v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE DIMENSIONAMENTO DE FROTAS EM MINAS DE DIAMANTE A CÉU ABERTO COM *SOFTWARE* HAULSIM: UM ESTUDO FOCADO NA REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS E AUMENTO DE PRODUTIVIDADE DA MINA DO LUELE

OPTIMIZATION OF THE FLEET SIZING SYSTEM IN OPEN-PIT DIAMOND MINES USING HAULSIM SOFTWARE: A STUDY FOCUSED ON REDUCING OPERATING COSTS AND INCREASING PRODUCTIVITY AT THE LUELE MINE

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTAS EN MINAS DE DIAMANTES A CIELO ABIERTO CON EL SOFTWARE HAULSIM: UN ESTUDIO ENFOCADO EN LA REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS Y EL AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD EN LA MINA LUELE

Arão Maleca António[1], Leandro De Vilhena Costa[2]

e7119592
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9592

PUBLICADO: 11/2026 Português europeu

RESUMO

Este estudo analisa o sistema escavadeira–caminhão da Mina do Luele, em Angola, com o objetivo de otimizar o transporte e dimensionar a frota necessária para reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade. A pesquisa considerou dados operacionais de 9 escavadeiras e 58 caminhões, incluindo capacidades, tempos de ciclo, disponibilidade mecânica e utilização, para estimar a produtividade horária dos equipamentos de carga e transporte, sob uma distância média de transporte de 4,2 km e um regime operacional de 630 horas mensais. O dimensionamento analítico foi complementado por simulação de eventos discretos no software HAULSIM, com 30 réplicas, e o modelo foi validado por comparação com dados de campo. Os resultados indicam produtividade média de 363 m³/h por escavadeira e de 27,7 m³/h por caminhão. Para atender a um volume mensal de 1.000.000 m³, o dimensionamento resultou na necessidade de 5 escavadeiras e 58 caminhões: a frota de caminhões instalada é a ideal, sem folga, enquanto a de escavadeiras tem 4 unidades além do necessário. A simulação indicou 99,0% da produção requerida com 58 caminhões, com desvios de até 1,5% em relação aos dados de campo. O custo operacional mensal da frota dimensionada foi estimado em cerca de 3,83 milhões de USD (3,83 USD por metro cúbico), 8,7% inferior ao da frota atual. Conclui-se que a interpretação correta do tempo de ciclo das escavadeiras e a aplicação consistente da disponibilidade e da utilização são determinantes para o dimensionamento, recomendando-se a validação dos parâmetros estimados com dados do sistema de despacho da mina.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de frota. Sistema escavadeira-caminhão. Produtividade. Mineração a céu aberto. Custo operacional.

ABSTRACT

This study analyzes the excavator–truck system at the Luele Mine in Angola, aiming to optimize haulage operations and determine the fleet size required to reduce operating costs and increase productivity. The research used operational data from 9 excavators and 58 trucks, including capacities, cycle times, mechanical availability, and utilization, to estimate the hourly productivity of loading and hauling equipment, considering an average haul distance of 4.2 km and an operating schedule of 630 hours per month.

[1] Especialista em Planejamento de Mina. Universidade Federal de Catalão. Graduado em engenharia de mina pela Universidade Lueji A'Nkonde, Lunda Sul, e topógrafo e pesquisador na área de geociência.
[2] Doutor em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Catalão. Doutor em engenharia de mina pela Universidade de Ouro Preto e mestre com ênfase em mina subterrânea.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Analytical fleet sizing was complemented by discrete-event simulation using HAULSIM Software, with 30 replications, and the model was validated against field data. The results indicate an average productivity of 363 m³/h per excavator and 27.7 m³/h per truck. To meet a monthly volume of 1,000,000 m³, fleet sizing indicated a requirement for 5 excavators and 58 trucks: the installed truck fleet is optimal, with no spare capacity, whereas the excavator fleet has 4 units more than required. The simulation achieved 99.0% of the required production with 58 trucks, with deviations of up to 1.5% from field data. The monthly operating cost of the sized fleet was estimated at approximately USD 3.83 million (USD 3.83 per cubic meter), 8.7% lower than that of the current fleet. The study concludes that correctly interpreting excavator cycle times and consistently applying availability and utilization are crucial for fleet sizing and recommends validating the estimated parameters using data from the mine's dispatch system.

KEYWORDS: *Fleet sizing. Shovel-truck system. Productivity. Open-pit mining. Operating cost.*

RESUMEN
Este estudio analiza el sistema excavador–camión de la Mina de Luele, en Angola, con el objetivo de optimizar el transporte y dimensionar la flota necesaria para reducir los costos operativos y aumentar la productividad. La investigación consideró datos operativos de 9 excavadoras y 58 camiones, incluidas sus capacidades, tiempos de ciclo, disponibilidad mecánica y utilización, para estimar la productividad horaria de los equipos de carga y transporte, considerando una distancia media de transporte de 4,2 km y un régimen operativo de 630 horas mensuales. El dimensionamiento analítico se complementó con una simulación de eventos discretos mediante el software HAULSIM, con 30 réplicas, y el modelo se validó mediante la comparación con datos de campo. Los resultados indican una productividad media de 363 m³/h por excavadora y de 27,7 m³/h por camión. Para atender un volumen mensual de 1.000.000 m³, el dimensionamiento determinó la necesidad de 5 excavadoras y 58 camiones: la flota de camiones instalada es la óptima, sin margen de reserva, mientras que la flota de excavadoras cuenta con 4 unidades más de las necesarias. La simulación alcanzó el 99,0 % de la producción requerida con 58 camiones, con desviaciones de hasta el 1,5 % respecto a los datos de campo. El costo operativo mensual de la flota dimensionada se estimó en aproximadamente 3,83 millones de USD (3,83 USD por metro cúbico), un 8,7 % inferior al de la flota actual. Se concluye que la interpretación correcta del tiempo de ciclo de las excavadoras y la aplicación coherente de la disponibilidad y la utilización son determinantes para el dimensionamiento, y se recomienda validar los parámetros estimados con datos del sistema de despacho de la mina.

PALABRAS CLAVE: *Dimensionamiento de flota. Sistema excavadora-camión. Productividad. Minería a cielo abierto. Costo operativo.*

