenários onde o material é inadequadamente fragmentado, a eficiência do carregamento cai

significativamente, uma vez que a pá carregadeira precisaria utilizar mais força para remover o material, além de causar maior desgaste no equipamento.



Figura 1: Carregamento tradicional (Fonte: Almeri, 2023)

Uma vantagem do carregamento com pás carregadeiras após o desmonte é a agilidade do processo. Como o material já está solto, a pá carregadeira pode trabalhar em ciclos rápidos de carregamento, preenchendo caminhões de forma contínua e eficiente. Além disso, como ressaltado por ACD (2023), essa prática é extremamente adaptável a diversas condições de terreno e variações nas demandas de produção, permitindo que as operações continuem mesmo em cenários geológicos desafiadores. Essa flexibilidade é uma das razões pelas quais o método de carregamento com carregadeiras é amplamente utilizado em minas a céu aberto.

Outra vantagem significativa é o custo-benefício. De acordo com Coutinho (2024), o uso de pás carregadeiras reduz a necessidade de aquisições constantes de novos equipamentos, já que são máquinas robustas, projetadas para operar em condições extremas, como alta produção em minas de grande porte. Além disso, o processo de carregamento é simplificado e, como mencionado, menos oneroso em termos de manutenção, uma vez que o material já está previamente fragmentado, diminuindo o esforço mecânico das máquinas e prolongando sua vida útil.

O carregamento com pás carregadeiras no Complexo Beta também favorece a redução dos custos operacionais, tendo em vista que a frota de máquinas de carga é compartilhada entre três

minas do complexo e a necessidade constante de grandes locomoções é facilitada em comparação às escavadeiras de esteiras. Conforme apontado pela Melo (2020), o tempo reduzido de ciclo de carregamento e a diminuição da ociosidade dos caminhões enquanto aguardam para serem carregados são fatores que contribuem diretamente para a economia de combustível e aumento da eficiência. Em uma operação de carregamento tradicional, onde a coordenação entre o carregamento e o transporte é crucial, a sincronização entre os tempos de chegada dos caminhões e o desempenho das carregadeiras garante um processo eficiente.

No entanto, o método também apresenta desvantagens. Uma delas está associada à necessidade de um desmonte eficiente. Caso o desmonte do material por explosivos não seja bem executado, a eficiência do carregamento cai drasticamente, pois a pá carregadeira terá dificuldades em operar com material que não foi devidamente fragmentado. Isso pode resultar em atrasos e sobrecarga nos equipamentos, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a produtividade global.

Outro desafio do carregamento convencional com carregadeiras em comparação a métodos automatizados é a maior dependência de operadores experientes. O sucesso das operações de carregamento com carregadeiras depende mais diretamente da habilidade dos operadores em posicionar os caminhões, gerenciar o volume de material e coordenar o ciclo de trabalho. Isso significa que a produtividade pode variar significativamente com base na experiência da equipe envolvida.

Em termos de segurança, o carregamento com carregadeiras apresenta desafios que precisam ser cuidadosamente gerenciados. O tráfego constante de caminhões em torno da carregadeira e a necessidade de manobras precisas para posicionamento aumentam o risco de acidentes. Como mencionado por Teixeira et al. (2019), em áreas de mineração com tráfego intenso, o planejamento inadequado das operações pode resultar em incidentes envolvendo veículos e carregadeiras, comprometendo a segurança dos trabalhadores e a eficiência da operação.

Sendo assim, o carregamento tradicional utilizando pás carregadeiras, embora eficiente em muitos cenários, requer um planejamento detalhado e uma execução precisa do desmonte com explosivos para garantir a fragmentação adequada do material. As carregadeiras são extremamente eficazes na movimentação de material solto, proporcionando uma operação mais ágil e econômica, mas o sucesso do processo depende da experiência da equipe e da qualidade do desmonte. Com as devidas precauções e planejamento, o método continua a ser uma escolha viável e competitiva em diversas operações de mineração a céu aberto.

2.1.2 Carregamento Sequencial

Embora não tenham sido encontradas referências específicas sobre o carregamento sequencial em operações de mineração, a descrição apresentada neste trabalho é baseada nas observações e nas práticas operacionais realizadas na Mina Alfa, que serve como tema de estudo de caso. Nessa mina, o método de carregamento sequencial foi implementado como parte de suas estratégias de otimização das operações, proporcionando uma base concreta para análise e avaliação deste método.

O carregamento sequencial em minas a céu aberto se caracteriza pela disposição dos caminhões lado a lado ao longo da frente de lavra. Uma pá carregadeira de grande porte realiza o carregamento de maneira contínua e ordenada, movendo-se de um caminhão para o próximo sem a necessidade de manobras complexas. Esse método pode evitar a formação de filas e otimizar o processo, reduzindo o tempo ocioso tanto das carregadeiras quanto dos caminhões de transporte.

Entre os principais equipamentos envolvidos no carregamento sequencial estão as pás carregadeiras de grande porte, que têm capacidade suficiente para carregar grandes volumes de material em cada ciclo de trabalho. Esses equipamentos são ideais para operar em frentes de lavra já desmontadas, onde o material foi fragmentado por explosivos, permitindo que a pá carregadeira se concentre exclusivamente no carregamento dos caminhões, sem a necessidade de desmontar mecanicamente o material, como seria necessário com escavadeiras em outros cenários. É como ocorre no Complexo Beta, por exemplo.

Uma das principais vantagens potenciais do carregamento sequencial é a redução do tempo de manobra. Como os caminhões estão posicionados lado a lado, não há necessidade de realizar manobras adicionais para carregar o próximo caminhão. Isso tende a acelerar significativamente o processo de carregamento e melhorar o fluxo das operações, pois a pá carregadeira pode continuar operando de forma contínua, sem precisar reposicionar-se entre os ciclos de carga.

Outro benefício esperado é a minimização do tempo de espera dos caminhões. Em métodos convencionais de carregamento, é comum que os caminhões formem filas e aguardem até que o veículo à frente seja carregado e liberado. No carregamento sequencial, os caminhões já estão posicionados, prontos para serem carregados assim que o anterior for liberado, o que potencialmente pode eliminar longos períodos de espera. Essa prática tende a aumentar a produtividade, já que mais caminhões podem ser carregados em um intervalo menor de tempo.



Figura 2: Carregamento sequencial na Mina Alfa

Além de proporcionar maior eficiência operacional, o carregamento sequencial também tende a maximizar a utilização das carregadeiras. Ao operar continuamente, sem pausas significativas entre os ciclos de carregamento, o equipamento é utilizado em sua capacidade total. Essa abordagem é especialmente eficaz em minas de grande porte, onde a quantidade de material movimentado é alta e a otimização dos tempos de carregamento é essencial para cumprir metas de produção.

