

CIRO CAMPOS COSTA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA OPÇÃO POR VEÍCULOS
AUTÔNOMOS NO DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE UMA
MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

São Paulo

2021

CIRO CAMPOS COSTA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA OPÇÃO POR VEÍCULOS
AUTÔNOMOS NO DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE UMA
MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo

Orientador: Prof. Ricardo Cabral de Azevedo

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

COSTA, Ciro

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA OPÇÃO POR VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO
DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE UMA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO / C.
COSTA -- São Paulo, 2021.

41 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Dimensionamento de Frota. 2.Caminhões Autônomos 3.Mineração
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

RESUMO

Este trabalho discorre sobre como a evolução da tecnologia na automação de veículos possibilitou uma mineração mais segura e eficiente. O motivo da escolha deste tema vem do fato de que a exploração mineral ainda é um dos ofícios com maior incidência de acidentes fatais. O transporte de minério através de caminhões fora-de-estrada autônomos tem reduzido drasticamente o número de fatalidades onde tem sido adotado. Outro fator relevante que motivou a fomentou a preferência por este assunto foi a diminuição da poluição que esta tecnologia proporciona através da menor necessidade de manutenção, prolongamento da vida útil dos equipamentos e menor emissão de gases poluentes na atmosfera. Além de apresentar esses benefícios, este trabalho se propôs a analisar também, por meio de um dimensionamento de frota em uma cava real, as vantagens operacionais dos veículos autônomos frente aos modelos convencionais. Para tal, este estudo valeu-se de informações encontradas na literatura, manuais dos fabricantes e de experiências com a adoção de transporte autônomo em minerações reais. Dessa forma, foi possível apresentar uma metodologia simples para avaliar se a adoção de caminhões autônomos é operacionalmente vantajosa frente à caminhões tripulados. Por fim, foi possível comprovar, através de números, as vantagens operacionais de caminhões não-tripulados na mineração.

Palavras-chave: Dimensionamento de frota. Caminhões autônomos. Mineração.

ABSTRACT

This work discusses how the evolution of technology in vehicle automation made possible a safer and more efficient mining. The reason for choosing this theme comes from the fact that mineral exploitation is still one of the occupations with the highest incidence of fatal accidents. Transporting ore by autonomous off-highway trucks has drastically reduced the number of fatalities where it has been adopted. Another relevant factor that motivated the choice of this theme was the reduction in pollution that this technology provides through less need for maintenance, longer equipment life and less emission of polluting gases into the atmosphere. In addition to presenting these benefits, this work also proposed to analyze, through a fleet dimensioning of a real pit, the operational advantages of autonomous vehicles compared to conventional models. To this end, this study drew on information found in the literature, manufacturers' manuals and experiences with the adoption of autonomous transport in real mining. Thus, it was possible to present a simple methodology to assess whether the adoption of autonomous trucks is operationally advantageous compared to manned trucks. Finally, it was possible to prove, through numbers, the operational advantages of unmanned trucks in mining.

Keywords: Fleet dimensioning. Autonomous trucks. Mining.

Sumário

1. Introdução.....	7
1.1. Meta.....	7
1.2. Objetivo.....	7
1.3. Justificativa do Trabalho	8
2. Revisão Bibliográfica.....	9
2.1. Surgimento de Veículos Autônomos	9
2.2. Vantagens	11
2.3. Desafios.....	13
2.4. Modelos Autônomos	14
2.5. <i>Retrofit Kit</i>	15
3. Metodologia.....	15
3.1. Método de Dimensionamento	15
3.1.1. Distância Média de Transporte (DMT)	16
3.1.1.1. DMT Global	17
3.1.2. Movimentação Total de Material.....	17
3.1.3. Velocidade Média.....	17
3.1.4. Disponibilidade Mecânica ou Física	18
3.1.5. Utilização Global.....	19
3.2. Eficiência Operacional (EO)	19
3.3. Horas Trabalhadas	20
3.4. Movimentação Horária de Material (MHM)	20
3.5. Tempo de Ciclo da Escavadeira (TcicloE).....	20
3.6. Tempo de Ciclo dos Caminhões (Tciclo)	21
3.7. Número de Caminhões	21
3.8. Tempo de Espera dos Caminhões.....	22
3.9. Estudo de Caso	22
4. Resultados	24
4.1. Dados de Produção.....	24
4.2. DMT Global	25
4.3. Regime de Trabalho.....	26
4.4. Velocidade Média dos Caminhões.....	27
4.5. Disponibilidade Física dos Caminhões.....	28
4.6. Utilização Global	29
4.7. Eficiência Operacional	29
4.8. Horas Efetivamente Trabalhadas no Ano	29

4.9. Número de Passes da Escavadeira	30
4.10. Tempo de Ciclo da Escavadeira	31
4.11. Tempo de Ciclo do Caminhão	31
4.12. Número de Veículos	32
4.12.1. Cenário Alternativo	33
4.13. Tempo de Espera	34
5. Discussão de Resultados.....	34
6. Conclusão	35
6.1. Recomendação para Trabalhos Futuros	35
Revisão Bibliográfica.....	36
Apêndice A.....	39

1. Introdução

A mineração é uma atividade que consiste na extração e processamento de recursos minerais da natureza, para então servirem de matéria-prima para construção e desenvolvimento de itens indispensáveis à sociedade. Além disso, é uma das atividades mais antigas exercidas pelo homem, que, desde os períodos pré-históricos já utilizava técnicas arcaicas para a fabricação de armas e objetos de pedra.