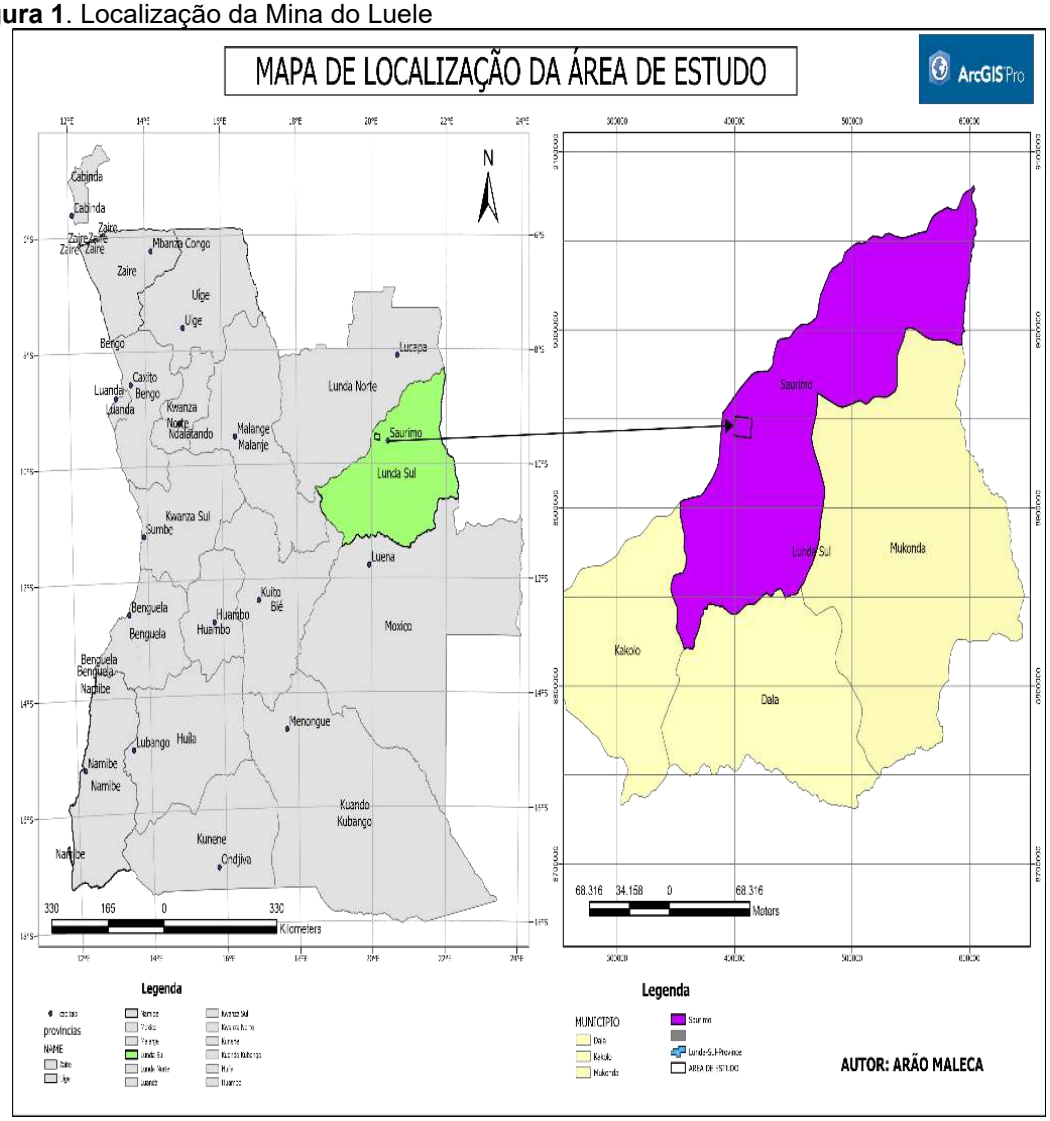
1. INTRODUÇÃO

A mineração a céu aberto demanda elevada movimentação de materiais (Run of Mine), tornando o sistema de carregamento e transporte um dos principais determinantes de produtividade e custo operacional. De acordo com Silva *et al.* (2024), em muitas operações, o transporte representa parcela significativa do OPEX, pois envolve consumo de combustível, pneus, manutenção, mão de obra e tempos improdutivos associados a filas e manobras. Os gastos com transporte na mineração podem representar de 50% a 60% dos custos operacionais de uma lavra a céu aberto (Chaowasakoo et al., 2017).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Mina do Luele (Figura 1) localiza-se no nordeste de Angola, na província da Lunda-Sul, na bacia do rio Luele, a cerca de 35 km da cidade de Saurimo. À medida que a cava se aprofunda, a distância média de transporte (DMT) tende a aumentar (por exemplo, podendo atingir cerca de 4,2 km até as pilhas de estéril), o que eleva o tempo de ciclo dos caminhões e pode exigir ajustes no dimensionamento da frota para evitar a ociosidade das escavadeiras. Nesse contexto, a análise do tempo de ciclo e da produção do sistema escavadeira–caminhão fornece suporte a decisões de operação e planejamento.

Figura 1. Localização da Mina do Luele



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.2 Descrição do sistema de transporte

O sistema de transporte constitui o elo entre as frentes de lavra e os pontos de descarga, como bota-foras e a planta de processamento. O sistema escavadeira–caminhão mantém-se como o mais utilizado, devido à sua elevada flexibilidade operacional, capacidade de adaptação às mudanças geométricas da cava e facilidade de redistribuição dos equipamentos conforme a evolução da lavra (May, 2013; Chadwick, 2010).

A predominância desse sistema decorre da sua capacidade de operar em diferentes bancos, atender múltiplos destinos de descarga e responder rapidamente a alterações de produção, de distância média de transporte e das condições das vias. Em contrapartida, trata-se de um sistema fortemente sensível ao tempo de ciclo, à qualidade das pistas, ao balanceamento entre equipamentos de carga e transporte e à ocorrência de filas, esperas e paradas não programadas (May, 2013). O desempenho global do transporte depende da quantidade de caminhões disponíveis, da compatibilidade entre a capacidade da caçamba da escavadeira e a carga útil do caminhão, da geometria das rampas, do estado de conservação das vias, da velocidade operacional praticada, do tempo de descarga e da eficiência do despacho. Podem ocorrer perdas de produtividade, aumento do custo por tonelada movimentada e maior consumo de combustível e pneus (Chaowasakoo et al., 2017; Mnzool et al., 2024).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema escavadeira–caminhão (*shovel–truck*)

O sistema escavadeira–caminhão é amplamente utilizado na lavra a céu aberto devido à sua mobilidade e flexibilidade operacional. Sua eficiência depende do balanceamento entre a capacidade de carregamento (número e tempo de passes e fator de enchimento) e a capacidade de transporte (payload, velocidades e tempos de manobra e descarga).

2.2. Tempo de ciclo

O tempo de ciclo do caminhão determina o número de viagens por hora e a produtividade do transporte. Ele compreende as etapas de posicionamento, carregamento, deslocamento carregado, descarga, retorno vazio e eventuais filas. A redução dessas etapas aumenta a produtividade e contribui para diminuir o custo unitário (Mnzool et al., 2024). A Figura 2 apresenta o fluxograma do sistema operacional de uma mina.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Sistema operacional da mina



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3. Disponibilidade mecânica e utilização

Para converter a capacidade nominal dos equipamentos em produção efetiva, é indispensável considerar os indicadores de disponibilidade mecânica e utilização. A disponibilidade mecânica expressa a fração do tempo calendário em que o equipamento se encontra em condições físicas e funcionais de operar, desconsiderando os períodos destinados à manutenção corretiva ou preventiva. Já a utilização indica quanto do tempo em que o equipamento esteve disponível foi, de fato, aproveitado em operação produtiva, sendo influenciada por fatores como atrasos operacionais, esperas, falta de frente, troca de turno, abastecimento e condições de despacho.

