

BALANCEAMENTO DE FROTA COM DESPACHO DINÂMICO EM SISTEMAS DE CARGA E TRANSPORTE A CÉU ABERTO: ANÁLISE POR SIMULAÇÃO DOS TRADE-OFFS OPERACIONAIS

FLEET BALANCE WITH DYNAMIC DISPATCH IN OPEN-PIT LOAD AND HAUL SYSTEMS: A SIMULATION-BASED ANALYSIS OF OPERATIONAL TRADE-OFFS

BALANCEO DE FLOTA CON DESPACHO DINÁMICO EN SISTEMAS DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN MINAS A CIELO ABIERTO: ANÁLISIS POR SIMULACIÓN DE LOS TRADE-OFFS OPERACIONALES

Pedro Jana Queiroz Barroso Corrêa¹, Leandro de Vilhena Costa²

DOI: 10.54899/dcs.v23i92.6350

Recibido: 26/06/2026 | Aceptado: 20/07/2026 | Publicación en línea: 27/07/2026.

RESUMO

As operações de carga e transporte em minas a céu aberto exigem equilíbrio entre equipamentos de carregamento, frota de caminhões e destinos operacionais. A prática de aumentar a disponibilidade de caminhões como estratégia de maximização da produção ignora a existência de uma faixa ótima operacional: a partir de determinado ponto, acrescentar frota gera ganhos marginais de produção cada vez menores, enquanto eleva filas, reduz a produtividade individual dos caminhões e tende a aumentar o custo por tonelada transportada. Este estudo avaliou, por meio de simulação baseada em dados operacionais ciclo a ciclo, os efeitos de diferentes níveis de frota sobre o desempenho de um sistema de carga e transporte em mina a céu aberto de minério de ferro. Os cenários foram classificados como Subdimensionado, Aderente e Sobredimensionado, a partir da relação entre a frota disponível e a necessidade dinâmica indicada por um sistema de despacho otimizador. Os resultados demonstraram que o acréscimo de 44% na frota — do cenário Aderente para o Sobredimensionado — gerou apenas 8,4% de aumento na produção horária, com queda de 25% na produtividade individual dos caminhões e aumento de 131% no tempo médio de fila. Conclui-se que o dimensionamento operacional de caminhões deve ser tratado como uma faixa dinâmica de equilíbrio, e não como simples maximização da frota disponível, considerando simultaneamente produção, produtividade, fila, ociosidade, distâncias executadas, custo operacional e impactos energéticos e ambientais potenciais.

Palavras-chave: Carga e Transporte. Despacho Dinâmico. Dimensionamento de Frota. Produtividade. Mina a Céu Aberto.

¹ Especialista em Lavra e Planejamento de Mina, Universidade Federal de Catalão (UFCAT), Catalão, Goiás, Brasil. E-mail: pedrojana_correa@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-4567-6043>

² Doutor em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: leandro_vilhena@ufcat.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9739-8515>

ABSTRACT

Load and haulage operations in open-pit mines require an adequate balance between loading equipment, haulage trucks, and operational destinations. The practice of increasing truck availability as a strategy to maximize production ignores the existence of an optimal operational range: beyond a certain point, adding trucks yields diminishing production gains while increasing queues, reducing individual truck productivity, and tending to raise the cost per ton hauled. This study evaluated, through simulation based on cycle-by-cycle operational data, the effects of different truck availability levels on the performance of an open-pit iron ore load and haulage system. The scenarios were classified as Undersized, Balanced, and Oversized according to the relationship between the available truck fleet and the dynamic truck requirement indicated by an optimization-based dispatch system. The results showed that a 44% increase in the truck fleet — from the Balanced to the Oversized scenario — produced only an 8.4% increase in hourly production, accompanied by a 25% drop in individual truck productivity and a 131% increase in average queue time. It is concluded that truck fleet sizing should be treated as a dynamic equilibrium range, rather than a simple maximization of available fleet, considering production, productivity, queues, idle time, executed haul distances, operational cost, and potential energy and environmental impacts simultaneously.

Keywords: Load and Haulage. Dynamic Dispatch. Fleet Sizing. Productivity. Open-Pit Mine.

RESUMEN

Las operaciones de carga y transporte en minas a cielo abierto requieren un adecuado equilibrio entre los equipos de carguío, la flota de camiones y los destinos operacionales. La práctica de aumentar la disponibilidad de camiones como estrategia de maximización de la producción ignora la existencia de una franja óptima operacional: a partir de determinado punto, agregar camiones genera ganancias marginales de producción cada vez menores, mientras aumenta las filas, reduce la productividad individual de los camiones y tiende a elevar el costo por tonelada transportada. Este estudio evaluó, mediante simulación basada en datos operacionales ciclo a ciclo, los efectos de diferentes niveles de disponibilidad de camiones sobre el desempeño de un sistema de carga y transporte en una mina a cielo abierto de mineral de hierro. Los escenarios fueron clasificados como Subdimensionado, Aderente y Sobredimensionado, a partir de la relación entre la flota disponible y la necesidad dinámica indicada por un sistema de despacho optimizador. Los resultados mostraron que un incremento del 44% en la flota — del escenario Aderente al Sobredimensionado — generó apenas un 8,4% de aumento en la producción horaria, acompañado de una caída del 25% en la productividad individual de los camiones y un aumento del 131% en el tiempo medio de fila. Se concluye que el dimensionamiento operacional de camiones debe tratarse como una franja dinámica de equilibrio, y no como una simple maximización de la flota disponible, considerando simultáneamente producción, productividad, filas, ociosidad, distancias ejecutadas, costo operacional e impactos energéticos y ambientales potenciales.