Outro ponto importante é a possível redução dos custos operacionais. Como o tempo de espera e as manobras são minimizados, há uma tendência de redução no consumo de combustível por horas trabalhadas tanto das carregadeiras quanto dos caminhões. Essa economia tem o potencial de se traduzir em menores custos operacionais.

No que diz respeito à segurança, o carregamento sequencial também parece oferecer vantagens. Ao reduzir o movimento desnecessário dos caminhões e eliminar manobras complexas, o método tende a contribuir para um ambiente de trabalho mais seguro. A operação ordenada e o posicionamento lado a lado dos caminhões permitem que os operadores mantenham uma visão clara da área, reduzindo o risco de colisões e acidentes.

Outro benefício relevante é a melhor utilização do espaço disponível na frente de lavra. Com os caminhões posicionados estrategicamente lado a lado, o gerenciamento do espaço tende a ser otimizado, facilitando o deslocamento dos equipamentos e melhorando a logística interna da

operação. Em minas onde o espaço é limitado, essa organização tem o potencial de ser especialmente útil para evitar aglomerações e garantir o fluxo contínuo das atividades.

Apesar das vantagens potenciais, o carregamento sequencial também apresenta algumas desvantagens. A principal delas é a necessidade de um espaço amplo e adequado para que os caminhões possam ser posicionados lado a lado. Em operações menores ou em áreas onde o terreno não permite essa disposição, o método pode não ser viável. Além disso, a operação depende fortemente de uma comunicação eficaz entre os operadores, sendo necessário um alto nível de coordenação para garantir o sucesso da operação.

Assim, um ponto crítico no carregamento sequencial é a dependência de sistemas de monitoramento e comunicação. O sucesso dessa operação tende a depender da organização e coordenação precisa entre os caminhões e as carregadeiras. Se houver falhas na comunicação ou problemas no posicionamento dos caminhões, o ciclo de carregamento pode ser interrompido, afetando negativamente a produtividade e a eficiência das operações.

2.2 Parâmetros importantes na comparativa entre métodos de carregamento

A seguir serão analisados os parâmetros-chave utilizados para a escolha do método adequado de carregamento. Neste estudo, foram analisados Eficiência Operacional, Custos Operacionais, Impacto Ambiental, Segurança e Riscos Operacionais, Sistemas de Despacho e Tempo de Operação para identificar as vantagens e desvantagens de cada abordagem em diferentes contextos operacionais. Esses parâmetros permitem avaliar o uso eficiente dos recursos e a redução de ociosidade, a análise também considera os impactos ambientais com foco na descarbonização, bem como questões de segurança e o uso de tecnologias para otimização das atividades (COUTINHO, 2024; MELO, 2020; AMJATH et al., 2022).

2.2.1 Eficiência Operacional

A eficiência operacional é um dos principais critérios utilizados para avaliar a eficácia dos métodos de carregamento em minas a céu aberto. Cada método possui características que influenciam diretamente o desempenho das operações. Segundo Melo (2020), a eficiência de um método de carregamento tende a depender de fatores como a sincronia entre caminhões e

carregadeiras, o tempo de espera dos veículos e a capacidade de adaptação às condições geológicas e de produção. Quando bem implementados, tanto o carregamento sequencial quanto o tradicional têm potencial para otimizar o tempo de carregamento e melhorar a taxa de utilização dos equipamentos.

O carregamento tradicional, ou convencional, tende a ser eficiente em operações de médio porte com condições geológicas previsíveis. No entanto, sua eficiência pode ser impactada negativamente em operações de maior escala, onde o tempo de espera dos caminhões pode aumentar a ociosidade, resultando em perda de produtividade. Feres (2021) aponta que, sem a utilização de sistemas de despacho eletrônico e tecnologias de alta precisão, o método tradicional está mais sujeito a falhas de comunicação entre operadores, o que tem potencial para reduzir a eficiência em operações contínuas.

O carregamento sequencial, por outro lado, tende a se destacar em operações de grande porte, pois a sincronia entre os caminhões e as carregadeiras é otimizada por meio de sistemas de despacho eletrônico e tecnologias de alta precisão. O uso de GPS e telemetria, por exemplo, possibilita um controle rigoroso do fluxo de trabalho, ajustando em tempo real a chegada e partida dos caminhões, maximizando a eficiência dos recursos. Em minas que adotam sistemas de despacho, o carregamento sequencial pode alcançar um nível de eficiência significativamente superior ao do método tradicional.

Segundo Cerna e Obredor-Baldovino (2024), o uso de sistemas de alta precisão e do plano de lavra online aumenta a eficiência de qualquer método de carregamento, pois permite o monitoramento em tempo real das operações e ajustes imediatos conforme necessário. No carregamento sequencial, essa precisão é imprescindível, já que a sincronização exata entre caminhões e carregadeiras potencialmente melhora o aproveitamento dos recursos. O plano de lavra online, ao mapear a mina em tempo real, ajusta o fluxo de trabalho conforme as condições geológicas mudam, resultando em maior eficiência operacional em ambos os métodos.

Nas minas que utilizam sistemas de despacho eletrônico integrados ao plano de lavra, como na Mina Alfa, o carregamento sequencial tem demonstrado eficiência, pois a sincronização dos ciclos de carregamento e transporte é realizada com base em dados precisos e constantemente atualizados. Segundo Dias (2023), o uso de alta precisão pode potencialmente aumentar a produtividade em até 20%, ao eliminar o tempo de espera entre os ciclos e otimizar o uso dos equipamentos. No entanto, essa eficiência pode ser limitada por falhas no sistema ou problemas de manutenção, o que impactaria a operação como um todo.

Assim, embora tanto o carregamento sequencial quanto o tradicional apresentem benefícios em termos de eficiência, o primeiro, quando aliado a tecnologias de alta precisão e ao plano de lavra online, tende a ser a opção mais eficiente para grandes operações de mineração.

2.2.2 Custos Operacionais

Os custos operacionais são um dos fatores mais críticos ao se escolher o método de carregamento em minas a céu aberto. Cada método apresenta uma estrutura de custos diferente, influenciada por fatores como manutenção dos equipamentos, consumo de combustível e necessidade de infraestrutura. Segundo Grossi (2022), o método de carregamento escolhido deve equilibrar custos e produtividade para garantir a viabilidade econômica a longo prazo.

Melo (2020) destaca que os custos podem aumentar com o tempo devido à ociosidade dos equipamentos, especialmente em operações de grande escala, onde a falta de sincronização entre os ciclos de carregamento e transporte pode resultar em maior consumo de combustível e manutenção.

Ao otimizar a sincronização entre caminhões e pás carregadeiras, o carregamento sequencial tende a diminuir o tempo ocioso dos equipamentos, o que pode resultar em economia de combustível.