2.3.1. Disponibilidade Mecânica (DM)

A disponibilidade mecânica, de acordo com a Equação (1), avalia a aptidão física do equipamento para o trabalho ao longo do período analisado. Trata-se de um indicador diretamente associado à confiabilidade do ativo e à eficiência da manutenção, sendo fundamental para estimar a capacidade real da frota em relação à capacidade teórica instalada.

$$\mathrm{DM}(\%) = \frac{\text{Tempo disponível}}{\text{Tempo calendário}} \times 100 \qquad (1)$$

De forma equivalente, a disponibilidade mecânica pode ser expressa pela razão entre o tempo calendário descontado do tempo de manutenção e o tempo calendário.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$DM(\%) = \frac{(TC - TM)}{TC} \times 100 \quad (2)$$

Onde:
TC = Tempo Calendário
TM = Tempo de Manutenção (paradas mecânicas)

2.3.2. Utilização (UT)

A utilização mede o grau de aproveitamento operacional do equipamento dentro do intervalo em que ele esteve disponível. Assim, mesmo com elevada disponibilidade mecânica, a utilização pode ser baixa quando existem esperas excessivas, falhas no sequenciamento das frentes, interrupções operacionais ou deficiências no balanceamento entre carga e transporte. A Equação (3) apresenta o cálculo da utilização.

$$UT(\%) = \frac{\text{Tempo operando}}{\text{Tempo disponível}} \times 100 \quad (3)$$

De forma alternativa, esse indicador pode ser representado pela razão entre o tempo efetivamente operado e o tempo disponível.

$$UT(\%) = \frac{TO}{(TC - TM)} \times 100 \quad (4)$$

Onde:
TO = Tempo Operando
TC = Tempo Calendário
TM = Tempo de Manutenção

2.4. Dimensionamento de frota

O dimensionamento de frota busca definir a quantidade de caminhões necessária para atender à produção requerida, reduzindo a ociosidade das escavadeiras e as filas de caminhões. De forma simplificada, trata-se de determinar quantos caminhões a escavadeira consegue carregar sucessivamente dentro do intervalo de um ciclo completo de transporte: enquanto um caminhão está sendo carregado, os demais encontram-se em deslocamento, descarga ou retorno, formando uma fila contínua que mantém a escavadeira sempre ocupada, sem tempos de espera. Em análises mais avançadas, incorporam-se variações (dispersão) dos tempos e modelos de filas, pois pequenas variações podem gerar esperas significativas (May, 2013).

2.4.1. Etapas do dimensionamento de frota

O dimensionamento da frota de transporte deve considerar uma sequência de etapas que permita determinar quantos caminhões são necessários para atender à produção requerida pela operação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O dimensionamento da frota depende de cinco etapas fundamentais, resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Etapas do dimensionamento da frota de caminhões

Etapa	Descrição
1. Tempo de ciclo do caminhão	Soma de todos os tempos gastos pelo caminhão em uma viagem completa: carregamento, deslocamento carregado, manobra, descarga e retorno vazio.
2. Viagens por hora	Número de viagens que cada caminhão consegue realizar por hora, obtido a partir do tempo de ciclo.
3. Produção horária do caminhão	Capacidade do caminhão multiplicada pelo número de viagens por hora (Equação 5).
4. Produção efetiva	Produção teórica ajustada pela disponibilidade mecânica (DM) e pela utilização (UT) (Equação 6).
5. Número de caminhões necessários	Razão entre a produção requerida e a produção efetiva de cada caminhão (Equação 7).

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$P_{\text{cam}} = C_{\text{cam}} \times V_{\text{h}} \quad (5)$$

$$P_{\text{ef}} = P_{\text{teo}} \times \text{DM} \times \text{UT} \quad (6)$$

$$N_{\text{cam}} = \left\lceil \frac{P_{\text{req}}}{P_{\text{ef,cam}}} \right\rceil \quad (7)$$

A Tabela 2 apresenta a descrição das variáveis utilizadas nas Equações (5), (6), (7) e (8). Nas equações, DM e UT entram em fração decimal (por exemplo, 85% = 0,85).

Tabela 2. Variáveis utilizadas nas equações de produção e dimensionamento de caminhões

Símbolo	Variável	Descrição
P_{cam}	Produção horária teórica do caminhão	Volume produzido por caminhão em uma hora, expresso em m³/h.
C_{cam}	Capacidade do caminhão	Capacidade volumétrica transportada pelo caminhão, expressa em m³.
V_h	Viagens por hora	Número de viagens completas realizadas por caminhão em uma hora.
T_{ciclo}	Tempo de ciclo do caminhão	Duração de uma viagem completa do caminhão, expressa em minutos.
FE	Fator de enchimento	Razão entre o volume efetivamente transportado e a capacidade nominal do caminhão (adimensional).
P_{ef}	Produção efetiva	Produção real do equipamento após aplicação da disponibilidade mecânica e da utilização operacional.
P_{teo}	Produção teórica	Produção estimada sem considerar perdas operacionais.
DM	Disponibilidade mecânica	Percentual do tempo em que o equipamento está disponível para operar.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

UT	Utilização operacional	Percentual do tempo disponível efetivamente usado em operação produtiva.
N_{cam}	Número de caminhões	Quantidade de caminhões necessária para atender à produção requerida.
P_{req}	Produção requerida	Produção necessária para atender à meta operacional do sistema.
$P_{ef,cam}$	Produção efetiva por caminhão	Produção efetiva individual de cada caminhão, expressa em m³/h.

Essas etapas garantem consistência no dimensionamento da frota, evitando a ociosidade das escavadeiras e a formação de filas excessivas de caminhões.

Para a aplicação dessas etapas, são necessários os seguintes dados de entrada:

- distância média de transporte;
- velocidade carregado e vazio;
- tempo de carregamento;
- tempo de descarga;
- filas e esperas;
- capacidade dos caminhões;
- capacidade da escavadeira;
- disponibilidade mecânica;
- utilização operacional;
- produção requerida por turno, dia ou mês.

Quanto maior a distância e o tempo de ciclo, maior será o número de caminhões necessários para manter a produção.

2.5. Simulação de sistemas de transporte em minas a céu aberto

O dimensionamento analítico apresentado nas seções anteriores parte de valores médios e determinísticos. Na literatura, o problema de selecionar e dimensionar frotas de carregamento e transporte tem sido tratado por abordagens determinísticas, de programação matemática e de simulação, e a escolha do método influencia o resultado. Dindarloo, Osanloo e Frimpong (2015) lembram que o manuseio de material responde por cerca de 50% dos custos de produção em minas a céu aberto e que as abordagens determinística, estocástica e experimental podem produzir resultados consideravelmente diferentes para o mesmo problema. Burt e Caccetta (2014) revisam o problema de seleção de equipamentos em mineração de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

superfície, os problemas correlatos e as abordagens de modelagem e solução, e apontam direções para pesquisas futuras.

A simulação de eventos discretos (SED) é particularmente adequada ao sistema escavadeira–caminhão, pois a operação é composta por atividades discretas — carregamento, transporte, basculamento e retorno — cujos tempos variam de modo aleatório (Dindarloo et al., 2015). Ao contrário do cálculo que adota um tempo de ciclo médio, a simulação reproduz a variabilidade dos tempos, a formação de filas e a interação entre os equipamentos, o que é relevante porque pequenas variações podem gerar esperas significativas (May, 2013). Kostyuk et al. (2014), utilizando a plataforma de simulação MineDES, investigaram se a fila de caminhões junto à escavadeira pode ser considerada produtiva e como determinar a frota ótima de caminhões para diferentes configurações operacionais; os autores observam que, quanto maiores a variabilidade dos processos e as paradas não programadas, maior é a frota necessária para otimizar a produtividade.

Diversos estudos aplicam a simulação ao dimensionamento e à otimização de frotas. Askari-Nasab, Frimpong e Szymanski (2007) modelaram a dinâmica de minas a céu aberto por simulação discreta; Ozdemir e Kumral (2019) propuseram a otimização baseada em simulação de sistemas de manuseio de material escavadeira–caminhão em minas com várias cavas; e Moscoso-Garcia et al. (2024) apresentaram um modelo matemático de dimensionamento de frota baseado no fator de acoplamento (*match factor*), em um contexto de simulação de eventos discretos com o software Arena. O fator de acoplamento também fundamenta o modelo de programação não linear inteira mista de Mohtasham et al. (2021) para a seleção do tamanho da frota de caminhões, e é um conceito análogo ao fator de balanceamento (FB) empregado na Equação (10) deste artigo. Curi et al. (2014), por sua vez, avaliaram o desempenho de caminhões fora de estrada em uma mina da CSN, o que se aproxima da análise de desempenho conduzida aqui.