Palabras clave: Carga y Transporte. Despacho Dinámico. Dimensionamiento de Flota. Productividad. Mina a Cielo Abierto.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

As operações de lavra a céu aberto dependem da eficiência dos sistemas de carga e transporte, responsáveis por conectar frentes de lavra a destinos como britagem primária, pilhas de estoque e pilhas de estéril. A configuração entre frota de caminhões, equipamentos de carregamento, rotas e pontos de descarga influencia diretamente a produtividade, a eficiência operacional e o custo de transporte da mina (Zhang *et al.*, 2022).

O transporte representa parcela relevante do custo operacional em minas a céu aberto, podendo corresponder a aproximadamente 50% a 60% do custo total de produção em determinadas operações (Zhang *et al.*, 2022). Por isso, decisões de dimensionamento, alocação e balanceamento da frota impactam diretamente o desempenho econômico da mina. Estudos também destacam que a compatibilização entre caminhões, equipamentos de carregamento, produtividade e condições operacionais é determinante para o benefício econômico e para a redução de perdas por superdimensionamento ou subdimensionamento da frota (Xu *et al.*, 2023; Oliveira; Costa, 2024).

Apesar da relevância da produção total, a maximização da frota não representa, isoladamente, a melhor condição operacional. Na prática, operações tendem a manter mais caminhões em circulação do que a necessidade dinâmica indicada pelo sistema de despacho, motivadas pela busca de maximização da utilização física ou pela disponibilidade mecânica da frota. O acréscimo de caminhões pode elevar a produção até uma faixa de saturação, a partir da qual tende a aumentar filas, reduzir a produtividade individual dos caminhões e elevar perdas operacionais. Por outro lado, frota insuficiente limita a produção e aumenta a ociosidade dos equipamentos de carregamento. Assim, o desempenho do sistema deve ser avaliado pelo equilíbrio entre produção, produtividade da frota, fila, ociosidade e custo operacional.

A literatura tem tratado esse equilíbrio por meio de estudos de configuração de frota, simulação operacional e despacho de caminhões. Modelos de simulação permitem comparar cenários, estimar produtividade, identificar gargalos e apoiar decisões antes da aplicação em campo (Zhang *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2024).

Com o avanço dos sistemas de gerenciamento de frota, a alocação dinâmica de caminhões passou a apoiar a redução de perdas operacionais e a aderência ao plano de lavra. Neste estudo, utiliza-se o DISPATCH® System, um sistema de despacho dinâmico otimizador que considera condições operacionais em atualização contínua — disponibilidade e localização dos

equipamentos, tempos de ciclo, filas, rotas, prioridades e restrições de destino — para indicar a necessidade operacional de caminhões ao longo do turno. Os cenários analisados foram classificados pela relação entre a frota disponível e essa necessidade dinâmica indicada pelo sistema.

Por meio de simulação baseada em dados operacionais ciclo a ciclo, este estudo analisa os efeitos de diferentes níveis de disponibilidade de caminhões sobre o desempenho de um sistema de carga e transporte em mina a céu aberto. Foram considerados três cenários: Subdimensionado, quando a frota disponível está abaixo da necessidade dinâmica; Aderente, quando a frota está compatível com a necessidade estimada; e Sobredimensionado, quando a frota supera essa necessidade. Como os cenários possuem durações distintas ao longo do turno, a comparação foi realizada com indicadores normalizados por hora.

Neste estudo, o termo *trade-off* refere-se à relação de compensação entre benefícios e perdas operacionais, na qual o aumento da produção obtido com maior disponibilidade de caminhões pode ocorrer acompanhado de redução da produtividade da frota, aumento das filas e maiores custos operacionais. Assim, o objetivo geral deste artigo é avaliar os *trade-offs* entre produção horária, disponibilidade de caminhões, produtividade por caminhão, fila operacional, ociosidade dos equipamentos de carregamento e deslocamentos executados, discutindo a existência de uma faixa de equilíbrio entre maximização da produção e eficiência operacional.

REFERENCIAL TEÓRICO

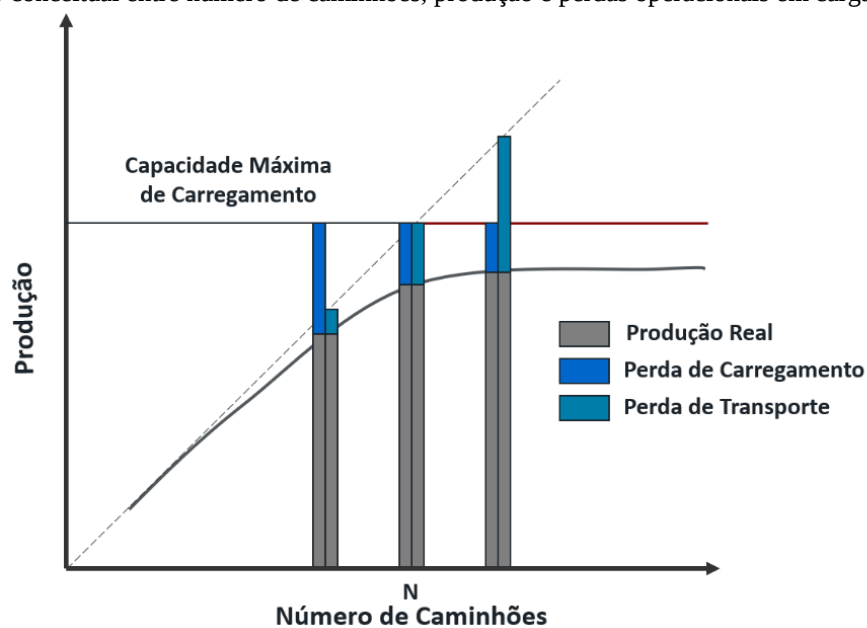
Balanceamento Operacional entre Carga e Transporte

O balanceamento operacional entre carga e transporte consiste em compatibilizar a capacidade disponível da frota de caminhões com a capacidade efetiva dos equipamentos de carregamento e dos pontos de descarga. Esse equilíbrio depende de fatores como tempos de ciclo, distância de transporte, disponibilidade dos equipamentos, restrições de rota, prioridades de lavra, capacidade dos destinos e variabilidade ao longo do turno. Quando a frota é insuficiente, os equipamentos de carregamento tendem a aguardar caminhões, elevando a ociosidade e reduzindo a produção. Quando há excesso de frota, os caminhões tendem a se acumular em filas, elevando tempos improdutivos e reduzindo a produtividade individual. Assim, a condição ótima não corresponde necessariamente ao maior número de caminhões, mas à faixa em que a frota atende

à demanda operacional com menor perda por fila, ociosidade e queda de produtividade.