Atualmente, em uma mineração, com a evolução da tecnologia e o aumento da demanda global por matérias-primas minerais, é necessário o uso de equipamentos de grande porte, como caminhões fora-de-estrada e escavadeiras, para suprir essa demanda. Nos anos 2000, a empresa de veículos de mineração Komatsu introduziu ao mundo mineral uma tecnologia bastante promissora e inovadora: um sistema de transporte de minérios completamente autônomo, através de caminhões fora-de-estrada. Desde então, outras companhias têm desenvolvido seus próprios sistemas de transporte autônomo e o número de operações com caminhões não tripulados tem aumentado.

Do seu lançamento até os dias atuais, o sistema autônomo de transporte da Komatsu não esteve envolvido em nenhum acidente. Dessa forma, com a popularização dessa tecnologia, é possível que no futuro a industrial mineral deixe de ser uma das indústrias com maior incidência de acidentes fatais no mundo.

1.1. Meta

A meta deste trabalho é elaborar uma metodologia de dimensionamento de frota, a partir de indicadores de produção, que auxiliem na tomada de decisão quanto à adoção ou não de frota autônoma em uma lavra a céu aberto.

1.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é analisar os impactos no dimensionamento da frota de lavra de uma mina, com a adoção de transporte de mina por meio de caminhões fora-de-estrada autônomos.

Como objetivos específicos, pretendeu-se:

- Apresentar breve histórico do uso de equipamentos autônomos na mineração, assim como seu uso nos dias atuais e suas vantagens e desvantagens em relação à frota de equipamentos convencionais;
- Apresentar método tradicional de dimensionamento de frota;
- Realizar estudo de dimensionamento de frota de caminhões, utilizando a metodologia proposta;
- Comparar os resultados e avaliar as eventuais diferenças obtidas com o uso das diferentes frotas.

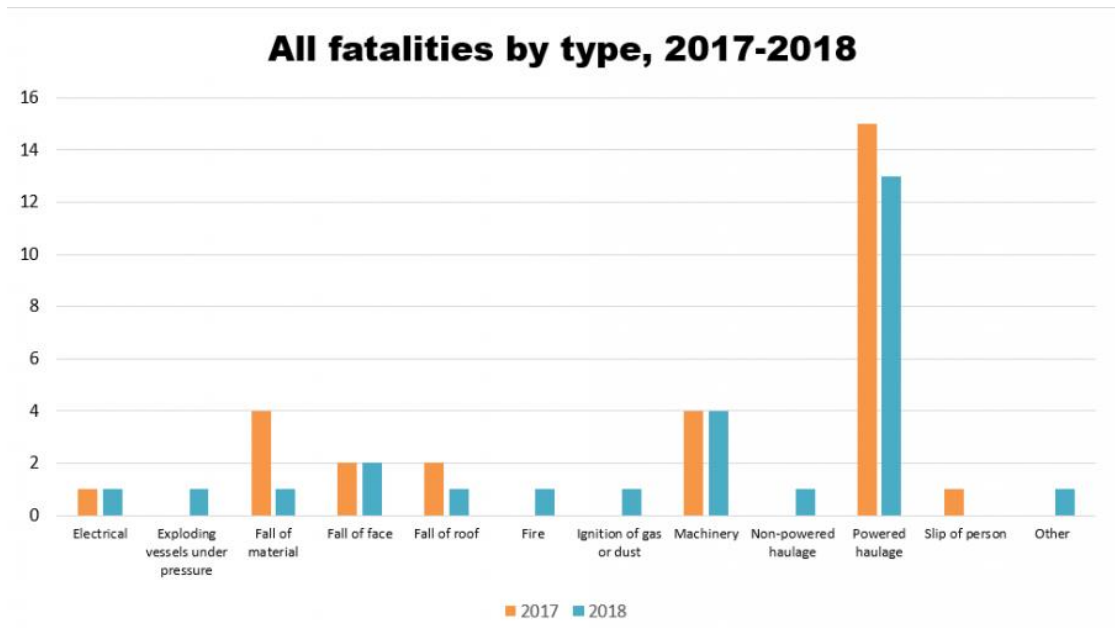
1.3. Justificativa do Trabalho

Os elementos que justificam a escolha do tema proposto estão apresentados a seguir:

- 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). Os fabricantes de caminhões autônomos e mineradoras que adotaram o sistema de transporte autônomo reportam aumento da produtividade e diminuição de custos operacional, após adoção de caminhões autônomos em suas operações;
- Nos Estados Unidos, o maior número de fatalidades acontece envolvendo o *powered haulage*, isto é, transporte de pessoas e materiais com máquinas operadas por humanos, tais como: caminhões, carregadores frontais, empilhadeiras etc. A *Mine Safety and Health Administration (MSHA)* dos EUA estima também que de 3 a 4 vidas seriam salvas por ano, se os operadores usassem cinto de segurança durante a operação dos equipamentos (*UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR*, 2021).

A fim de ilustrar este último, a Figura 1 revela que nos Estados Unidos, em 2017 e 2018, o *Powered Haulage* foi o responsável pelo maior número de mortes no país.

Figura 1 - Número de fatalidades na mineração por tipo nos Estados Unidos entre 2017 e 2018.



Fonte: Mining Technology (2019)

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Surgimento de Veículos Autônomos

O conceito de transporte autônomo na mineração não é novidade. Em 1970, a empresa Unit Rig se juntou com a Saab-Scania para desenvolver um sistema de caminhões operados sem condutores. Os caminhões entraram em operação em 1976 e funcionaram por vários meses. O sistema contava com um cabo enterrado na rampa, e quando o veículo chegava perto do local de despejo de material, um operador precisava assumir o controle do caminhão para manobrar, e só após a manobra, ele redirecionava o caminhão no trajeto autônomo (HUSTRULID *et al.*, 2013).