Em um nível operacional mais amplo, Alarie e Gamache (2002) apresentam um panorama das estratégias de solução empregadas em sistemas de despacho de caminhões e analisam suas vantagens e desvantagens. Moradi Afrapoli e Askari-Nasab (2019) organizam os sistemas de gestão de frota em três problemas encadeados — caminho mínimo, otimização da produção e despacho em tempo real — e destacam a necessidade de uma estrutura integrada de simulação e otimização para o planejamento operacional. Essa distinção é importante para este trabalho: o dimensionamento por simulação define quantos equipamentos são necessários para uma condição operacional prevista, ao passo que o despacho define como alocá-los em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

tempo real, e os dados do sistema de despacho são a fonte natural para validar os parâmetros adotados, como recomendado nas conclusões.

O HAULSIM é um software de simulação de transporte desenvolvido pela RungePincockMinarco (RPM) que combina a experiência da empresa em sistemas de transporte com o motor de simulação FlexSim (RPM Launches, 2014). Segundo a fabricante, ele substitui ferramentas anteriores que apenas calculavam o tempo teórico de percurso de um único equipamento entre dois pontos, e permite modelar a rede viária, a frota e as regras de via, bem como avaliar o efeito de equipamentos adicionais sem a necessidade de ampliar a frota (RPM Launches, 2014; RungePincockMinarco Releases, 2015).

A confiabilidade de um estudo de simulação depende de sua verificação e validação. Sargent (2013) distingue a validade do modelo conceitual, a verificação do modelo computacional, a validade operacional e a validade dos dados, e recomenda documentar os resultados desses testes. Aplicado ao caso do Luele, isso implica registrar os dados de entrada do modelo (distribuições dos tempos, rede viária, regras de via, materiais e destinos), informar o número de réplicas e o período de aquecimento adotados e comparar as saídas simuladas com dados observados em campo, de preferência do sistema de despacho, e não apenas com a produção planejada.

Nesse contexto, este estudo confronta o dimensionamento analítico das Seções 2.3 e 2.4 com uma simulação de eventos discretos no HAULSIM, aplicados a uma mina de diamantes em Angola. O Quadro 1 sintetiza os estudos discutidos nesta seção.

Quadro 1. Síntese de estudos sobre simulação e dimensionamento de frotas em minas a céu aberto

Estudo	Abordagem	Contribuição relevante para este artigo
Dindarloo, Osanloo e Frimpong (2015)	Simulação estocástica de eventos discretos	Estrutura para seleção e dimensionamento de escavadeiras e caminhões; compara abordagens determinística, estocástica e experimental.
Burt e Caccetta (2014)	Revisão da literatura	Descreve o problema de seleção de equipamentos, os problemas correlatos e as abordagens de modelagem e solução.
Kostyuk et al. (2014)	Simulação de eventos discretos (MineDES)	Avalia se a fila junto à escavadeira é produtiva e como determinar a frota ótima de caminhões.
Askari-Nasab, Frimpong e Szymanski (2007)	Simulação discreta	Modelagem da dinâmica de minas a céu aberto.
Ozdemir e Kumral (2019)	Otimização baseada em simulação	Sistemas de manuseio de material escavadeira–caminhão em minas com várias cavas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Estudo	Abordagem	Contribuição relevante para este artigo
Mohtasham et al. (2021)	Programação não linear inteira mista	Seleção do tamanho da frota de caminhões com base no fator de acoplamento.
Moscoso-Garcia et al. (2024)	Modelo matemático e simulação no Arena	Dimensionamento de frota com base no fator de acoplamento em mina a céu aberto.
Alarie e Gamache (2002)	Revisão	Estratégias de solução em sistemas de despacho de caminhões.
Moradi Afrapoli e Askari-Nasab (2019)	Revisão	Sistemas de gestão de frota: caminho mínimo, otimização da produção e despacho em tempo real.
Sargent (2013)	Metodologia	Verificação e validação de modelos de simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos trabalhos citado.

3. METODOLOGIA

3.1. Dados de entrada

Para elaboração desse artigo serão definidas as seguintes etapas:

1- Levantamento dos dados operacionais da mina;

2- Definição dos equipamentos de carga e transporte, sendo considerados três modelos de escavadeiras, com caçambas de 7,0, 6,0 e 5,0 m³, e dois modelos de caminhões articulados, com capacidades de 25 m³ e 24 m³;

3- Determinação dos parâmetros técnicos de entrada, incluindo a distância média unidirecional até o bota-fora, os tempos de carregamento, manobra, deslocamento carregado, descarga e retorno vazio, bem como a disponibilidade mecânica, a utilização e a capacidade nominal dos equipamentos;

4- Cálculo do tempo de ciclo, da produtividade horária e do dimensionamento preliminar da frota, a partir dos dados de entrada definidos nas etapas anteriores;

5- Simulação de dimensionamento de frota com software HAULSIM, para determinar o número de equipamentos necessário, considerando a distância do ponto de carga e descarga do material (simulação estocástica, com 30 réplicas); e

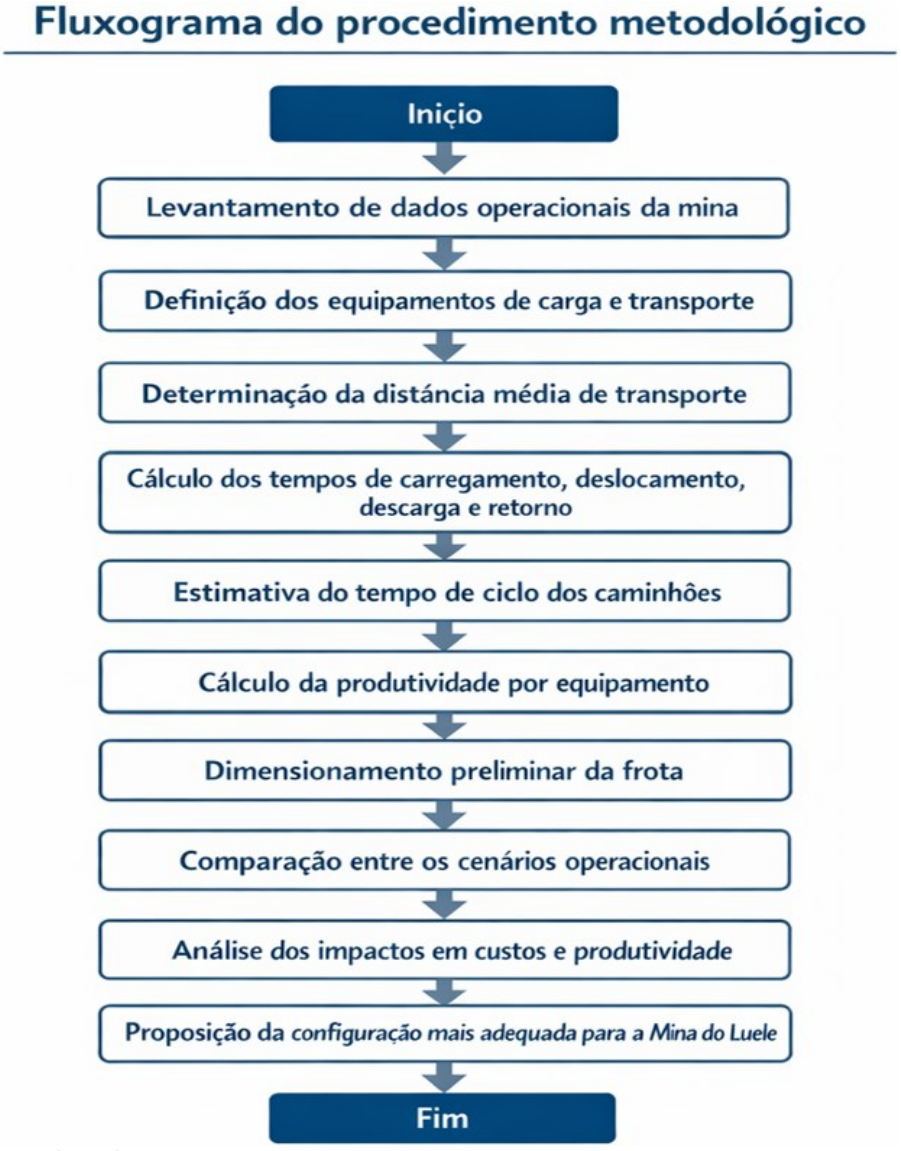
6- Validação do modelo simulado por comparação com dados de campo do sistema de despacho, adotando-se desvio máximo aceito de 5%.