Oliveira e Costa (2024) destacam que o dimensionamento adequado da frota contribui para minimizar perdas associadas ao superdimensionamento e ao subdimensionamento dos recursos de carregamento e transporte. De forma complementar, Zhang *et al.* (2022) e Xu *et al.* (2023) reforçam que a configuração entre caminhões e equipamentos de carregamento deve considerar produtividade, capacidade operacional e impactos econômicos da operação.

Figura 1. Relação conceitual entre número de caminhões, produção e perdas operacionais em carga e transporte.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 1 ilustra que a produção tende a aumentar com a adição de caminhões até a aproximação da capacidade de carregamento. A partir dessa faixa, novos caminhões geram ganhos marginais menores e podem ampliar filas, interações operacionais e perdas de produtividade. Na prática, esse ponto deve ser interpretado como uma faixa dinâmica de equilíbrio, pois a necessidade de caminhões varia ao longo do turno conforme as condições reais da mina.

A literatura trata esse problema por meio de estudos de configuração entre caminhões e equipamentos de carregamento. Zhang *et al.* (2022) utilizaram simulação para avaliar alternativas de configuração em mina a céu aberto, enquanto Xu *et al.* (2023) destacam que o balanceamento desses equipamentos influencia diretamente o benefício econômico da operação.

Despacho Dinâmico e Necessidade Operacional de Caminhões

Em operações modernas de lavra a céu aberto, sistemas de gerenciamento de frota apoiam a alocação de caminhões, o acompanhamento do plano de lavra e a resposta a mudanças operacionais. Diferentemente de um dimensionamento estático, baseado em premissas médias, o despacho dinâmico otimizador, neste estudo representado pelo DISPATCH® System, utiliza informações atualizadas sobre localização e disponibilidade dos equipamentos, tempos de ciclo, taxas de carregamento, filas, rotas, prioridades, restrições de destino e qualidade do material para estimar a necessidade operacional de caminhões e orientar a alocação da frota.

Figura 2. Etapas conceituais do despacho dinâmico para determinação da necessidade operacional de caminhões.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 2 sintetiza a lógica do DISPATCH® System para estimativa da necessidade dinâmica de caminhões. Internamente, o sistema opera com três componentes algorítmicos integrados: o **Best Path (BP)**, ou **melhor rota**, baseado no algoritmo de Dijkstra, que identifica o caminho de menor custo entre origens e destinos na malha viária da mina; a **Programação Linear (PL)**, que calcula a alocação de máxima produção entre caminhões, equipamentos de carregamento e destinos, considerando restrições operacionais, prioridades e taxas de produção; e a **Programação Dinâmica (PD)**, que atualiza as decisões de alocação em tempo real conforme o estado operacional evolui ao longo do turno. Com base nessa referência dinâmica, a frota é continuamente reposicionada conforme as condições vigentes, deixando de representar um número fixo de planejamento e passando a variar ao longo do turno.

Nesse contexto, uma mesma operação pode alternar entre condições de frota subdimensionada, aderente ou sobredimensionada ao longo do turno, em função de variações nos tempos de ciclo, interferências operacionais, mudanças de rota, paradas de equipamentos, restrições de destino ou alterações nas prioridades de produção. Por isso, a avaliação baseada na necessidade dinâmica indicada pelo despacho representa melhor a realidade operacional da mina

do que análises apoiadas apenas em dimensionamento teórico.

Hazrathosseini e Moradi Afrapoli (2024) discutem a transição para sistemas inteligentes de gerenciamento de frota em minas a céu aberto e apontam que métodos tradicionais de despacho possuem limitações para capturar a autonomia e a dinâmica exigidas em ambientes operacionais modernos. De forma complementar, Hasözdemir, Meral e Kahraman (2025) abordam a otimização de atribuições entre caminhões e equipamentos de carregamento em tempo real, reforçando que o despacho deve ser entendido como um processo dinâmico de tomada de decisão.