Zoschke¹ (2001, *apud* HUSTRULID *et al.*, 2013) resumiu alguns momentos importantes na história da automação:

- Inícios dos anos 70: sustentações instaladas por cabo na estrada de transporte;

¹ ZOSCHKE, L. T. Recent Experiences with Autonomous Haul Trucks in Open Pit Mines, 2001.

- Início dos anos 80: Transmissores de Rádio;
- Anos 80: giroscópios de fibra óptica, balizas terrestres;
- Inícios dos anos 90: protótipo de sistema operacional GPS;
- Meados dos anos 90: desenvolvimnto refinado do GPS;
- 1997: Integração de um sistema de supervisão;
- 1998: Demonstração de um ciclo completo utilizando sistema de supervisão autônomo;
- 1999, 2000: Desenvolvimento integrado e teste operacional de um sistema capas de produção;
- 2001: Produção autônoma;
- 2008: Komatsu lança o *FrontRunner*, o primeiro Sistema de Transporte Autônomo (AHS) da mineração.

A mineração é uma das indústrias que se beneficiam do avanço da robótica e da inteligência artificial. Os caminhões fora-de-estrada autônomos, que integram o Sistema de Transporte Autônomo (AHS, *Autonomous Haulage System*), são capazes de carregar até 400 toneladas e transportá-las precisamente sem interagir com seres humanos (Gaber *et al.*, 2021).

O AHS depende essencialmente de: comunicações sem fio, sistemas de prevenção e detecção de obstáculos e GPS. Ao carregar os caminhões, eles são guiados automaticamente para o carregamento local, com base na posição da escavadeira ou retroescavadeira equipada com GPS. O sistema de supervisão, em seguida, direciona os caminhões ao longo da rota para o local de despejo. Do ponto de vista da segurança, o sistema de controle da frota evita colisões com os outros caminhões basculantes, veículos de serviço ou outro equipamento nos locais de mineração. Se o sistema de detecção de obstáculos embutido detecta outro veículo ou pessoa dentro da área de transporte durante o trajeto, os caminhões vão reduzir a velocidade ou parar imediatamente, garantindo a segurança e confiabilidade do sistema.

No *FrontRunner* da Komatsu, os caminhões transitam independentemente, existindo apenas a necessidade de um supervisor do sistema, que pode se encontrar há

milhares de quilômetros da operação. É importante ressaltar que não cabe ao supervisor o controle remoto dos veículos (Komatsu, 2021).

O sistema de controle do veículo do caminhão incorpora um mapa detalhado da área da mina, incluindo estradas de transporte, áreas de carregamento, áreas de despejo e áreas de reabastecimento e manutenção. O controlador central da mina atribui as rotas necessárias para cada caminhão, seja transporte de estéril ou transporte de minério. Cada ferramenta de carregamento é equipada com um computador com tela de toque integrado que mostra a localização, direção do movimento e velocidade de todos os itens da planta móvel dentro da área de operações da frota do *FrontRunner*. Conforme cada caminhão se aproxima da área de carregamento, o operador da ferramenta de carregamento usa seu computador com tela de toque a bordo para "localizar" o caminhão no local de carregamento correto, "dizendo" ao caminhão quando ele pode se mover para a posição de carregamento, onde será carregado para então mover-se para a área de despejo. No despejo, o sistema autônomo é capaz de atender às diferentes necessidades da mina, dependendo do material a ser despejado, seja para locais fixos de britagem de minério extraído ou para depósito de estéril (KOMATSU, 2021).

2.2. Vantagens

As vantagens do uso de frota autônoma na mineração podem ser percebidas principalmente nas seguintes áreas: ambiental, segurança e operacional.

No que diz respeito ao meio ambiente, a mina de Brucutu da Vale em Minas Gerais reportou que, desde quando começaram a usar frota autônoma em suas operações, o consumo de combustível reduziu em 11%, o que resulta em 4,3 mil toneladas de gás carbônico emitidas a menos por ano (MEDEIROS, 2021). Isto se deve a menor ocorrência de trocas de marcha e freadas repentinas feitas pelos condutores. Além disso, estima-se que a vida útil dos equipamentos aumente na ordem de 7%, reduzindo também as despesas com itens de manutenção como peças e lubrificantes. Estima-se também um desgaste 25% menor dos pneus (IBRAM, 2021).

Quanto à segurança dos trabalhadores, o *CatMineStar Command*, sistema AHS da Caterpillar, diminuiu o número de incidentes em 50% onde foi implantado (MINING NEWSWIRE, 2021). O *FrontRunner* da Komatsu ainda não reportou nenhum acidente desde o seu surgimento em 2008 (KOMATSU, 2021).

Desde a implantação da frota autônoma na mina da Vale em Brucutu, em Minas Gerais, em 2016, não foi registrado nenhum acidente causado pelos caminhões (IBRAM, 2021).

Quanto às vantagens operacionais do uso de frota autônoma, pode-se dizer que ela possibilitaria a continuação da produção, mesmo em momentos de impedimentos operacionais. Barbosa (2020) diz que isso seria equivalente ao tempo em que o equipamento poderia estar em operação, mas não está operando por decisão dos gestores, falta de equipamento crítico necessário ou falta de operador. Segundo Hsu² (2015, *apud* BARBOSA, 2020), alguns exemplos de impedimentos operacionais são:

- Emergência (sem operador no equipamento);
- Equipamento não programado para o trabalho;
- Almoço/descanso;
- Reunião;
- Falta de operador;
- Falta de escavadeira para os caminhões;
- Manutenção oportuna;
- Troca de turno;
- Escavadeira sem material;
- Falta de energia elétrica (longa duração);
- Feriado legal;
- Greve;
- Condições meteorológicas;

² HSU, N. **Data Quality of Fleet Management Systems in Open Pit Mining: Issues and Impacts on Key Performance Indicators for Haul Truck Fleets**. [s.l.] Queen's University, 2015.