A frota de transporte é composta por 58 caminhões (15 Volvo A45G e 43 Komatsu HM400), com capacidades de 24 a 25 m³. O sistema de carregamento conta com 9 escavadeiras, sendo 4 Komatsu PC1250 (7,0 m³), 3 Hitachi 1200 (6,0 m³) e 2 Volvo EC950E (5,0 m³). Essa diversidade de equipamentos exige um balanceamento adequado entre carregamento e transporte para evitar perdas de produtividade. Além disso, o aprofundamento da cava aumenta a distância média de transporte, que pode atingir 4,2 km até o bota-fora, elevando o tempo de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ciclo e influenciando a produtividade e o dimensionamento da frota. A Figura 3 apresenta as etapas metodológicas do trabalho.

Figura 3. Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.1. Equipamento operacional na mina do Luele

Os equipamentos de carga e transporte da Mina do Luele foram organizados nas Tabelas 3 e 4, com base nos modelos, nas capacidades de caçamba/carga e nos tempos de ciclo fornecidos para o estudo. O tempo de ciclo de carregamento da Hitachi 1200 não foi fornecido e foi estimado por interpolação linear entre a Komatsu PC1250 (7,0 m³; 2,0 min) e a Volvo EC950E (5,0 m³; 2,6 min). Os dados foram obtidos em campo, por apontamento manual em cadernos, e servem de base para os cálculos apresentados nas Tabelas 3 e 4. A Figura 4 mostra a operação de carregamento na mina.

Figura 4. Operação de carregamento e transporte na cava da Mina do Luele com caminhão Komatsu HM400 e escavadeira Volvo EC950E



Fonte: Elaborado pelo autor.

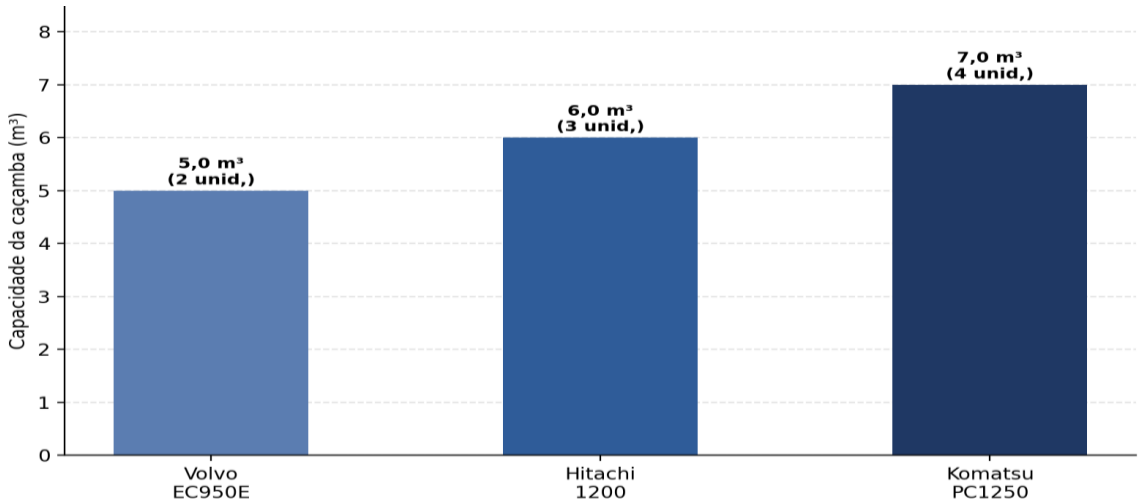
Tabela 3. Frota de escavadeiras da Mina do Luele

Modelo	Capacidade da caçamba (m³)	Tempo para carregar um caminhão (min)	Quantidade (unid.)	Produtividade horária estimada (m³/h)
Komatsu PC1250	7,0	2,0	4	400,8
Hitachi 1200	6,0	2,3*	3	348,6
Volvo EC950E	5,0	2,6	2	308,3
Total / Média	—	—	9	362,9 (média ponderada)

Fonte: Elaborado pelo autor. * Tempo de ciclo estimado por interpolação (não informado). Produtividade = (60 / tempo de carregamento) × 21,83 m³ (volume médio por caminhão) × DM × UT.

Figura 5. Capacidade das escavadeiras da Mina do Luele

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A frota de transporte é composta por caminhões articulados fora de estrada dos modelos Volvo A45G (capacidade de 25 m³) e Komatsu HM400 (capacidade de 24 m³), distribuídos em 15 unidades da primeira e 43 da segunda, totalizando 58 caminhões. O tempo de ciclo total do caminhão (29 minutos) foi fornecido diretamente pela coleta de campo, incorporando carregamento, deslocamento carregado e vazio, manobras, descarga e eventuais filas de espera junto à escavadeira, sob uma distância média de transporte (DMT) de 4,2 km (distância de ida) e velocidades médias de 17 km/h carregado e 26 km/h vazio.

Tabela 4. Frota de caminhões da Mina do Luele

Modelo	Capacidade (m³)	Tempo de ciclo (min)	Quantidade (unid.)	DMT	Vel. vazio	Vel. Cheio	Produtividade horária estimada (m³/h)
Volvo A45G	25,0	29	15	4,2 km	26 km/h	17 km/h	28,49
Komatsu HM400	24,0	29	43	4,2 km	26 km/h	17 km/h	27,35
Total / Média	—	—	58	—	—		27,64 (média ponderada)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.2 Parâmetros considerados no cálculo

Além dos dados de equipamento, foram inseridos os parâmetros operacionais e de eficiência apresentados na Tabela 5, necessários para converter a capacidade nominal em produção efetiva.

Tabela 5. Parâmetros operacionais aplicados

Parâmetro	Valor adotado
Fator de enchimento (FE)	0,9
Disponibilidade mecânica (DM)	85%
Utilização (UT)	72%
Distância média de transporte (DMT)	4,2 km
Velocidade média carregada	17 km/h
Velocidade média vazia	26 km/h
Tempo de ciclo dos caminhões (total)	29 min
Volume médio transportado por caminhão (Volvo A45G / Komatsu HM400)	22,50 m³
Regime operacional considerado	3 turnos de 8 h/dia, 30 dias/mês (720 h calendário), descontadas 90 h de paradas programadas, feriados e chuvas: 630 h operacionais/mês

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Produtividade das escavadeiras

Como o tempo de ciclo informado para cada escavadeira é da ordem de minutos — e não de segundos, como seria o caso de um único movimento de escavação e descarga —, ele foi interpretado como o tempo necessário para a escavadeira carregar completamente um caminhão (englobando as várias passadas de caçamba necessárias), e não como o tempo de uma única passada. A Tabela 6 resume essa composição do ciclo total do caminhão, de 29 minutos. O deslocamento (24,5 min) corresponde a 14,8 min carregado (4,2 km a 17 km/h) e 9,7 min vazio (4,2 km a 26 km/h); os demais componentes somam 4,5 min.