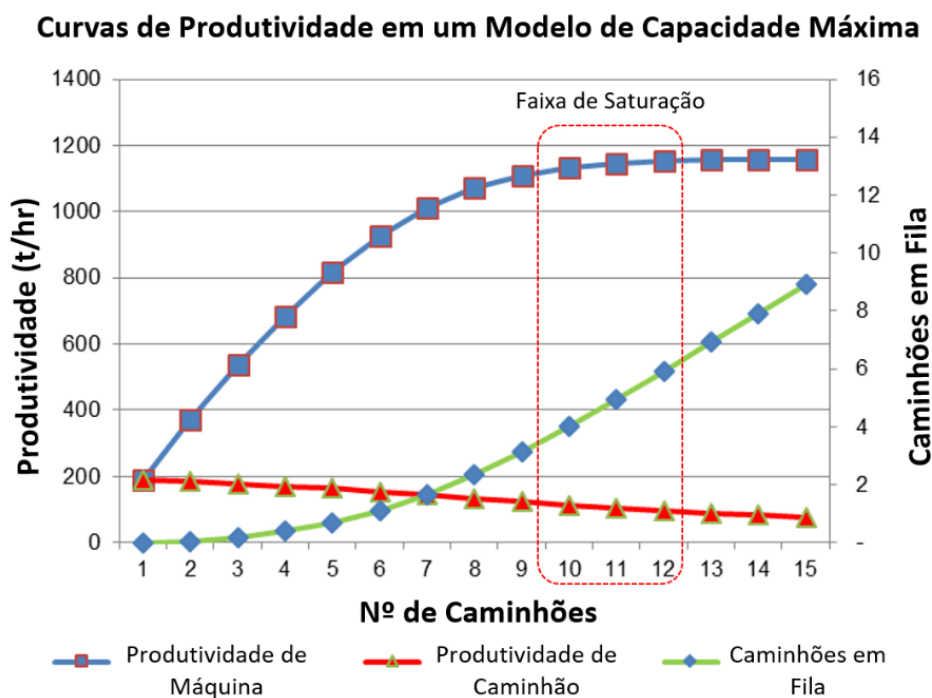
Embora o despacho dinâmico apoie a alocação de caminhões e a definição de taxas referenciais, a produção efetivamente realizada pode divergir da condição otimizada em função de eventos operacionais como paradas, desvios de material, restrições nos destinos, variações de basculamento e mudanças nas rotas. Dessa forma, a avaliação do desempenho deve considerar não apenas a necessidade dinâmica indicada pelo sistema, mas também a capacidade real de execução do fluxo produtivo ao longo do turno.

Simulação de Cenários e Avaliação de Desempenho Operacional

A simulação operacional permite avaliar sistemas de carga e transporte sob diferentes condições de frota, rotas, tempos de ciclo e estratégias de despacho, sem interferência direta na operação real. Essa abordagem é relevante em ambientes de mina, nos quais a variabilidade operacional influencia os resultados observados em campo. Além disso, modelos de simulação permitem comparar cenários de forma controlada, estimar produção horária, mensurar produtividade por caminhão, avaliar tempos de fila e ociosidade, identificar gargalos e apoiar decisões sobre alocação de recursos.

No contexto da mineração, Gómez Quevedo (2009) utilizou modelagem de simulação para representar sistemas de carregamento e transporte em mina a céu aberto, enquanto Lins de Noronha *et al.* (2018) aplicaram modelos de simulação ao dimensionamento de frota. Meng *et al.* (2024) também destacam que ambientes de simulação para despacho de caminhões permitem modelar sistemas de mineração e avaliar estratégias de gerenciamento de frota. Esses estudos reforçam a adequação da simulação para analisar os efeitos do subdimensionamento, da aderência e do sobredimensionamento da frota sobre o desempenho operacional.

Figura 3. Curvas conceituais de produtividade e formação de filas em um modelo de capacidade restrita.



A Figura 3 representa, de forma conceitual, que o aumento do número de caminhões tende a elevar a produtividade dos equipamentos de carregamento até uma faixa de saturação. Após esse ponto, os ganhos marginais diminuem, enquanto a produtividade individual dos caminhões cai e a formação de filas aumenta. Esse comportamento reforça a necessidade de avaliar simultaneamente produção, produtividade da frota e perdas operacionais.

No presente estudo, a simulação compara cenários definidos pela relação entre a frota disponível e a necessidade dinâmica indicada pelo despacho, permitindo avaliar como a adição ou restrição de caminhões afeta a produção horária, a produtividade individual da frota, os tempos de fila, a ociosidade dos equipamentos de carregamento e o equilíbrio global do sistema.

METODOLOGIA

A simulação foi conduzida em ambiente virtual adaptado de uma mina de minério de ferro, com equipamentos de carregamento, caminhões de grande porte e destinos típicos de lavra a céu aberto, incluindo britador primário, pilha de estoque e pilhas de estéril. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros utilizados para contextualização do ambiente operacional simulado.

Tabela 1. Caracterização operacional da cava simulada

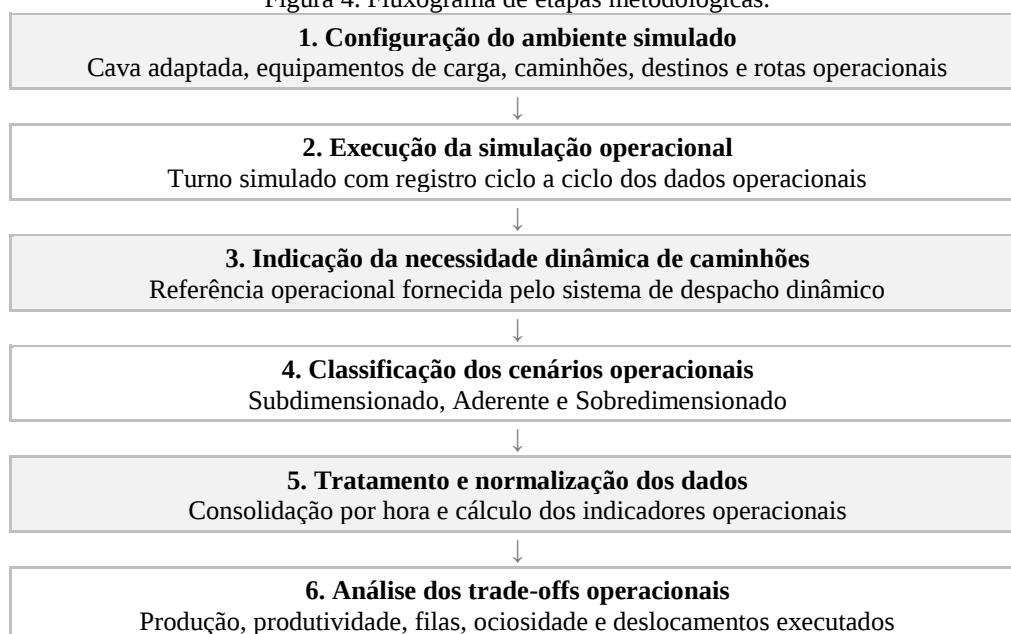
Parâmetro	Valor
Frota máxima disponível no turno	15
Capacidade nominal dos caminhões	230 t
Equipamentos de carga	3
Capacidade máxima de carregamento por equipamento	3.500 t/h
Britadores primários	1
Capacidade máxima do britador primário	6.000 t/h
Pilhas de estoque	1
Pilhas de estéril	2

Fonte: Elaborada pelos autores.