O tempo economizado com a troca de turnos podem demorar de 30 minutos a uma hora por troca. Além disso, em minas subterrâneas, a economia de tempo é ainda mais significativa, pois o operador não precisa se deslocar da superfície até à máquina para iniciar a operação (ROBINSON, 2019).

A literatura sobre vantagens e ganhos obtidos com a substituição de frota manual pela frota autônoma é escassa. Os pesquisadores Hustrulid *et al.* (2013) compilaram os ganhos relativos sob a forma de KPIs (Key Performance Indicators) dos caminhões não tripulados frente aos caminhões com condutores:

- Investimento por caminhão: + 30%;
- Tempo de ciclo de transporte: - 7%;
- Consumo de combustível: - 10%;
- Desgaste de pneus: - 12%;
- Disponibilidade mecânica: + 8%;
- Aumento de produtividade: + 5%;
- Custo de manutenção: - 14%;
- Aumento de vida útil do caminhão: + 12%;
- Custo de mão de obra: - 5%.

2.3. Desafios

Barbosa (2020) levantou algumas situações em que um caminhão autônomo pode apresentar dificuldade na tomada de decisão em comparação com um caminhão tripulado:

- Aproximação de um veículo leve;
- Presença de animais na via;
- Condições climáticas que possam interferir no sensoriamento;
- Condições de piso que causem atrito dinâmico com o pneu do caminhão;
- Equipamentos de infraestrutura trabalhando na frente de lavra ou local de basculamento;
- Outros.

Robinson (2019) mostra também que a automatização das minas não está isenta de problemas. Dentre eles, pode-se citar a não percepção, por parte dos caminhões

autônomos, de quando uma estrada está lamacenta; o que pode resultar no atolamento do veículo, após chuvas fortes. Também já foi registrado que drones podem interromper as frequências de rádio, ocasionando em paradas dos caminhões.

2.4. Modelos Autônomos

As maiores marcas produtoras hoje de caminhões autônomos são a Komatsu e a Caterpillar, representando 93% dos caminhões em operação em superfície. Os modelos de caminhões mais populares são o 793F da Caterpillar e os 930Es da Komatsu (*MINING TECHNOLOGY*, 2020).

Figura 2 - Caminhão Caterpillar modelo 793F.



Fonte: Caterpillar.

Figura 3 - Caminhão Komatsu modelo 930E



Fonte: Wikipédia

Outros modelos que podem operar de forma autônoma são: CAT 789D, CAT 793D, CAT 797F, CAT 794AC.

2.5. Retrofit Kit

A *Komatsu* desenvolveu o chamado *Retrofit Kit* que, quando instalado em caminhões convencionais, possibilita a transformação dos mesmos em caminhões autônomos, podendo assim integrá-los ao sistema AHS (KOMATSU, 2018). O propósito da sua criação foi adaptar a já existente frota de caminhões de uma mina para operar de forma autônoma junto com os novos caminhões autônomos, e consequentemente diminuir custos usando as suas frotas.

A *Caterpillar* (2017) anunciou que está em desenvolvimento de *Retrofit Kits* que permitam, não só a transformação de seus caminhões convencionais em autônomos, mas também a transformação de caminhões de outros fabricantes, e permitir também o funcionamento e a interação segura entre eles. A transformação se daria a partir da adaptação do *hardware* e do *software*.

3. Metodologia

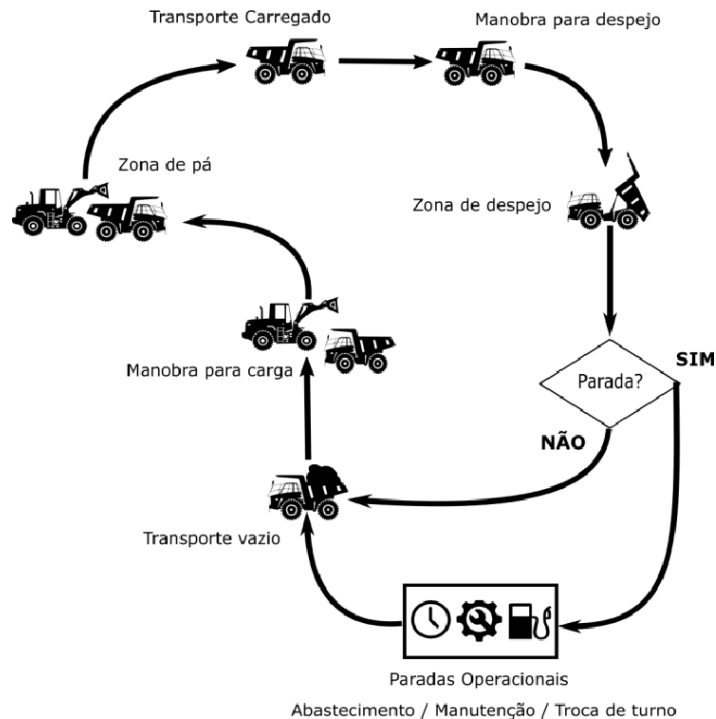
3.1. Método de Dimensionamento

Neste item, será apresentado o método utilizado neste trabalho para dimensionar o número mínimo de caminhões fora-de-estrada necessário para a exploração de uma cava. A metodologia foi desenvolvida a partir da literatura disponível sobre o assunto.