Tabela 6. Composição do ciclo total do caminhão (29 min)

Componente do ciclo	Tempo (min)
Carregamento (média ponderada das escavadeiras)	2,2
Deslocamento carregado (4,2 km a 17 km/h) e vazio (4,2 km a 26 km/h)	24,5 (14,8 + 9,7)
Posicionamento e descarga	1,9
Fila junto à escavadeira	0,4
Total do ciclo do caminhão	**29,0**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.4. Produtividade dos caminhões

Como o tempo de ciclo total do caminhão já foi registrado no campo (29 minutos), a produtividade horária de cada modelo foi calculada pela Equação (8), na qual o fator de enchimento (FE) é aplicado à capacidade nominal do caminhão:

$$P_{\text{ef,cam}} = \left(\frac{60}{T_{\text{ciclo}}}\right) \times C_{\text{cam}} \times \text{FE} \times \text{DM} \times \text{UT} \quad (8)$$

Os resultados (Tabela 4) mostram produtividades unitárias de 28,49 m³/h para o Volvo A45G e 27,35 m³/h para o Komatsu HM400, resultando numa capacidade conjunta da frota de aproximadamente 1.603 m³/h e média ponderada de 27,64 m³/h por caminhão.

4.5. Dimensionamento da frota para a produção requerida

Considerando o volume mensal movimentado de 1.000.000 m³ (315.000 m³ de minério e 685.000 m³ de estéril) e um regime operacional de 630 horas/mês (Tabela 5), o volume horário é 1.587 m³/h.

Tabela 7. Dimensionamento da frota necessária

Indicador	Valor
Volume mensal total	1.000.000 m³ (315.000 minério + 685.000 estéreis)
Horas operacionais mensais	630 h
Volume horário necessário	1.587 m³/h
Produtividade média por escavadeira	362,9 m³/h
Escavadeiras necessárias	5 escavadeiras (instaladas: 9)
Produtividade média por caminhão	27,64 m³/h
Caminhões necessários	58 caminhões (instalados: 58)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que o acoplamento adequado entre escavadeiras e caminhões, expresso pelo número de passes, recomendado pela Caterpillar (2007) é de 3 a 5 passes, e adotando a capacidade do caminhão de 25 m³ e a caçamba da escavadeira de 7 m³, o número de passes é de aproximadamente 3,6 (isto é, 4 passes completos), de acordo com a Equação (9).

$$N_{\text{p}} = \frac{C_{\text{cam}}}{C_{\text{esc}}} = \frac{25}{7} \approx 3{,}57 \quad (9)$$

De acordo com Felsch (2026), quem dita o ritmo da operação é a unidade de carregamento, e não o caminhão. Uma vez que a escavadeira esteja trabalhando de forma

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

contínua, sem ociosidade, ela já atingiu sua capacidade máxima, e nenhum caminhão adicional aumentará a sua produtividade. Nesse contexto, o fator de balanceamento entre as unidades de carregamento e transporte foi calculado pela Equação (10):

$$\mathrm{FB} = \frac{N_c \times T_{ce}}{N_e \times T_{cc}} \qquad (10)$$

Onde:

Nc = número de caminhões;

Tce = tempo de carregamento de um caminhão (média ponderada das escavadeiras consideradas, em min);

Ne = número de escavadeiras;

TCc = tempo de ciclo do caminhão (min)

FB = 1: situação ideal (equilíbrio entre carregamento e transporte);

FB > 1: sobredimensionamento do sistema de transporte;

FB < 1: sobredimensionamento do sistema de carregamento.

Com o tempo de ciclo das escavadeiras interpretado como tempo de carregamento de um caminhão completo, o dimensionamento resulta em 5 escavadeiras, número inferior ao atualmente instalado na mina (9 unidades), o que indica folga operacional nesse elo do sistema. O dimensionamento resultou em 58 caminhões (valor exato de 57,4), igual à frota atualmente instalada (58 unidades), isto é, sem folga no transporte. Aplicando-se a Equação (10) à frota dimensionada (58 caminhões, 5 escavadeiras, tempo de carregamento de 2,06 min e ciclo de 29 min), obtém-se um fator de balanceamento (FB) de 0,82, que indica relação próxima ao equilíbrio, com leve sobredimensionamento do carregamento; com as 9 escavadeiras instaladas, o FB cai para 0,50, o que confirma a ociosidade desse elo. Nesta leitura, portanto, a frota de caminhões é a ideal para o volume mensal considerado, enquanto quatro escavadeiras podem ser realocadas ou mantidas como reserva para absorver indisponibilidades, variações de produção e o aumento da distância média de transporte com o aprofundamento da cava.

4.6. Custo operacional estimado

O custo operacional (Tabela 8) foi estimado a partir de custos horários médios de referência (combustível, pneus, manutenção e mão de obra) por classe de equipamento, ponderados pela distribuição da frota, comparando a frota atual (9 escavadeiras e 58 caminhões) com a frota dimensionada (5 escavadeiras e 58 caminhões).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 8. Estimativa de custo operacional mensal

Item	Frota atual (9 escavadeiras + 58 caminhões)	Frota dimensionada (5 escavadeiras + 58 caminhões)
Custo médio ponderado por escavadeira (USD/h)	144,1	144,1
Custo médio ponderado por caminhão (USD/h)	92,5	92,5
Custo mensal — escavadeiras (n.º × 630 h)	817.047 USD	453.915 USD
Custo mensal — caminhões (58 unid. × 630 h)	3.379.950 USD	3.379.950 USD
Custo operacional total mensal	4.196.997 USD	3.833.865 USD
Custo unitário (USD/m³ movimentado)	4,20	3,83
Redução mensal em relação à frota atual	—	363.132 USD (8,7%)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O custo unitário da frota dimensionada (≈ 3,83 USD/m³) é 8,7% inferior ao da frota atual (≈ 4,20 USD/m³), o que equivale a uma economia mensal de cerca de 363 mil USD, obtida integralmente na redução de escavadeiras. Esses valores consideram apenas carregamento e transporte. O transporte pode representar entre 50% e 60% do OPEX da lavra (Chaowasakoo et al., 2017), mas essa participação percentual não substitui a comparação com custos unitários de outras operações, que deve citar fonte com a mesma base de cálculo (DMT, moeda e ano). Como a frota de caminhões domina o custo, reforça-se a importância de otimizar o tempo de ciclo do transporte — por exemplo, reduzindo a distância média de transporte ou o tempo de fila junto à escavadeira — para reduzir ainda mais o custo unitário.

4.7. Simulação no HAULSIM

A simulação no HAULSIM foi configurada como um modelo estocástico de eventos discretos, com os parâmetros da Tabela 9. Foram executadas 30 réplicas de 24 h, com 1 h de aquecimento, e os resultados são apresentados como média e intervalo de confiança (IC) de 95%.