A simulação considerou um turno operacional dividido em três janelas de análise, correspondentes aos cenários Subdimensionado, Aderente e Sobredimensionado, totalizando 251 ciclos operacionais de carga e transporte registrados ciclo a ciclo, com informações de frota, equipamentos, origem, destino, tempos, massa movimentada, distâncias e classificação do cenário.

A simulação foi estruturada em ambiente virtual associado ao DISPATCH® System, que indicou a necessidade dinâmica de caminhões ao longo do turno, permitindo compará-la com a frota disponível em cada cenário. A metodologia foi estruturada conforme as etapas apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Fluxograma de etapas metodológicas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os dados foram consolidados em planilhas eletrônicas e analisados por medidas analíticas, calculando-se indicadores de produção horária, quantidade de caminhões, produtividade por caminhão, fila, ociosidade, distâncias executadas e relação vazio/carregado. Para fila e ociosidade, adotou-se a média condicional ao evento.

A quantidade de caminhões utilizada em cada cenário foi definida a partir da necessidade dinâmica indicada pelo sistema de despacho para a condição simulada. Como a condição aderente indicou necessidade de 9 caminhões, foram definidos cenários com frota inferior, equivalente e superior a esse valor de referência: Subdimensionado, com 6 caminhões; Aderente, com 9 caminhões; e Sobredimensionado, com 13 caminhões. Com base nessa relação entre frota disponível e necessidade dinâmica, os registros foram classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Critério de classificação dos cenários operacionais

Cenário operacional	Critério de classificação	Interpretação operacional
Subdimensionado	Frota abaixo da necessidade dinâmica	Transporte insuficiente
Aderente	Frota compatível com a necessidade dinâmica	Maior aderência operacional
Sobredimensionado	Frota acima da necessidade dinâmica	Excesso relativo de transporte

Fonte: Elaborada pelos autores.

Essa classificação permitiu comparar diferentes níveis de aderência entre capacidade de transporte disponível e necessidade operacional. Para comparação entre os cenários, foram analisados indicadores associados à produção, eficiência da frota e perdas operacionais: produção horária, quantidade de caminhões, produtividade por caminhão, tempos médios de fila e ociosidade, capacidade de carregamento, capacidade de transporte, DMT executada e relação entre deslocamento vazio e carregado.

A produção horária foi utilizada como indicador central de comparação, pois os cenários simulados possuem diferentes durações ao longo do turno. Dessa forma, a normalização por hora permitiu comparar os cenários de forma proporcional, evitando que diferenças de duração influenciassem a interpretação dos resultados.

A análise foi conduzida por estatística descritiva e comparação relativa entre cenários, com indicadores consolidados em base horária. Como a simulação representa um turno operacional dividido em janelas de cenário, os resultados foram interpretados como diferenças operacionais observadas, sem aplicação de teste inferencial de significância estatística. A avaliação concentrou-se na magnitude dos efeitos, nas variações percentuais e nos trade-offs entre produção, produtividade, fila, ociosidade e deslocamentos executados.

Em todos os cenários, os caminhões e os equipamentos de carregamento operaram em ambiente aberto, sem frentes fixas ou bloqueios de destinos, permitindo ao sistema de alocação dinâmica direcionar os caminhões conforme as condições operacionais simuladas. Entre os destinos disponíveis, apenas o britador possuía restrição máxima de taxa, definida em aproximadamente 6.000 t/h. Os dados foram tratados de forma anonimizada e agregada, preservando a confidencialidade da operação e da solução tecnológica utilizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os principais indicadores operacionais dos três cenários simulados. Os resultados mostram que o aumento da frota elevou a produção horária, mas não gerou ganhos lineares, pois também alterou a produtividade individual dos caminhões, os tempos de fila e a ociosidade dos equipamentos de carregamento.

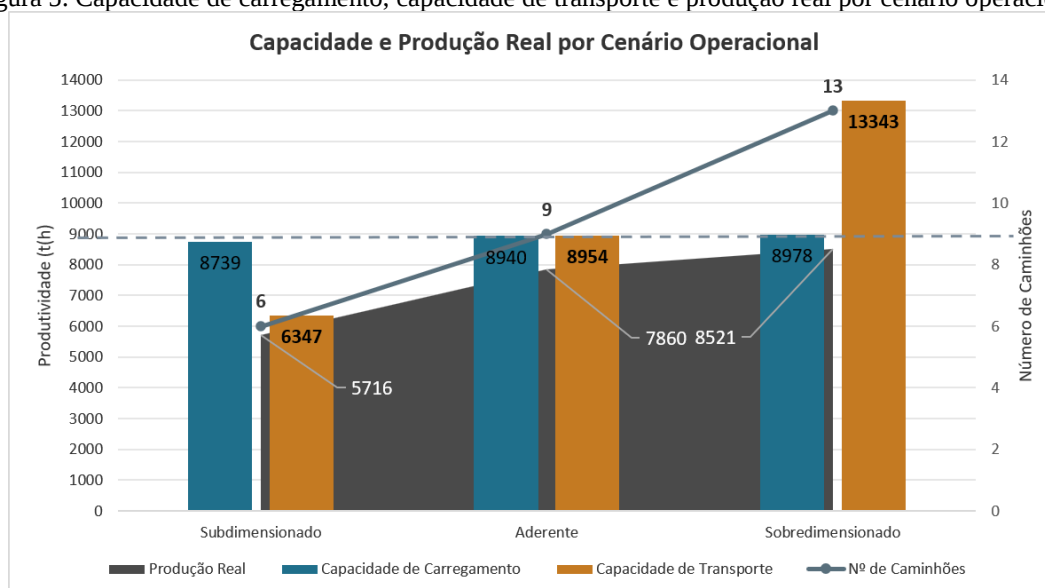
Tabela 3. Indicadores de desempenho por cenário simulado