No entanto, o carregamento sequencial apresenta desafios de custos em minas menores ou em locais onde a infraestrutura tecnológica é limitada. Dias (2023) aponta que, em pequenas operações, os custos de implementação de sistemas de alta precisão podem ser proibitivos, o que pode tornar o método sequencial mais viável apenas em minas de grande porte, onde o retorno sobre o investimento justifica o gasto inicial.

Outro fator importante é o consumo de combustível. No carregamento tradicional, o tempo de espera dos caminhões tende a aumentar o consumo por ciclo, resultando em maiores custos operacionais. Em contraste, o carregamento sequencial tem o potencial de oferecer economia de combustível por hora trabalhada, já que os caminhões estão em movimento contínuo e o tempo de ociosidade é minimizado. Essa economia pode ser significativa em minas que operam com uma grande frota de caminhões.

2.2.3 Impacto Ambiental

O impacto ambiental das operações de carregamento em minas a céu aberto tem se tornado uma questão cada vez mais relevante nas discussões sobre sustentabilidade no setor de mineração.

Cada método de carregamento pode gerar diferentes níveis de impacto, influenciado por fatores como o consumo de combustível, as emissões de gases poluentes e o uso de recursos naturais. Segundo Alshibani et al. (2024), o impacto ambiental de uma operação de carregamento deve ser avaliado em conjunto com a eficiência e os custos operacionais, especialmente à medida que as regulamentações ambientais se tornam mais rígidas em vários países.

O carregamento tradicional, utilizando pás carregadeiras, tem potencial para gerar um impacto ambiental elevado, devido à intensa utilização de caminhões durante o transporte de material. Grossi (2022) sugere que o tempo ocioso dos caminhões no carregamento pode resultar em maior consumo de combustível e, conseqüentemente, em um aumento nas emissões de gases poluentes, como dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Como esse método nem sempre se beneficia de tecnologias de alta precisão e despacho, como ocorre na Mina Alfa, a eficiência do ciclo de operação é, em muitos casos, menor, o que tende a agravar o impacto ambiental. Em operações de grande escala, esse efeito pode ser amplificado ao longo de múltiplos ciclos operacionais, elevando a pegada de carbono da mina.

Por outro lado, o carregamento sequencial tem potencial para reduzir significativamente o impacto ambiental em comparação com o método tradicional. Uma das vantagens do carregamento sequencial parece ser a minimização do tempo ocioso de caminhões e carregadeiras, o que resulta em menor consumo de combustível por hora trabalhada e, por consequência, menores emissões de poluentes. Ao garantir que os caminhões estejam posicionados de forma otimizada para o carregamento, o método tende a contribuir para operações mais sustentáveis. Além disso, o uso de sistemas de despacho e alta precisão pode permitir um controle rigoroso sobre os recursos utilizados, evitando desperdícios de energia e contribuindo para a redução do impacto ambiental (WANG, 2024).

Outro fator relevante no impacto ambiental dos métodos de carregamento é a eficiência energética dos equipamentos utilizados. Nesse caso, tanto no carregamento tradicional quanto no sequencial, os equipamentos podem operar com combustíveis fósseis ou podem ser eletrônicos. Assim, nos casos em que se usam carregadeiras e caminhões que dependem de combustíveis fósseis, são aumentadas significativamente as emissões de gases de efeito estufa (ALSHIBANI et al., 2024). No entanto, quando tem-se a possibilidade de utilizar máquinas energeticamente mais eficientes, como equipamentos híbridos ou elétricos, torna-se possível reduzir o consumo de combustível e os impactos ambientais. A adoção de caminhões elétricos e equipamentos mais eficientes tem o potencial de ampliar os benefícios ambientais do carregamento sequencial, promovendo a sustentabilidade das operações.

A utilização de planos de lavra online também tende a desempenhar um papel importante na redução dos impactos ambientais das operações de carregamento. Alexandre et al. (2023) ressalta que as ferramentas de simulação e o monitoramento em tempo real das condições da mina e dos equipamentos por meio desses sistemas pode identificar rapidamente ineficiências operacionais e permitir ajustes imediatos. Ao adaptar as operações às condições geológicas e climáticas, o plano de lavra online ajuda a evitar o desperdício de recursos e a reduzir os impactos ambientais associados ao carregamento.

Assim, o impacto ambiental das operações de carregamento varia de acordo com o método escolhido e com a tecnologia disponível. Em ambos os casos, o uso de tecnologia avançada mitiga os impactos ambientais das operações de carregamento, qualquer que seja o método usado – tradicional ou sequencial. A escolha do método mais adequado deve considerar não apenas o impacto ambiental durante a operação, mas também os efeitos gerados pela implementação e manutenção da infraestrutura necessária.

2.2.4 Segurança e Riscos Operacionais

A segurança e os riscos operacionais nas operações de carregamento em minas a céu aberto também constituem fatores críticos que determinam a escolha do método de carregamento. Tanto o método tradicional quanto o sequencial apresentam desafios específicos em termos de segurança, dependendo da movimentação dos equipamentos e das condições do ambiente de trabalho. Segundo Moraes (2019), a segurança nas operações de carregamento está diretamente relacionada ao controle preciso dos equipamentos, à coordenação entre os operadores e ao uso de tecnologias que ajudam a mitigar os riscos de acidentes, como sistemas de despacho e monitoramento de alta precisão.

Em ambos os métodos de carregamento – tradicional e sequencial – os riscos operacionais estão frequentemente associados à proximidade entre os caminhões e a carregadeira durante o processo de carregamento. Melo (2020) aponta que o tráfego constante de caminhões e a necessidade de manobras frequentes ao redor das pás carregadeiras podem aumentar o risco de colisões e outros acidentes. A dependência de manobras manuais e da coordenação entre operadores tende a expor as operações a falhas humanas, resultando em acidentes, principalmente em minas de grande porte, onde muitos caminhões e equipamentos estão em operação simultânea. Por isso, é necessário um planejamento rigoroso de segurança e treinamento contínuo dos operadores.

Em contrapartida, a possibilidade de sincronização automática dos ciclos de carregamento e transporte, graças ao uso de tecnologias de despacho e monitoramento por GPS, conforme defende

Dias (2023), tende a reduzir a necessidade de manobras complexas e a minimizar a interação direta entre os caminhões e as pás carregadeiras, o que diminui consideravelmente os riscos de acidentes. Além disso, o controle automatizado dos veículos permite que se mantenha uma distância segura entre os caminhões, evitando colisões e outros incidentes relacionados ao tráfego desorganizado.