Antes de apresentar o método, é necessário mostrar o circuito considerado neste trabalho que será realizado pelos caminhões. A Figura 4 descreve o trajeto de uma operação comum de carregamento e transporte com caminhões fora-de-estrada. Inicialmente ele precisa ser carregado pela escavadeira (zona de pá), em seguida ele faz o transporte carregado até a pilha de estéril ou britador, onde vai precisar manobrar para fazer o despejo do material (zona de despejo). Se o caminhão não precisar ir para a manutenção, nem trocar de turno e nem abastecer, ele volta vazio para a frente

de lavra onde terá que aguardar em fila se houver, e em seguida manobrar para ser carregado de novo, encerrando-se o ciclo.

Figura 4 - Ciclo de carregamento e transporte de uma mina a céu aberto.



Fonte: Maia (2020).

Para efeitos práticos, considerou-se uma metodologia simplificada para cálculo de dimensionamento das frotas de caminhões. Algumas das variáveis avançadas de dimensionamento não foram consideradas devido à dificuldade na obtenção desses dados de minerações reais, e por se tratar de um trabalho a nível preliminar.

As variáveis não consideradas são: fator de enchimento da caçamba, densidade da rocha, fator de empolamento do minério, fator de enchimento da caçamba, restrições físicas e operacionais da mina, resistência ao rolamento e resistência da rampa.

3.1.1. Distância Média de Transporte (DMT)

É a distância média na qual o caminhão percorre. Neste trabalho, a DMT foi determinada a partir de imagens de satélite através do *software* Google Earth.

3.1.1.1. DMT Global

A distância média de transporte global percorrida pelos caminhões pode ser entendida como a soma das distâncias ponderadas pelas massas de minério e estéril que eles transportam. A distância média global percorrida pelos caminhões foi calculada através da Fórmula 1.

$$DMT_{global} = \frac{(DMT_{rom} * MASSA_{rom}) + (DMT_{estéril} * MASSA_{estéril})}{Movimentação_{total}} \quad (1)$$

3.1.2. Movimentação Total de Material

O cálculo da movimentação anual de material da mina, que pode ser entendido como o peso total transportado no ano pelos caminhões, foi calculado pela Fórmula 2.

$$MT = ROM + (ROM * REM) \quad (2)$$

Onde:

- MT: Movimentação total de material;
- ROM: Movimentação de minério;
- REM: Relação estéril/minério.

3.1.3. Velocidade Média

Segundo Lages (2018), para o cálculo da velocidade média no percurso, precisa-se considerar a velocidade média do caminhão no trajeto, que pode variar de acordo com o tipo de material que ele carrega e se ele está carregado ou não. A Fórmula 3 indica como ela foi calculada.

$$V_m = \frac{2 * (DMT_m + DMTe)}{\frac{DMT_m}{V_c} + \frac{DMT_m}{V_v} + \frac{DMTe}{V_c} + \frac{DMTe}{V_v}} \quad (3)$$

Onde:

- DMTm: Distância média de transporte de minério;
- DMTe: Distância média de transporte de estéril;
- Vc: Velocidade carregado;
- Vv: Velocidade vazio;
- Vm: Velocidade média.

3.1.4. Disponibilidade Mecânica ou Física

Corresponde às horas em que o equipamento está disponível para uso. Segundo Moreira (2018), alguns fatores que podem reduzir a disponibilidade dos equipamentos são:

- Manutenção corretiva;
- Manutenção preventiva;
- Operação em vários turnos;
- Má organização da mina;
- Esperas.

A disponibilidade física foi calculada através da Fórmula 4.

$$DF = \frac{HT - (MP + MC + TP)}{HT} * 100\% \quad (4)$$

Onde:

- DF = disponibilidade física;
- HT = total de horas teóricas possíveis no período, como em um ano, por exemplo;
- MP = manutenção preventiva (inspeção, conservação e serviço programado para manter o equipamento operando em condições satisfatórias);
- MC = manutenção corretiva (serviço executado para corrigir deficiências que possam causar a sua paralisação);

- TP = tempo perdido com intervalos de tempo do operador (trocas de turnos, descanso, refeições, entre outros).

3.1.5. Utilização Global

O fator de utilização do equipamento pode ser entendido como a parcela de horas em que o equipamento está efetivamente em operação. Alguns dos fatores que podem impedir a utilização dos equipamentos são: condições climáticas, falta de operador, preparação de frente de lavras, tipo de desmonte de rocha entre outros. Ela pode ser calculada através da Fórmula 5 (Racia, 2016).

$$UG = \frac{HT}{HP - HM} * 100\% \quad (5)$$

Onde:

- UG = utilização global;
- HT = horas efetivamente trabalhadas;
- HP = horas calculadas por ano, levando em consideração os turnos previstos e a disponibilidade física;
- HM = horas em que o equipamento ficou em reparo na Oficina ou no Campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares.

3.1.6. Eficiência Operacional (EO)

A eficiência operacional pode ser entendida como o tempo em que de fato o equipamento está funcionando, e pode ser calculada pelo produto da disponibilidade física pela utilização, e foi calculada pela Fórmula 6.

$$EO = UG * DF \quad (6)$$

Onde:

- EO = eficiência operacional;
- UG = utilização global do equipamento;
- DF = disponibilidade física do equipamento.