Indicador operacional	Subdimensionado	Aderente	Sobredimensionado
Caminhões	6	9	13
Equipamentos de carga	3	3	3
Capacidade de carregamento (t/h)	8.739	8.940	8.978
Capacidade de transporte (t/h)	6.347	8.954	13.343
Produção real (t/h)	5.716	7.860	8.521
Produtividade por caminhão (t/h/cam.)	953	873	655
Taxa de carregamento (t/h)	2.917	3.044	3.102
Produtividade média da carga (t/h/eq.)	1.905	2.620	2.857
Fila média no britador (min)	0,1	1,8	3,4
Fila no básculo geral (min)	0,07	1,2	2,18
Fila média na carga (min)	2,2	1,6	3,7
Ociosidade média (min)	4,5	2,3	0,6
DMT executada (km)	1,23	1,33	1,42

Fonte: Elaborada pelos autores.

A transição do cenário Subdimensionado para o Aderente elevou a produção horária de 5.716 t/h para 7.860 t/h, indicando redução da limitação de transporte e melhor utilização dos equipamentos de carregamento. Nesse cenário, observa-se maior proximidade entre a capacidade de transporte e a capacidade de carregamento, caracterizando uma condição operacional mais equilibrada.

Figura 5. Capacidade de carregamento, capacidade de transporte e produção real por cenário operacional.

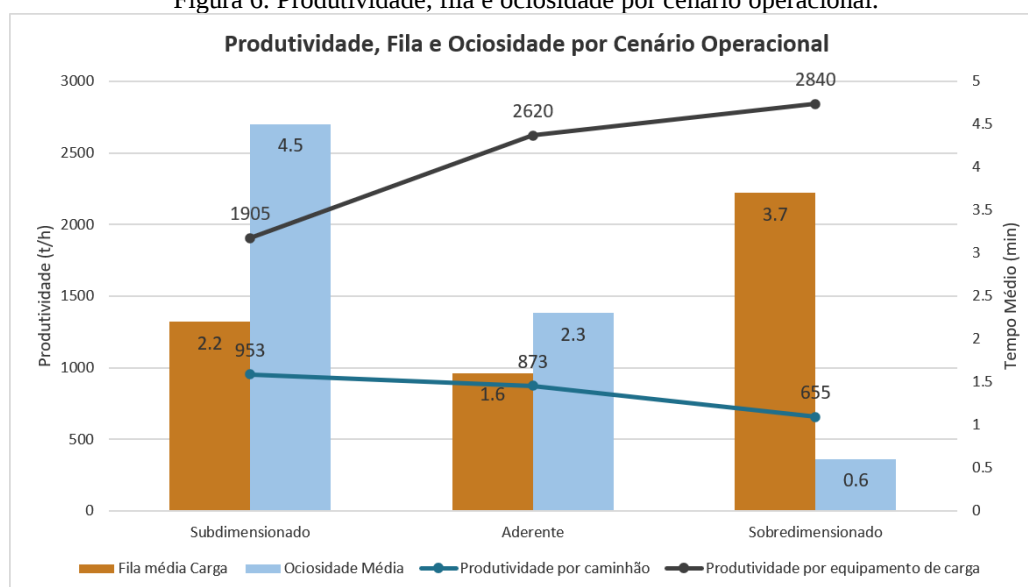


Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 5 evidencia essa relação: o cenário Subdimensionado foi limitado pelo transporte, o Aderente apresentou maior equilíbrio entre transporte e carregamento e o Sobredimensionado ampliou a capacidade de transporte sem aumento proporcional da produção.

Na transição do cenário Aderente para o Sobredimensionado, a produção aumentou de 7.860 t/h para 8.521 t/h, ganho relativo de 8,4%. Entretanto, a produtividade por caminhão caiu de 873 t/h/caminhão para 655 t/h/caminhão, indicando que o ganho de massa movimentada ocorreu com perda expressiva de eficiência individual da frota.

Figura 6. Produtividade, fila e ociosidade por cenário operacional.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 6 mostra que a redução da ociosidade dos equipamentos de carregamento ocorreu acompanhada de queda da produtividade individual dos caminhões e maior concentração de caminhões em espera no cenário Sobredimensionado.

A presença de fila no cenário Subdimensionado está associada à lógica de priorização do despacho dinâmico. Mesmo com frota globalmente insuficiente, o sistema pode direcionar caminhões para equipamentos de maior prioridade ou capacidade, gerando pequenas filas localizadas enquanto outras frentes permanecem com menor atendimento. Assim, a fila média deve ser interpretada em conjunto com a lógica de alocação dinâmica, e não apenas pela quantidade total de caminhões disponível.

A Tabela 4 resume as variações percentuais em relação ao cenário Aderente, permitindo avaliar o trade-off entre ganho de produção e perdas operacionais associadas à produtividade, filas, ociosidade e deslocamentos.