Outro fator importante na comparação dos aspectos de segurança entre os métodos de carregamento é o uso de tecnologias de monitoramento e automação. Em operações que utilizam sistemas de alta precisão, como o GPS e o monitoramento em tempo real, os riscos de acidentes tendem a ser reduzidos. Conforme observado por Machado; Aragão e Dias (2022), essas tecnologias permitem que as operações de carregamento sejam conduzidas com controle rigoroso sobre o posicionamento dos caminhões e das carregadeiras, garantindo que os operadores permaneçam em zonas seguras e que as operações sigam os protocolos de segurança estabelecidos.

Em síntese, na Mina Alfa, ambos os métodos de carregamento — tradicional e sequencial — utilizam tecnologias de despacho e alta precisão, mas diferem na forma como organizam o posicionamento dos caminhões durante o carregamento, o que impacta diretamente os riscos operacionais. O carregamento tende a ser considerado mais seguro, indiferentemente do método escolhido, quando envolve automação e monitoramento reduzem a interação direta entre caminhões e carregadeiras. Por outro lado, ambos apresentam maior exposição a riscos quando dependem mais de manobras manuais e da coordenação direta dos operadores, o que aumenta a possibilidade de erros e acidentes.

2.2.5 Sistemas de Despacho

Os sistemas de despacho desempenham um papel essencial na otimização das operações de carregamento em minas a céu aberto, controlando o fluxo de caminhões e carregadeiras de maneira eficiente. Essas tecnologias, que utilizam GPS, telemetria e algoritmos de otimização, monitoram em tempo real a localização e o status dos equipamentos, garantindo que os caminhões cheguem à frente de carregamento no momento ideal (SOUZA, 2021).

Segundo Teixeira et al. (2019), a principal função dos sistemas de despacho é otimizar a coordenação entre os caminhões e as pás carregadeiras, possibilitando uma operação contínua e reduzindo ao máximo o tempo ocioso. Tanto no carregamento sequencial quanto no tradicional, essas tecnologias são cruciais para sincronizar a chegada dos caminhões à frente de lavra, com a diferença que no sequencial os caminhões são posicionados lado a lado, enquanto no tradicional eles chegam de forma alternada.

No carregamento sequencial, os sistemas de despacho são particularmente importantes. De acordo com Dias (2023), a sincronização automatizada entre caminhões e carregadeiras permite que o processo de carregamento ocorra sem interrupções, potencialmente eliminando tempos ociosos e aumentando a produtividade. O uso de algoritmos de otimização ajuda a ajustar o fluxo de caminhões em resposta a imprevistos, como atrasos ou falhas mecânicas. Em operações que utilizam plano de lavra online, o sistema de despacho se adapta em tempo real, ajustando prioridades de carregamento e redirecionando caminhões conforme necessário, o que pode aumentar a eficiência operacional do carregamento sequencial.

Já no carregamento tradicional que não se alinha plenamente ao uso de tecnologias de Mineração 4.0, embora os sistemas de despacho continuem sendo úteis para organizar o fluxo de trabalho, sua atuação tende a ser menos decisiva em comparação ao sequencial. Coutinho (2024) aponta que o carregamento tradicional depende mais da coordenação manual entre os operadores, o que reduz a influência direta do despacho automatizado. Entretanto, em operações de grande escala, onde há muitos caminhões e carregadeiras em ação simultânea, o sistema de despacho ainda desempenha um papel importante na organização do tráfego, minimizando o tempo de espera e otimizando o uso dos recursos disponíveis.

Além de aumentar a eficiência, os sistemas de despacho também desempenham um papel fundamental na segurança das operações de carregamento. Carneiro (2014) observa que essas tecnologias ajudam a reduzir o risco de acidentes ao garantir que os caminhões mantenham distâncias seguras entre si e que as operações ocorram de forma organizada. O sistema de despacho pode emitir alertas em tempo real, avisando sobre potenciais problemas, como congestionamentos ou falhas de comunicação, o que potencialmente minimiza o risco de colisões e outros incidentes de segurança.

Outro benefício relevante dos sistemas de despacho é a redução do consumo de combustível. Dias (2023) afirma que, ao otimizar os ciclos de carregamento e minimizar o tempo ocioso, os sistemas de despacho podem reduzir significativamente o consumo de combustível. Isso impacta diretamente os custos operacionais e a sustentabilidade ambiental das operações de carregamento, tanto no método sequencial quanto no tradicional. A otimização proporcionada por esses sistemas também contribui para prolongar a vida útil dos caminhões e das carregadeiras, uma vez que o desgaste dos equipamentos é reduzido devido ao uso mais eficiente.

Por fim, os sistemas de despacho oferecem vantagens significativas em termos de análise de dados e tomada de decisões. Segundo Pimenta et al. (2024), os dados coletados por esses sistemas podem ser utilizados para avaliar o desempenho das operações de carregamento, identificando

gargalos e ineficiências. Essa análise contínua tende a ajudar os gerentes de mina a tomar decisões mais informadas sobre a alocação de recursos, manutenção preventiva dos equipamentos e ajustes no plano de lavra. Ao integrar essas informações, os sistemas de despacho possibilitam uma gestão mais proativa e eficaz das operações de carregamento, promovendo uma maior eficiência e redução de custos a longo prazo.

2.2.6 Tempo de operação

O carregamento tradicional caracteriza-se pela operação de caminhões e pás carregadeiras, onde um caminhão é carregado de cada vez. Somente após a saída do caminhão carregado, o próximo pode ser posicionado. Essa abordagem tende a resultar em tempos de espera elevados, pois os caminhões aguardam a sua vez para serem carregados, o que potencialmente leva à ociosidade tanto das carregadeiras quanto dos caminhões, afetando a eficiência operacional (Grossi, 2022). Embora o carregamento tradicional utilize tecnologias como sistemas de despacho eletrônico e monitoramento por GPS, a configuração dos caminhões e a necessidade de manobras individuais prolongam o tempo de ciclo.

Além disso, a necessidade de manobras entre o carregamento de cada caminhão aumenta o tempo total de ciclo das operações. Cada caminhão precisa se reposicionar individualmente após o carregamento, o que contribui para tempos de operação mais longos (Morais, 2019). O método tradicional, apesar de ser amplamente utilizado pela simplicidade de sua operação, enfrenta limitações consideráveis em minas de grande escala, onde a otimização do tempo é um fator crítico.

Por outro lado, o carregamento sequencial tende a otimizar o tempo de operação ao alinhar os caminhões de forma que as pás carregadeiras possam realizar o carregamento mais eficientemente. Nesse método, os caminhões são dispostos lado a lado, permitindo que sejam carregados um caminhão imediatamente após o outro, sem a necessidade de longas manobras, o que reduz consideravelmente o tempo ocioso. Embora ambos os métodos utilizem as mesmas tecnologias de despacho e monitoramento, a principal diferença reside no posicionamento dos caminhões durante o carregamento.