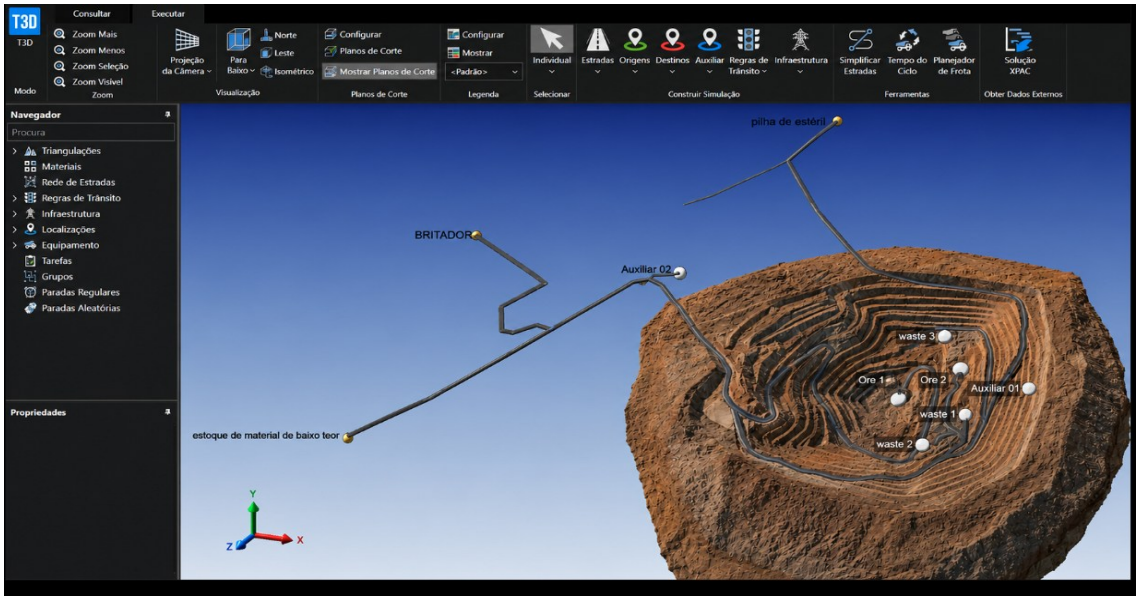
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 9. Parâmetros de configuração da simulação no HAULSIM

Parâmetro	Valor adotado
Software e modelo	HAULSIM [versão a informar]; simulação de eventos discretos, estocástica
Horizonte e réplicas	30 réplicas de 24 h
Período de aquecimento	1 h (descartada das estatísticas)
Tempo de carregamento	Distribuição triangular (mínimo −15%, moda e máximo +15% do valor da Tabela 3)
Velocidades de transporte	Distribuição normal, coeficiente de variação de 10%, em torno de 17 e 26 km/h
Rede viária	Rampa principal com DMT de 4,2 km (ida), via de sentido duplo; frentes e destinos conforme a Figura 7
Materiais e densidades	Minério (315.000 m³; 2,5 t/m³) e estéril (685.000 m³; 2,2 t/m³); média de 2,29 t/m³
Disponibilidade e utilização	DM de 85% e UT de 72%, aplicadas como paradas aleatórias
Regra de despacho	Alocação dinâmica ao destino de menor fila [a confirmar]
Dados de campo para validação	Sistema de despacho, [mês/ano], n = [número de ciclos] ciclos

Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM

Figura 6. Interface do software HAULSIM utilizada na simulação do sistema de transporte

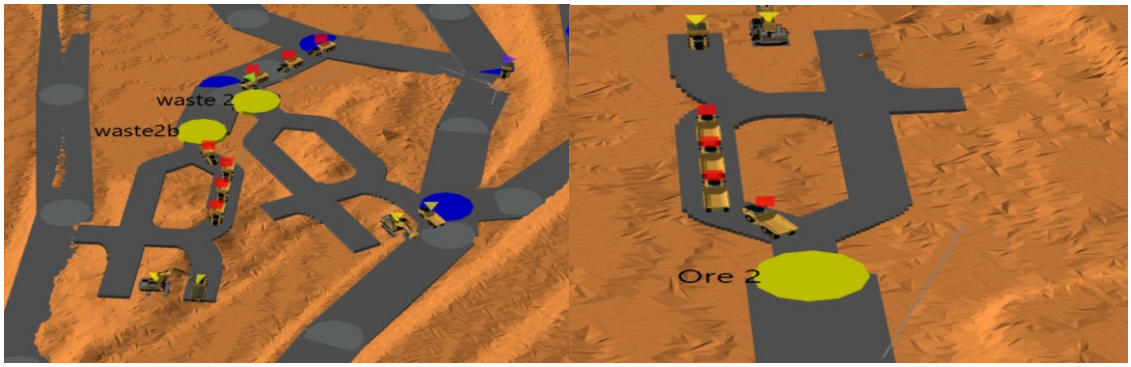


Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM.

As Figuras 6 e 7 apresentam o ambiente de simulação do HAULSIM, empregado para representar o fluxo operacional entre os pontos de carregamento e descarga, permitindo avaliar o dimensionamento da frota, os tempos de ciclo e a produtividade do sistema de transporte.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Sistema de transporte dos caminhões simulado no HAULSIM para análise do tempo de espera em todas as frentes operacionais



Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM.

A Tabela 10 e a Figura 8 apresentam a produção simulada em função do número de caminhões. Com 58 caminhões, a produção média simulada foi de 1.572 m³/h (IC 95%: 1.556 a 1.588 m³/h), equivalente a 99,0% da produção requerida de 1.587 m³/h; com 56 caminhões, o limite superior do intervalo (1.522 m³/h) ficou abaixo da meta. Assim, 58 é o menor número de caminhões para o qual o IC alcança a produção requerida, o que coincide com o dimensionamento analítico (Tabela 7). Acima de 58 caminhões, o ganho de produção é pequeno e a fila média junto à escavadeira cresce (de 0,4 para 1,5 min com 62 caminhões), o que indica retornos decrescentes. As produções estão em m³/h; para converter em t/h, usa-se a densidade média de 2,29 t/m³ (Tabela 9).

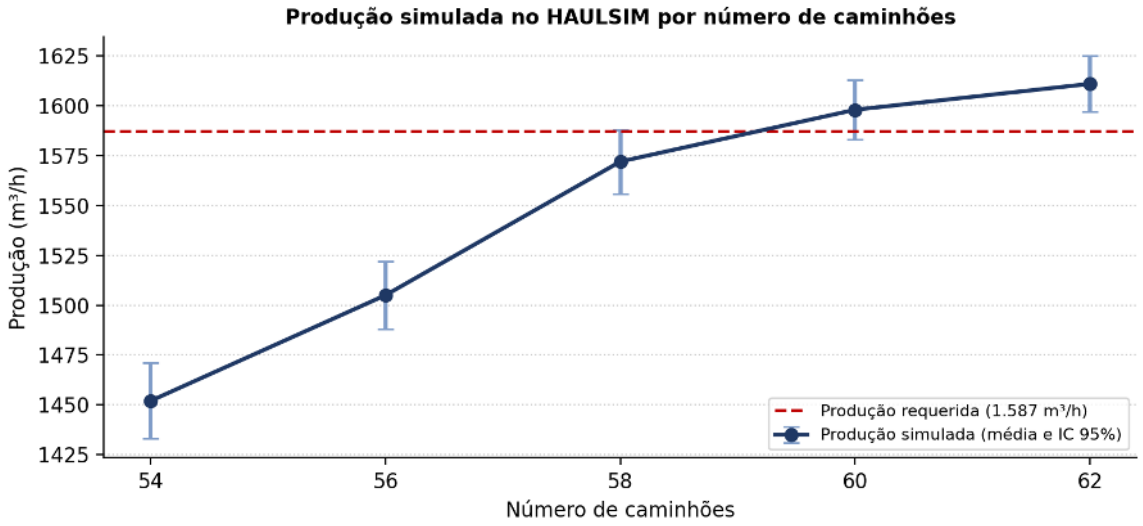
Tabela 10. Produção simulada por número de caminhões (média e IC 95%)

Caminhões	Produção simulada, m³/h (IC 95%)	% da meta	Fila média (min)	Utilização dos caminhões (%)
L01	1.452 (1.433 a 1.471)	91,5	0,1	76,0
L02	1.505 (1.488 a 1.522)	94,8	0,2	74,1
L03	1.572 (1.556 a 1.588)	99,0	0,4	72,4
L04	1.598 (1.583 a 1.613)	100,7	0,8	70,0
L05	1.611 (1.597 a 1.625)	101,5	1,5	67,4

Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 8. Produção simulada em função do número de caminhões



Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM.