Tabela 4. Variação percentual dos indicadores em relação ao cenário Aderente

Indicador	Subdimensionado	Aderente (base)	Sobredimensionado
Caminhões	-33%	0%	44%
Produção real (t/h)	-27%	0%	8,4%
Produtividade do transporte (t/h/cam.)	9%	0%	-25%
Fila média na carga (min)	38%	0%	131%
Ociosidade média (min)	96%	0%	-74%

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tabela 5 evidencia a redução do ganho marginal: aproximadamente 715 t/h por caminhão adicional na transição do Subdimensionado para o Aderente e cerca de 165 t/h por caminhão adicional na transição do Aderente para o Sobredimensionado. Em termos relativos, cada caminhão adicional após a condição aderente entregou apenas cerca de 23% do ganho marginal observado antes da saturação, evidenciando a redução da eficiência marginal da frota após a aproximação da faixa de equilíbrio operacional.

Tabela 5. Ganho marginal de produção por caminhão adicional entre cenários operacionais

Transição	Frota	Ganho de produção	Ganho marginal
Subdimensionado → Aderente	+3 caminhões	+2.144 t/h	715 t/h/caminhão
Aderente → Sobredimensionado	+4 caminhões	+661 t/h	165 t/h/caminhão

Fonte: Elaborada pelos autores.

Além dos impactos produtivos e operacionais, o sobredimensionamento da frota também

pode implicar aumento potencial das emissões diretas de CO₂ associadas ao consumo de diesel. Como estimativa de ordem de grandeza, consideraram-se os quatro caminhões adicionais no cenário Sobredimensionado em relação ao cenário Aderente, um consumo médio de 231 L/h por caminhão, adotado como premissa de referência para caminhões fora de estrada de grande porte, e fator de emissão de 2,68 kg CO₂/L de diesel (IPCC, 2006). A pertinência de avaliar o consumo de combustível em sistemas de transporte de mina é discutida por Soofastaei *et al.* (2016). Com essas premissas, a emissão adicional estimada é de aproximadamente 2,48 t CO₂/h. Embora não represente uma medição direta de consumo no cenário simulado, essa estimativa indica que a operação acima da condição aderente deve ser avaliada também por seus efeitos potenciais sobre eficiência energética, custo operacional e indicadores ambientais.

Tabela 6. Estimativa potencial de emissões adicionais associadas ao sobredimensionamento da frota

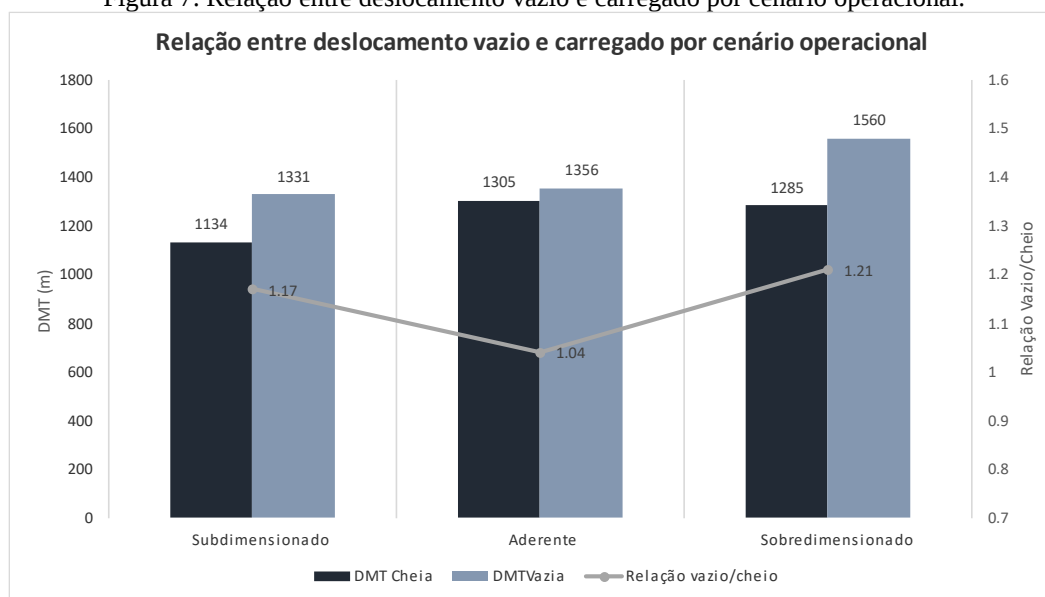
Indicador	Valor
Caminhões adicionais no cenário Sobredimensionado	4 caminhões
Consumo médio de diesel adotado	231 L/h por caminhão
Fator de emissão de referência do diesel	2,68 kg CO ₂ /L
Emissão adicional estimada por caminhão	0,62 t CO ₂ /h
Emissão adicional total estimada	2,48 t CO ₂ /h
Emissão adicional estimada por turno de 12 h	29,8 t CO ₂ /turno

Fonte: Elaborada pelos autores.

Esses resultados estão alinhados à literatura sobre dimensionamento e simulação de sistemas de carregamento e transporte, que indica que o aumento da frota não implica necessariamente ganhos proporcionais de produção (Zhang *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023; Oliveira; Costa, 2024). No presente estudo, esse comportamento foi evidenciado pelo ganho marginal no cenário Sobredimensionado, associado à queda da produtividade individual dos caminhões. Do ponto de vista econômico, essa queda tende a elevar o custo por tonelada, uma vez que a frota adicional agrega custos de propriedade e operação sem retorno proporcional em produção.

Como análise complementar, avaliou-se a relação entre DMT vazia e DMT cheia nos três cenários, conforme apresentado na Figura 7. Essa análise indica que o cenário Aderente apresentou a relação mais equilibrada entre deslocamento vazio e carregado, próxima de 1,04, enquanto o Sobredimensionado atingiu aproximadamente 1,21, sugerindo maior participação relativa de deslocamentos vazios, possivelmente associada ao reposicionamento de caminhões para reduzir a ociosidade dos equipamentos de carregamento.

Figura 7. Relação entre deslocamento vazio e carregado por cenário operacional.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Em síntese, o cenário Aderente apresentou a condição mais equilibrada; o Sobredimensionado gerou maior produção absoluta, porém com perda de eficiência e maior saturação operacional; e o Subdimensionado foi limitado pela falta de transporte, com menor produção horária.