O uso do carregamento sequencial potencialmente reduz o tempo total de operação. A redução nas manobras dos caminhões e a minimização do tempo de espera entre carregamentos tendem a resultar em maior eficiência operacional, especialmente em minas de grande porte, onde volumes expressivos de material precisam ser movimentados rapidamente. Além disso, a aplicação de tecnologias de monitoramento e otimização, como sistemas de despacho eletrônico e controle

por GPS, também contribui para a eficiência desse método, permitindo uma sincronização mais precisa e uma gestão mais eficaz do fluxo de caminhões (TEIXEIRA et al., 2019).

Enquanto o carregamento tradicional sofre com perdas operacionais devido a tempos de espera e manobras complexas, o carregamento sequencial pode oferecer uma solução mais ágil e otimizada. Em termos práticos, o carregamento sequencial tende a reduzir os tempos de ciclo, aumentar a produtividade e melhorar a utilização dos equipamentos de carga e transporte. O uso contínuo das carregadeiras, aliado ao posicionamento lado a lado dos caminhões, possibilita uma operação mais fluida e eficiente.

Para operações de grande escala que buscam maior eficiência em termos de tempo de operação, o carregamento sequencial tende a se mostrar a opção vantajosa, com potencial para reduzir os custos operacionais e melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis. O carregamento tradicional, por outro lado, é mais adequado para operações menores ou menos complexas, mas encontra desafios em cenários que exigem rapidez e maior eficiência.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada em duas fases principais: a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso, com um foco exclusivo nos tempos de operação de carregamento. Cada uma dessas fases está detalhada a seguir:

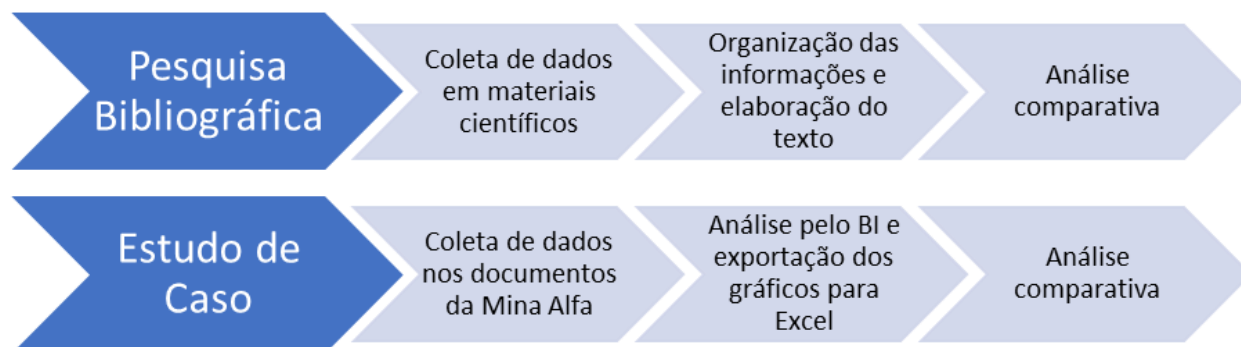


Figura 3: Fases do desenvolvimento do estudo

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A primeira fase do estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica, cujo objetivo é construir uma base teórica sólida sobre os diferentes métodos de carregamento em minas a céu aberto. Foram revisadas publicações científicas, dissertações, teses, livros e artigos especializados que abordem os seguintes temas:

Métodos de Carregamento com Carregadeiras: tradicional e sequencial, com atenção especial às suas características, vantagens, desvantagens e contextos de aplicação.

Essa pesquisa permitiu descrever os métodos de carregamento e fundamentar a análise comparativa que será realizada no estudo de caso.

3.2 Estudo de Caso

O estudo de caso foi conduzido na Mina Alfa, localizada no complexo Beta, região do Quadrilátero Ferrífero. Esta fase foi dividida nas seguintes etapas:

3.2.1 Coleta de Dados

Foram coletados dados operacionais específicos sobre os métodos de carregamento tradicional e sequencial utilizados na Mina Alfa. A coleta incluiu informações como tempos de fila de carga, tempo de carregamento e tempo de manobra de carga.

3.2.2 Apresentação dos Resultados

Com os dados coletados, foi realizada uma análise comparativa detalhada dos tempos de operação de carregamento nos métodos tradicional e sequencial. Essa análise se concentrou em avaliar a influência do carregamento sequencial na operação como um todo, em comparação com o carregamento tradicional, em especial no que se refere ao tempo de fila de carregamento, tempo de carregamento e tempo de manobra de carga.

3.2.3 Discussão dos Resultados

Os resultados da análise comparativa foram discutidos à luz da literatura revisada, destacando as melhores práticas e sugerindo possíveis melhorias para as operações de carregamento na Mina Alfa.

4 ESTUDO DE CASO: MINA ALFA, COMPLEXO BETA

A Mina Alfa, localizada no Complexo Beta, foi escolhida como foco deste estudo devido à sua importância estratégica dentro do complexo e ao fato de operar a maior frota de caminhões e pás carregadeiras. Além disso, é a mina que contabiliza a maior quantidade de horas de operação utilizando o método de carregamento sequencial. O Complexo Beta é composto por outras minas, como a Mina Gama, onde está situada a usina de beneficiamento que recebe o minério britado da Mina Alfa. Esse minério é transportado através de um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD), com cerca de 13 km de extensão. A previsão é que, em 2024, a Mina Alfa movimente 32 milhões de toneladas, das quais 14,6 milhões são de minério para a usina, enquanto 13,2 milhões correspondem à movimentação de estéril.

Um dos fatores que colocam a Mina Alfa à frente no uso de tecnologia avançada é a adoção de um sistema de despacho de caminhões altamente preciso, o qual utiliza um plano de lavra online que aparece diretamente nos painéis das máquinas. Essa integração entre as operações e as ferramentas digitais faz parte do conceito de mineração 4.0, permitindo uma otimização em tempo real das atividades e maior eficiência nas tomadas de decisão. Além disso, a mina utiliza tecnologia de drones para realizar atualizações da topografia, e os modelos geológicos são atualizados mensalmente, o que garante uma maior precisão na alocação dos recursos e no planejamento operacional.

O estudo focou-se em analisar se o carregamento sequencial impacta de forma significativa três indicadores operacionais: tempo de fila de carregamento, tempo de manobra da máquina de carga, e tempo de carregamento. Para isso, foi realizada uma análise dia a dia durante os meses de maio, junho e julho de 2024. Essa análise objetivou avaliar o desempenho das operações de carregamento sequencial e tradicional com carregadeiras em minas a céu aberto, observando indicadores como tempo de carregamento, tempo de fila, e tempo de manobra. Esses meses fornecem um panorama de como cada método influencia a eficiência operacional, permitindo comparações detalhadas e identificando possíveis oportunidades de melhoria. Os gráficos de 1 a 12 mostram os resultados das análises dos meses de maio, junho e julho.