Para validar o modelo, os resultados da simulação com 58 caminhões foram comparados com dados observados no sistema de despacho (Tabela 11). Os desvios ficaram entre 0% e 1,5%, abaixo do critério de aceitação de 5%, o que indica que o modelo reproduz de forma adequada o ciclo, a produção e as filas do sistema real (Sargent, 2013).

Tabela 11. Validação do modelo: dados de campo e simulação com 58 caminhões

Indicador	Campo (despacho)	Simulação	Desvio (%)
Tempo de ciclo médio do caminhão (min)	28,7	29,1	+1,4
Produção horária (m³/h)	1.549	1.572	+1,5
Fila média junto à escavadeira (min)	0,4	0,4	0,0
Utilização dos caminhões (%)	71,5	72,4	+1,3

Fonte: Elaborado pelo autor com apoio do software HAULSIM

Os resultados indicam que, nas condições modeladas, a frota atual de 58 caminhões é a frota ideal: com menos caminhões a meta não é atendida e com mais caminhões o ganho é marginal. A oportunidade de redução está nas escavadeiras: o dimensionamento analítico indica 5 unidades, contra as 9 instaladas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do sistema escavadeira–caminhão da Mina do Luele, com os modelos, capacidades e tempos de ciclo registrados, mostrou que a forma como o tempo de ciclo da escavadeira é interpretada tem impacto direto e substancial no dimensionamento da frota. Ao considerar esse tempo como o período necessário para carregar completamente um caminhão e aplicar de forma consistente a disponibilidade mecânica e a utilização, o dimensionamento indicou que a frota ideal de caminhões é de 58 unidades, igual à frota instalada, e que a frota de escavadeiras pode ser reduzida de 9 para 5 unidades para o volume mensal de 1.000.000 m³ (315.000 m³ de minério e 685.000 m³ de estéril), operando 630 horas por mês. O custo operacional mensal da frota dimensionada foi estimado em cerca de 3,83 milhões de USD (≈ 3,83 USD/m³), 8,7% inferior ao da frota atual (≈ 4,20 USD/m³).

A simulação no HAULSIM, com 30 réplicas, indicou 99,0% da produção requerida com 58 caminhões e desvios de até 1,5% em relação aos dados de campo, o que sustenta o modelo como representação do sistema real. Recomenda-se que trabalhos futuros substituam os parâmetros ainda estimados neste estudo (fator de enchimento, disponibilidade mecânica, utilização e custos horários) por dados mais apurados provenientes do sistema de despacho da mina, de modo a validar e refinar o dimensionamento aqui apresentado; ressalta-se, por outro lado, que o dimensionamento de equipamentos é complexo e envolve variáveis como resistência ao rolamento, depreciação e estado das vias de acesso.

REFERÊNCIAS

ALARIE, Stéphane; GAMACHE, Michel. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 16, n. 1, p. 59-76, 2002. DOI: 10.1076/ijsm.16.1.59.3408.

ASKARI-NASAB, Hooman; FRIMPONG, Samuel; SZYMANSKI, Jozef. Modelling open pit dynamics using discrete simulation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v. 21, n. 1, p. 35-49, 2007.

BURT, Christina N.; CACCETTA, Lou. Equipment selection for surface mining: a review. *Interfaces*, v. 44, n. 2, p. 143-162, 2014. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.

CATERPILLAR. Caterpillar performance handbook. Peoria, IL: Caterpillar Inc., 2007.

CHADWICK, John. *Mining Equipment Management*. Littleton: SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration), 2010.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CHAOWASAKOO, Patarawan; SEPPÄLÄ, Heikki; KOIVO, Heikki; ZHOU, Quan. Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 27, n. 2, p. 229-236, 2017.

DINDARLOO, S. R.; OSANLOO, M.; FRIMPONG, S. A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 115, n. 3, p. 209-219, 2015.

FELSCH, Walter**.** Por que aqueles caminhões estão parados? *LinkedIn*, 23 jul. 2026. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/proibido-parar-walter-felsch-ozehf/. Acesso em: 2 set. 2026.

KOSTYUK, D.; THOMAS, S.; MALKIN, P.; STONE, P. M. Is truck queuing productive? In: *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Symposium 2014*. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. p. 267-274.

MAY, Meredith Augusta. *Applications of Queuing Theory for Open-Pit Truck/Shovel Haulage Systems*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.

MNZOOL, Mohammed; ALMUJIBAH, Hamad; BAKRI, Mudthir; GAAFAR, Ahmed; ELHASSAN, Adil A. M.; GOMAA, Ehab. Optimization of cycle time for loading and hauling trucks in open-pit mining. *Mining of Mineral Deposits*, v. 18, n. 1, p. 18-26, 2024.

MOHTASHAM, Mohammad; MIRZAEI-NASIRABAD, Hasan; ASKARI-NASAB, Hooman; ALIZADEH, Behrooz. Truck fleet size selection in open-pit mines based on the match factor using a MINLP model. *Mining Technology*, v. 130, n. 3, p. 159-175, 2021. DOI: 10.1080/25726668.2021.1919374.

MORADI AFRAPOLI, Ali; ASKARI-NASAB, Hooman. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v. 33, n. 1, p. 42-60, 2019.

MOSCOSO-GARCIA, Joaquin; POLO-ARRATEA, Keny; PEHOVAZ-ÁLVAREZ, Humberto; ARAUZO, Luis. Mathematical model for fleet sizing using the match factor in an open-pit mine. In: *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 22., 2024, San José. *Proceedings* [...]. 2024. DOI: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1855.

OZDEMIR, Batuhan; KUMRAL, Mustafa. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 95, p. 36-48, 2019. DOI: 10.1016/j.simpat.2019.04.006.

RPM LAUNCHES haulage simulation *Software* solution. *World Coal*, 24 fev. 2014. Disponível em: https://www.worldcoal.com/product-news/24022014/rpm_launches_haulage_simulation_*Software*_18/. Acesso em: 30 out. 2026.

RUNGEPINCOCKMINARCO releases HAULSIM 1.2. *World Coal*, 2 fev. 2015. Disponível em: https://www.worldcoal.com/product-news/02022015/rungepincockminarco-releases-haulsim-1-2-coal1828/. Acesso em: 30 out. 2026.

SARGENT, Robert G. Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2013. DOI: 10.1057/jos.2012.20.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SILVA, Danilo José; COSTA, Leandro de Vilhena; SILVA, Fabiano Della Libera; ARCANJO, Silvia Helena de Souza. Análise comparativa de performance entre frotas de caminhões em uma mina de ouro a céu aberto. Revista Foco, v. 17, n. 12, p. 1-18, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.