3.1.7. Horas Trabalhadas

As horas efetivamente trabalhadas levam em consideração a duração dos turnos, quantos turnos têm por dia e quantos dias foram trabalhados por ano. As horas trabalhadas foram calculadas através da Fórmula 7.

$$\frac{\text{horas trabalhadas}}{\text{ano}} = \frac{\text{turnos}}{\text{dia}} * \frac{\text{horas}}{\text{turno}} * \frac{\text{dias trabalhados}}{\text{ano}} * EO \quad (7)$$

3.1.8. Movimentação Horária de Material (MHM)

A movimentação de material horária da mina é dada pela razão entre a massa total movimentada pelas horas trabalhadas no ano, e foi calculada através da Fórmula 8.

$$MHM = \frac{\text{Massa total movimentada por ano } (\frac{t}{\text{ano}})}{\text{horas trabalhadas por ano } (\frac{h}{\text{ano}})} \quad (8)$$

3.1.9. Tempo de Ciclo da Escavadeira (TcicloE)

Para uma escavadeira, o tempo de ciclo pode ser compreendido como o somatório dos seguintes intervalos: tempo de carregamento (Tc), tempo de rotação de caçamba carregada (Trc), tempo de descarga ou basculamento (Td) e tempo de rotação com caçamba descarregada (Trd). O ciclo só estará concluído quando a escavadeira estiver na posição para iniciar um novo carregamento (Racia, 2016). Pode ser calculada através da Fórmula 9.

$$T_{\text{cicloE}} = Tc + Trc + Td + Trd \quad (9)$$

3.1.10. Tempo de Ciclo dos Caminhões (T_{ciclo})

Segundo Racia (2016), o tempo de ciclo normalmente se dá pela soma dos tempos que o caminhão leva para: manobra e posicionar (T_{mp}), ser carregado pela escavadeira (T_c), transportar o material carregado (T_{tc}), manobrar e fazer o basculamento (T_{mb}), e se descolar vazio até o local de carregamento (T_{tv}). Portanto, pode-se calcular o tempo de ciclo pela Fórmula 10.

$$T_{ciclo} = T_{mp} + T_c + T_{tc} + T_{mb} + T_{tv} \quad (10)$$

Pode-se escrever a mesma equação utilizando-se a DMT e a velocidade média já descritas anteriormente através da Fórmula 11.

$$T_{ciclo} = \frac{DMT}{V_m} * 2 + T_{mp} + T_c + T_{mb} \quad (11)$$

3.1.11. Número de Caminhões

Antes de chegarmos ao número de caminhões ideal para a operação, precisa-se saber a quantidade de viagens que ele fará por hora e quantos ciclos ele fará por hora. Elas foram calculadas pelas Fórmulas 12, 13 e 14.

$$N^{\circ} \text{ de viagens por hora} = \frac{\text{Movimentação horária de material}}{\text{Capacidade do caminhão}} \quad (12)$$

$$\text{Ciclos por hora} = \frac{60 \text{ (min)}}{\text{Tempo de ciclo do caminhão (min)}} \quad (13)$$

E finalmente chega-se ao número de caminhões:

$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{N^{\circ} \text{ de viagens por hora}}{\text{Ciclos por hora}} \quad (14)$$

3.1.12. Tempo de Espera dos Caminhões

Segundo Racia (2016), o tempo de espera dos caminhões para serem carregados pelas escavadeiras pôde ser estimado a partir da Fórmula 15.

$$\text{Tempo de Espera} = (X1 - X2) * \frac{X3}{X4} * X5 \quad (15)$$

Em que:

- X1 = N° de caminhões calculados;
- X2 = N° inteiro menor de caminhões calculados;
- X3 = capacidade da caçamba do caminhão;
- X4 = capacidade da concha da escavadeira;
- X5 = tempo de ciclo da escavadeira.

3.2. Estudo de Caso

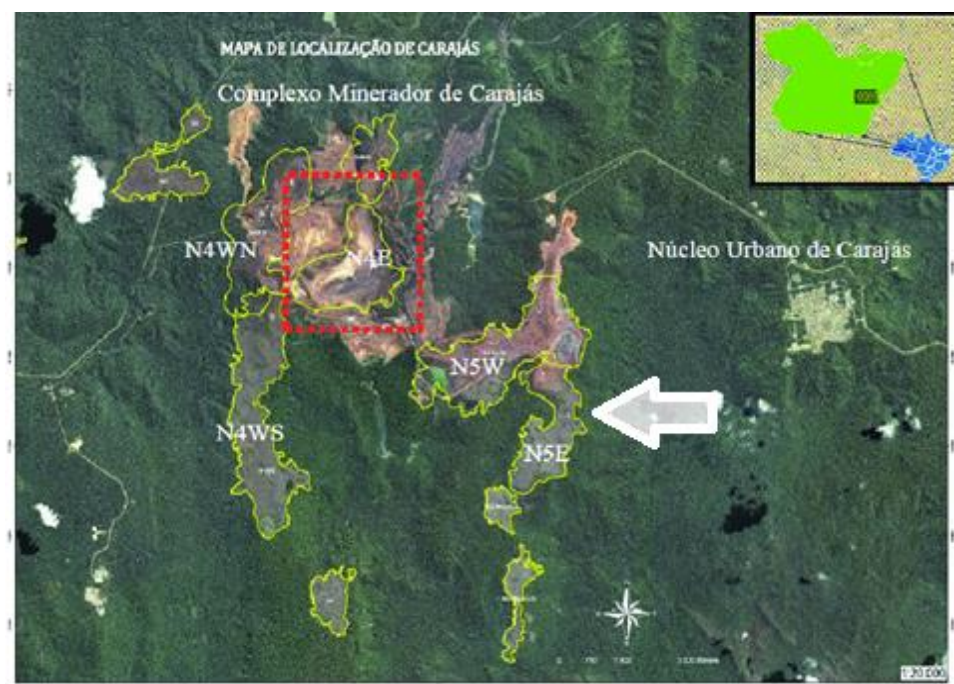
A operação mineira selecionada para realização do estudo é a de Carajás da Mineradora Vale, localizada na Serra dos Carajás, no município de Parauapebas-PA. O Complexo Mineiro de Carajás foi descoberto em 1967 e possui rochas com o maior teor de ferro do mundo (67%). Em 2020, o complexo de Carajás produziu 190 milhões de toneladas de minério de ferro.