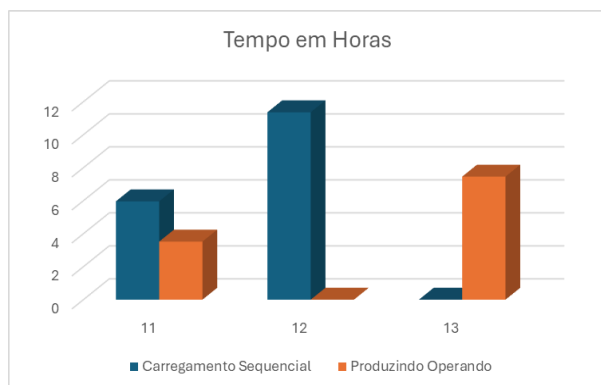


Gráfico 1: Resultados diários do mês de maio: Tempo em horas

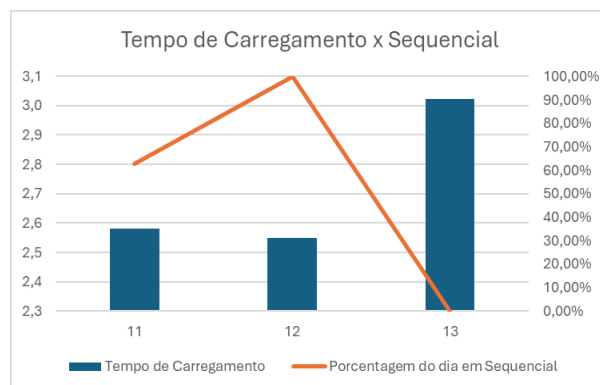


Gráfico 2: Resultados diários do mês de maio: Tempo de carregamento X Sequencial

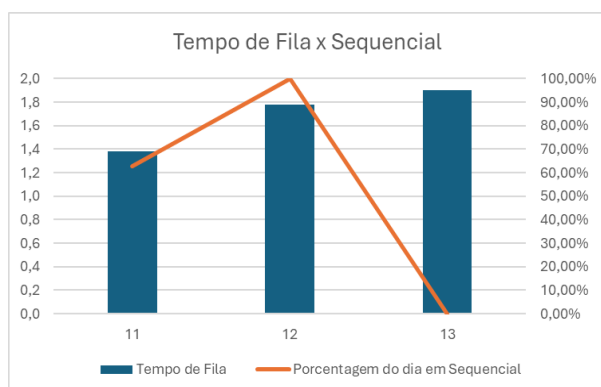


Gráfico 3: Resultados diários do mês de maio: Tempo de fila X Sequencial

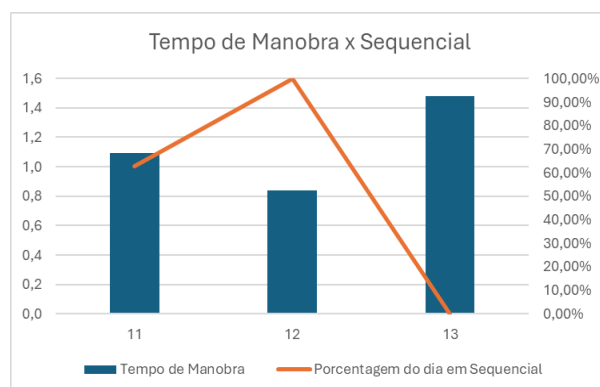


Gráfico 4: Resultados diários do mês de maio: Tempo de manobra X Sequencial

Os gráficos de maio mostram que, no dia 12, o carregamento sequencial foi predominante, com 100% de operação. Nesse dia, houve uma significativa redução no tempo de fila e tempo de manobra, indicando uma maior eficiência do método sequencial. No entanto, no dia em que o método tradicional, representado pela legenda “Produzindo Operando”, foi mais utilizado, como no dia 13, houve um aumento significativo no tempo de manobra.

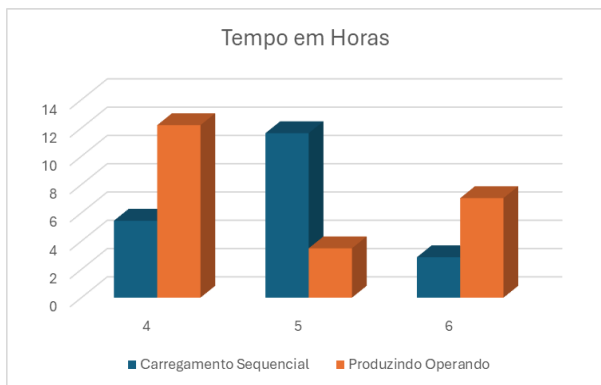


Gráfico 5: Resultados diários do mês de junho: Tempo em horas

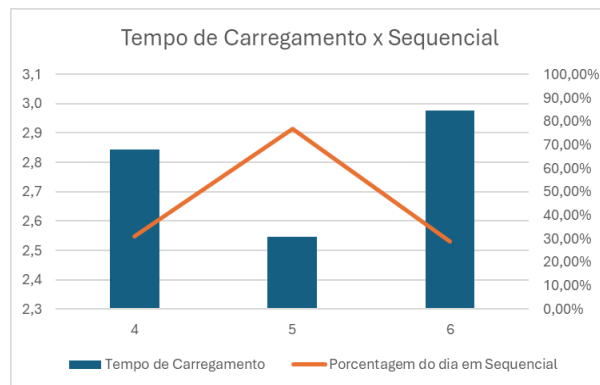


Gráfico 6: Resultados diários do mês de junho: Tempo de carregamento X Sequencial

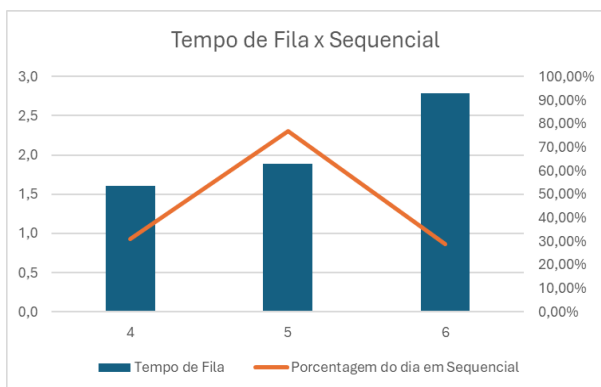


Gráfico 7: Resultados diários do mês de junho: Tempo de fila X Sequencial

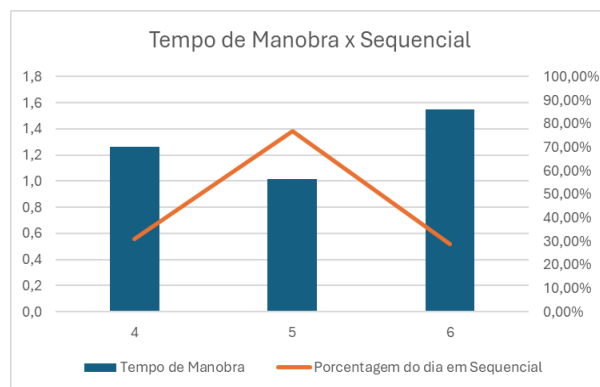


Gráfico 8: Resultados diários do mês de junho: Tempo de manobra X Sequencial

Em junho, os dados indicam que o carregamento sequencial teve uma variação menor em comparação a maio. O dia 5, com 76,92% de uso do método sequencial, destacou-se pela eficiência nas operações.