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou os *trade-offs* operacionais associados a diferentes níveis de disponibilidade de caminhões em um sistema de carga e transporte de mina a céu aberto, por meio de simulação baseada em dados operacionais ciclo a ciclo. Os cenários foram classificados como Subdimensionado, Aderente e Sobredimensionado a partir da relação entre a frota disponível e a necessidade dinâmica indicada pelo sistema de despacho.

Os resultados demonstraram que o aumento da frota elevou a produção horária, porém com ganhos não lineares. A transição do cenário Subdimensionado para o Aderente gerou ganho expressivo de produção, indicando redução da limitação de transporte e melhor utilização dos equipamentos de carregamento. Já a transição do cenário Aderente para o Sobredimensionado aumentou a produção real em apenas 8,4%, de 7.860 t/h para 8.521 t/h, acompanhada de queda da produtividade individual dos caminhões, de 873 t/h/caminhão para 655 t/h/caminhão, e aumento da fila média na carga.

A análise marginal reforçou esse comportamento: a transição do Subdimensionado para o Aderente gerou aproximadamente 715 t/h por caminhão adicional, enquanto a transição do Aderente para o Sobredimensionado gerou cerca de 165 t/h por caminhão adicional, evidenciando a redução do ganho marginal após a aproximação da faixa de equilíbrio. O cenário Aderente também apresentou a relação mais equilibrada entre DMT vazia e DMT cheia, próxima de 1,04, em contraste com 1,21 no Sobredimensionado, sugerindo maior participação relativa de deslocamentos vazios associada ao reposicionamento de caminhões.

Além disso, a estimativa potencial de emissões indica que os quatro caminhões adicionais no cenário Sobredimensionado poderiam representar incremento de aproximadamente 2,48 t CO₂/h, ou 29,8 t CO₂ por turno de 12 horas, reforçando que o sobredimensionamento da frota também possui implicações ambientais e de eficiência energética.

Conclui-se que o dimensionamento operacional de caminhões deve ser tratado como uma faixa dinâmica de equilíbrio, e não como um número fixo ou como simples maximização da frota disponível. O sistema de despacho dinâmico fornece exatamente essa referência ao estimar a necessidade operacional em tempo real. Operar acima dessa necessidade, prática comum na mineração e frequentemente motivada pela busca de máxima utilização dos equipamentos, pode gerar apenas ganho marginal de produção, acompanhado de perdas expressivas de produtividade, aumento de filas e maior custo operacional. Manter caminhões em circulação a qualquer custo não representa, portanto, benefício garantido. Nesse sentido, sistemas como o DISPATCH® System oferecem a base técnica para que a decisão sobre a disponibilidade de frota seja tomada de forma consciente, e não apenas orientada pela manutenção contínua dos equipamentos em operação.

Como contribuição prática, o estudo evidencia que decisões de alocação e disponibilidade de caminhões devem considerar simultaneamente produção, produtividade, fila, ociosidade, distâncias executadas e custo operacional potencial. Como limitação, destaca-se que os resultados estão associados às condições específicas da cava simulada, incluindo características de frota, rotas, equipamentos, destinos e regras de despacho. Estudos futuros podem incorporar custos operacionais detalhados, consumo real de combustível, diferentes perfis de rota e múltiplos turnos de operação. Uma análise de custo-benefício por caminhão adicional, comparando o ganho marginal de produção com o custo horário de propriedade e operação do equipamento, poderia orientar essa decisão de forma objetiva e diretamente aplicável à gestão operacional de minas.

REFERÊNCIAS

- GÓMEZ QUEVEDO, J. M. Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto. 2009. 136 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)** – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- HASÖZDEMİR, K.; MERAL, M.; KAHRAMAN, M. M. Revolutionizing open-pit mining fleet management: integrating computer vision and multi-objective optimization for real-time truck dispatching. **Applied Sciences**, v. 15, n. 9, 4603, 2025. DOI: 10.3390/app15094603.
- HAZRATHOSSEINI, A.; MORADI AFRAPOLI, A. Transition to intelligent fleet management systems in open pit mines: a critical review on application of reinforcement-learning-based systems. **Mining Technology**, v. 133, n. 1, p. 50–73, 2024. DOI: 10.1177/25726668231222998.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- LINS DE NORONHA, O.; CANO NUÑEZ, A. E.; DOS REIS, A. F.; ARROYO ORTIZ, C. E. Dimensionamiento de flota en las operaciones de carguío y transporte usando modelos de simulación de sistemas. **Interfases**, n. 11, p. 43-55, 2018. DOI: 10.26439/interfases2018.n011.2952.
- MENG, S. *et al.* OpenMines: a light and comprehensive mining simulation environment for truck dispatching. In: **IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM (IV), 2024, Jeju Island. Proceedings...** IEEE, 2024. DOI: 10.1109/IV55156.2024.10588764.
- OLIVEIRA, C. F. C.; COSTA, L. V. Dimensionamento de equipamentos de carregamento e transporte autônomo: estudo de caso de uma mineradora do Sul do Pará. **Revista Foco**, v. 17, n. 10, e6569, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n10-104.
- SOOFASTAEI, A.; AMINOSSADATI, S. M.; KIZIL, M. S.; KNIGHTS, P. A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 26, n. 5, p. 745-752, 2016. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.047.
- XU, H. *et al.* Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines. **Applied Sciences**, v. 13, n. 6, 3851, 2023. DOI: 10.3390/app13063851.
- ZHANG, Y. *et al.* Determination of truck–shovel configuration of open-pit mine: a simulation method based on mathematical model. **Sustainability**, v. 14, n. 19, 12338, 2022. DOI: 10.3390/su141912338.