O Complexo de Carajás opera simultaneamente cinco minas a céu aberto, conhecidas como N4E, N4W, N5E, N5W, N5 Sul, e é o maior produtor de minério de ferro em operação do planeta (VALE, 2016). O complexo engloba também uma unidade conhecida como S11D que opera sob o sistema *truckless*, isto é, sem uso de caminhões.

Na operação da Vale na Serra dos Carajás operam cerca de 210 caminhões 797F da Caterpillar. Em 2021, a empresa iniciou a operação com 6 caminhões autônomos 930E da *Komatsu* na cava N4E, e deve chegar a 10 unidades até o final do ano. No futuro, o número desses veículos deve chegar a 37 (IBRAM, 2021).

Este trabalho se propôs a analisar a cava N5E, que ainda não possui veículos autônomos em circulação, justamente para analisar o eventual ganho de produtividade nela. A cava pode ser localizada na Figura 5 onde a seta está apontada.

Figura 5 - Localização de cava N5E



Fonte: Adaptado de Sá et al. (2012)

O estudo analisou 3 modelos de caminhões fora-de-estrada, sendo um deles o convencional já existente na mina (CAT 797F), e os outros dois autônomos, sendo um, o mesmo modelo já em atuação na cava N4E (*Komatsu 930E*) e o outro o 797F com utilização do *Retrofit Kit*, representado por 797F* nas tabelas de resultados do próximo capítulo.

O dimensionamento proposto foi feito para os 3 modelos citados, e ao final se comparou quantas unidades seriam necessárias para atender às necessidades da cava N5E para a profundidade e distâncias atuais.

4. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os valores obtidos para cada KPI calculado, assim como o embasamento e premissas adotados para cada cálculo feito.

4.1. Dados de Produção

Segundo o Relatório de Produção da Vale (2020), a produção de minério de ferro no ano de 2020 na Serra Norte e na Serra Leste totalizou 109 milhões de toneladas. No entanto, as operações da Serra Leste nesse ano estavam paralisadas a maior parte do ano, portanto, considerou-se que os 109 milhões correspondem apenas à produção da Serra Norte. Para estimar a produção de cava estudada, dividiu-se o número da produção por 5, correspondente ao número das principais cavas em operação na Mina de Carajás. Feito isto, estimou-se que a cava N5E é responsável pela produção de aproximadamente 23 milhões de toneladas por ano. Em seguida, para estimar o ROM da cava, somou-se a esse número 11,5 milhões de toneladas de rejeito, correspondente a 50% do valor da produção de ferro no ano. Além disso, a relação estéril-minério (REM)³ das cavas varia de 0,25 a 1,8, e que tende a ser menor do que 1. A cava em questão, possui a melhor REM da mina, correspondente a 0,25, o que significa que um quarto das viagens que o caminhão faz é em direção à pilha de estéril, e três quartos em direção ao britador. Vale ressaltar também que, como as cavas são profundas e gigantes, é provável que esse valor se altere ao longo da exploração.

Tabela 1- Movimentação de minério da cava N5E

Movimentação Total da Mina (t/ano)	
REM	0,25
ROM	34.500.000
Estéril	8.625.000
Total Movimentado	43.125.000

Fonte: Elaboração própria

³ Os dados referentes às REM's das cavas em Carajás foram obtidas a partir do contato indireto com profissionais da mina e são referentes ao ano de 2016.

4.2.DMT Global

A cava N5E está configurada da seguinte forma:

Figura 6 - Configuração da cava N5E



Fonte: Google Earth

As distâncias das frentes de lavra até à britagem e pilha de estéril foram obtidas a partir do próprio *Google Earth*. A Figura 7 indica a distância entre a Frente de Lavra 1 (FL 1) e a pilha de estéril. As imagens das demais distâncias podem ser encontradas no Anexo A.

Figura 7 - Distância FL 1 - Pilha de estéril



Fonte: Google Earth

As distâncias médias de transporte de estéril e de minério foram calculadas a partir da média aritmética entre as duas distâncias. Em seguida, calculou-se a DMT global através da Fórmula 1. Os valores podem ser conferidos nas Tabela 2.

Tabela 2 - DMT Global

Distâncias Médias de Transporte de Estéril - DMT (m)	
FL 1 - Pilha	5.762
FL 2 - Pilha	4.142
Distância Média de Transporte de Estéril	4.952
Distâncias Médias de Transporte de Minério - DMT (m)	
FL 1 - Britagem	5.817
FL 2 - Britagem	4.179
Distância Média de Transporte de Minério	4.998
Distância Média de Transporte Global (m)	4.985

Fonte: elaboração própria

4.3. Regime de Trabalho

Na frota convencional, foi considerado que a cava opera em todos os dias do ano, com exceção de feriados nacionais, em que é dado folga para os condutores. Já para o regime de frota autônoma, onde não há necessidade de motoristas, considerou-se

que os caminhões funcionarão todos os dias do ano. Além disso, foram considerados três turnos por dia de duração oito horas cada. O regime de trabalho considerado para cada frota está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Regime de trabalho da cava.