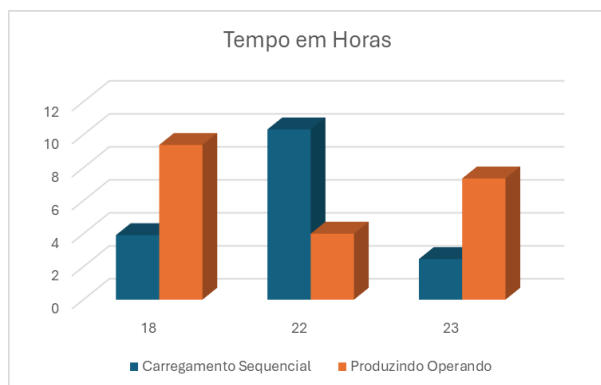


Gráfico 9: Resultados diários do mês de julho: Tempo em horas

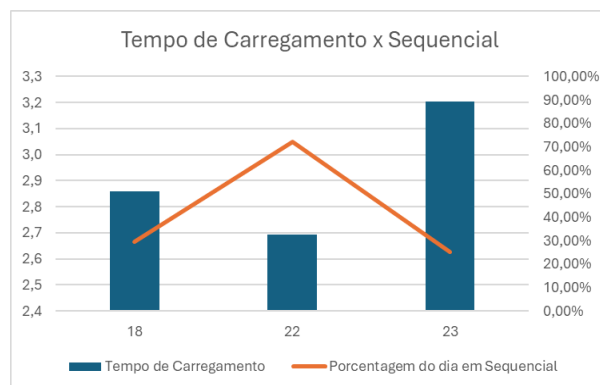


Gráfico 10: Resultados diários do mês de julho: Tempo de carregamento X Sequencial

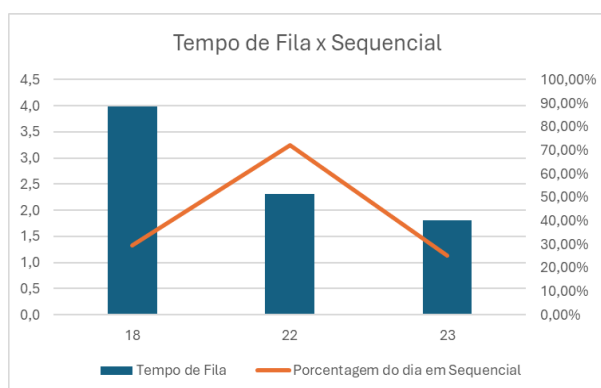


Gráfico 11: Resultados diários do mês de julho: Tempo de fila X Sequencial

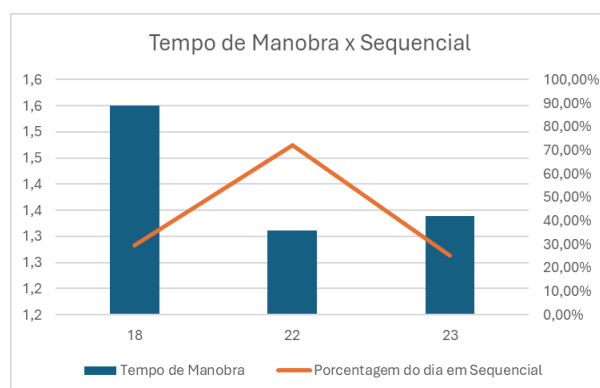


Gráfico 12: Resultados diários do mês de julho: Tempo de manobra X Sequencial

Já em julho, o carregamento sequencial foi mais utilizado no dia 22, atingindo 72,07%. Esse dia mostra uma redução significativa nos tempos de manobra e fila e um aumento na eficiência do carregamento. Já nos dias com menor utilização do método sequencial, como no dia 18 (26% de uso), o tempo de fila foi maior, evidenciando a necessidade de ajustar o método de acordo com a demanda para evitar perda de produtividade.

A análise dos três meses demonstra que o carregamento sequencial tem um impacto sensivelmente positivo nas operações de mineração, em termos de tempo de carregamento, tempo de fila e tempo de manobra. No entanto, o pequeno intervalo de dias analisados em cada mês não oferece segurança para sugerir afirmações. A adoção do carregamento sequencial requer ajustes estratégicos e um planejamento cuidadoso para garantir a redução do tempo de fila e o máximo aproveitamento da operação.

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos três meses analisados mostram uma variação sensível na eficiência dos métodos de carregamento sequencial e tradicional. O carregamento sequencial se destacou pela sua capacidade de reduzir os tempos de manobra e fila e aumentar a eficiência no carregamento, como observado nos dias apresentados. A otimização do tempo parece ser um dos principais benefícios do carregamento sequencial, pois ele evita a necessidade de reposicionar os caminhões constantemente, o que reduz o tempo ocioso das máquinas.

Outro ponto importante a ser discutido é o papel da tecnologia de despacho nas operações. Nos três meses analisados, o uso de sistemas de alta precisão, como o GPS e o despacho eletrônico, foi crucial para garantir a coordenação entre os caminhões e as máquinas de carregamento, independentemente do método utilizado. Isso está em linha com as observações de Teixeira et al. (2019), que destacam que a adoção de tecnologias avançadas é fundamental para aumentar a precisão e a eficiência no carregamento, especialmente em minas de grande porte.

Ainda que o carregamento sequencial tenha se mostrado mais eficiente em alguns aspectos, os resultados sugerem que sua aplicação deve ser feita de forma estratégica e bem planejada, considerando as características específicas de cada operação. Em operações onde a demanda é alta e o fluxo de caminhões é constante, como observado em alguns dias de maio e julho, o carregamento sequencial tende a oferecer maiores benefícios.

Finalmente, é importante destacar a necessidade de novos estudos que analisem o impacto de diferentes configurações operacionais no desempenho dos métodos de carregamento. Estudos que envolvam a análise de outros fatores, como o consumo de combustível e o desgaste dos equipamentos, podem contribuir para uma compreensão mais abrangente dos custos e benefícios de cada método. A literatura atual ainda carece de análises empíricas detalhadas sobre o impacto do carregamento sequencial em operações de grande porte, o que oferece um campo promissor para futuras pesquisas.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo apontam que o carregamento sequencial oferece vantagens operacionais em termos de redução dos tempos de manobra e fila e otimização do tempo de carregamento, especialmente em dias de maior demanda, quando o fluxo de caminhões e o volume de material movimentado são significativos. Essas vantagens, no entanto, não são tão significativas assim. As operações na Mina Alfa demonstraram que, com o uso adequado de tecnologias de alta precisão e sistemas de despacho, o método sequencial pode minimizar o tempo ocioso das carregadeiras e caminhões, resultando em uma operação mais eficiente.

A análise dos tempos de carregamento, manobra e fila nas operações de carregamento sequencial, em comparação ao método tradicional, revelou que o sequencial pode oferecer uma redução significativa no tempo de manobra, melhorando a eficiência operacional e a produtividade da mina. Observou-se que o carregamento sequencial pode reduzir a ociosidade dos caminhões e permitir um fluxo mais contínuo de material, o que impacta diretamente a capacidade de movimentação da mina, aumentando a produção em períodos de alta demanda e otimizando o uso dos equipamentos.

A comparação entre os métodos tradicional e sequencial demonstrou que o carregamento sequencial se destaca em termos de eficiência, especialmente em grandes operações com alto volume de material a ser transportado. Enquanto o método tradicional mostrou-se adequado para operações menos complexas, o sequencial apresentou vantagens em cenários onde a redução do tempo de fila e de manobra é crítica. No entanto, o carregamento tradicional oferece maior flexibilidade em terrenos variáveis e em dias de menor demanda, onde a simplicidade de operação é mais vantajosa.

No que tange aos impactos ambientais, o carregamento sequencial apresentou-se como uma solução mais sustentável, contribuindo para a descarbonização das operações de mineração. A redução do tempo ocioso dos caminhões e o uso mais eficiente dos equipamentos diminuem o consumo de combustível por horas trabalhadas e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa, como o CO₂. Essas vantagens ambientais posicionam o método sequencial como uma opção mais alinhada com as metas de sustentabilidade do setor de mineração.

A avaliação dos custos operacionais mostrou que a economia de combustível por horas trabalhadas torna o método sequencial mais econômico. Essa vantagem se evidencia principalmente em operações de grande porte, onde a diminuição dos custos com consumo de combustível pode resultar em economia substancial ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ACD Mineração. **O que é desmonte com explosivos?** 2023. Disponível em: <https://acadmin.com.br/2023/04/o-que-e-desmonte-com-explosivos/>. Acesso em: 24 set. 2024.
- ALEXANDRE, Rafael F. et al. **SIMMIM: uma ferramenta para simulação, otimização e auxílio à tomada de decisões em ambientes de minas a céu aberto**. Anais do XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2014), Setembro, p. 16-19, 2014.
- ALMÉRI, Nairo. **Mais penduricalho do atraso na mineração**. Além do Fato, 7 de agosto de 2023. Disponível em: <https://alemdofato.uai.com.br/economia/mais-penduricalho-do-atraso-na-mineracao/>. Acesso em: 30 set. 2024.
- ALSHIBANI, Adel et al. **Advancing sustainability: An integrated decision support framework for fleet selection in open pit mining construction**. Results in Engineering. n.23, 2024.
- AMJATH, Mohamed et al. **Fleet sizing of trucks for an inter-facility material handling system using closed queueing networks**. Operations Research Perspectives, v. 9, 2022.
- ANDRADE, Arthur Quintão de. **Sequenciamento e programação de lavra com alocação e equipamentos de carga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2014.
- CARNEIRO, Welington Monteiro. **Modelo de simulação computacional para avaliação de segurança do tráfego de caminhões em minas a céu aberto**. Anais do XVII simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha-SPOLM, n. 1, 2014.
- CERNA, Gabriel País; OBREDOR-BALDOVINO, Thalía. **A Mixed Integer Programming optimization model for mining truck dispatch policies using traffic constraints: Case of a copper mine in northern Chile**. Procedia Computer Science, v. 231, p. 660-665, 2024.
- COUTINHO, Heitor Lobo. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto**. Editora Dialética, 2024.
- DIAS, Amanda Ribeiro Lutterback. **Mineração 4.0: a evolução e os benefícios da indústria 4.0 no setor de mineração**. 2023. TCC (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.
- FERES, Bruno Costa. **Desenvolvimento de um sistema computacional para despacho de caminhões em uma mina a céu aberto**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3103/6/MONOGRAFIA_DesenvolvimentoSistemaComputacional.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

FERNANDES, Rhuan Muniz Sartore; DIAS, Thaís Henriques. **Quem são as mineradoras canadenses no Brasil? Panorama e estratégias de atuação.** AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política, v. 6, n. 1.

HOOSE, Anderson; KRIPKA, Moacir. **Programação linear aplicada na indústria e suas conexões com os objetivos de desenvolvimento sustentável: uma revisão bibliométrica e sistemática.** Revista Produção Online, v. 23, n. 3, p. 5004-5004, 2023.

GROSSI, Sarah Bettoni. **Análise da influência do dimensionamento de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de uma mina a céu aberto.** 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2022.

MACHADO, Arthur; ARAGÃO, João Victor; DIAS, Lucas. **Caminhões autônomos e seus impactos na produção em indústria de mineração.** 2022. TCC (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Faculdade Doctum. Juiz de Fora, 2022.

MELO, Sócrates Oliveira. **Estudo de tempos de ciclo de carregamento e transporte de minério em uma mina a céu aberto.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2020. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2021/08/Socrates-Oliveira-Melo.pdf>. Acesso em: 24 set. 2024.

MORAIS, Ana Carolina Faria Oliveira. **Estudo das perdas operacionais dos sistemas de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto.** 2019. 52f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto, 2019.

PIMENTA, Douglas Giovane Nunes et al. **Inovação para eficiência energética de caminhões fora de estrada em mina a céu aberto.** 2024. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/69556/1/DISSERTAC%CC%A7A%CC%83O_PPGIT_DOUGLAS%20PIMENTA_TD_e_IA%28Final%29.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

SOUZA, Darlan Mota de. **Uso de arduino e módulo GPS para monitoramento por telemetria de rotas de transportes por caminhões em minas a céu aberto.** 2021. TCC (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Ceará. Crateús, 2021.

TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez et al. **Avaliação da melhoria de desempenho da frota de transporte e carregamento de uma mineradora aliando ferramentas estatísticas ao software de despacho eletrônico.** Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 12, p. 30928-30939, 2019.

WANG, Qian et al. **Comprehensive overview: Fleet management drives green and climate-smart open pit mine.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 189, p. 113942, 2024.