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Turnos	3	3	3
Horas/turno	8	8	8
Dias no ano	365	365	365
Feriados Nacionais (não trabalha)	15	-	-
Dias Trabalhados	350	365	365
Horas Possíveis de Trabalho/Ano	8.400	8.760	8.760

Fonte: elaboração própria.

4.4. Velocidade Média dos Caminhões

Considerou-se que as velocidades médias dos caminhões operando na cava N5E na mina do complexo de Carajás são de 20 km/h quando carregados e 26 km/h quando vazios. Segundo o Notícias de Mineração (2018), a velocidade média da frota de caminhões em operação na mina da Vale em Brucutu-MG, antes da frota se tornar autônoma na mina em questão, era de 22,9 km/h. Após a introdução da frota autônoma, percebeu-se um aumento na velocidade média para 23,9 km/h, representando um aumento de 4,4%. Portanto, o ganho de velocidade da frota autônoma considerado neste trabalho é de mesma magnitude. A Tabela 4 indica como ficou a velocidade de cada frota.

Tabela 4 - Velocidade média dos caminhões

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Velocidade Carregado (km/h)	20,0	20,9	20,9
Velocidade Vazio (km/h)	26,0	27,1	27,1
Velocidade Média (km/h)	22,6	23,6	23,6

Fonte: Elaboração própria.

4.5. Disponibilidade Física dos Caminhões

Em Carajás, a manutenção preventiva nos equipamentos é feita por tempo de operação (Conexão Mineral, 2018). Além disso, a manutenção preventiva é feita de acordo com o indicado no manual de manutenção do fabricante⁴, e eles possuem histórico preciso de cada modelo operando na mina. O tempo de revisão de cada item pode variar de acordo com a sua importância e desgaste. Existem partes que devem ser revistas uma ou duas vezes por mês e outras com anos de operação.

Para efeitos práticos, este trabalho considerou a realização de manutenção preventiva a cada 250 horas de operação, e de duração de 4 horas cada, o que resultaria em maior tempo dos caminhões autônomos em manutenção preventiva, uma vez que o regime de horas possíveis de trabalho no ano é maior. Além disso, no cálculo da disponibilidade do equipamento, considerou-se que o caminhão perde em torno de duas horas e meia por dia de operação, com trocas de turno, descansos, refeições, abastecimentos, entre outros, o que resultou em 875 horas por ano. No entanto, como informado na revisão bibliográfica, a troca de turnos entre funcionários pode demorar até 30 minutos para ser feita, o que resulta em tempo de caminhão não transportando minério. No modelo autônomo, portanto, considerou-se que essa perda de 30 minutos a cada troca de turno não aconteceria, uma vez que os veículos não precisariam de troca de condutor, resultando em 365 horas perdidas por ano.

Ademais, Hustrulid *et al.* (2013) constataram que os custos com manutenção com implementação de frota autônoma diminuem em 14%; portanto, assumiu-se também que o tempo em manutenção corretiva diminuiria na mesma porcentagem. Foi considerado que um caminhão convencional fica em torno de 50 horas por ano em manutenção corretiva ou aguardando por peças. Os valores obtidos, considerando as informações descritas acima, podem ser conferidos na Tabela 5.

⁴ Essa informação foi obtida a partir do contato indireto com profissionais da Vale atuantes na mina.

Tabela 5 - Disponibilidade física dos caminhões

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Manutenção Preventiva/Ano (h)	134	140	140
Manutenção Corretiva/Ano (h)	50	43	43
Horas Possíveis de Trabalho/Ano	8.400	8.760	8.760
Tempo Perdido (h)	875	365	365
Disponibilidade Física	87,4%	93,7%	93,7%

Fonte: Elaboração própria

4.6. Utilização Global

Considerou-se uma utilização global dos equipamentos igual à da mina de ferro da Vale em Brucutu – MG, no valor de 87% para ambas as frotas.

4.7. Eficiência Operacional

Para uma primeira aproximação, foram calculados, a partir da Fórmula 6, os valores das eficiências operacionais de cada frota. Percebe-se que a eficiência da operação autônoma é superior ao da frota convencional, como indica a Tabela 6:

Tabela 6 - Eficiência operacional

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Disponibilidade Física	87,4%	93,7%	93,7%
Utilização Global	87,0%	87,0%	87,0%
Eficiência Operacional	76,0%	81,6%	81,6%

Fonte: Elaboração própria

4.8. Horas Efetivamente Trabalhadas no Ano

Com os valores da eficiência operacional e das horas possíveis de trabalho, foi possível calcular as horas efetivamente trabalhadas no ano a partir da Fórmula 7. Os valores obtidos para cada dimensionamento podem ser conferidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Movimentação horária de material dos caminhões

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Movimentação Anual (t)	43.125.000	43.125.000	43.125.000
Horas Trabalhadas/Ano (h)	6.386	7.144	7.144
Movimentação Horária de Material (t/h)	6.753	6.036	6.036

Fonte: Elaboração própria

4.9. Número de Passes da Escavadeira

Uma das escavadeiras utilizadas em Carajás é a Cat 7495, de capacidade de 109 toneladas métricas e de funcionamento à cabo. Tomou-se como premissa que este é o modelo que opera na cava N5E, e que existem duas unidades desse modelo em operação na cava, uma para cada frente de lavra.

De acordo com a Figura 7, extraída do catálogo da Caterpillar, ela é compatível com o modelo 797F e o modelo 794AC. Este último possui quase a mesma capacidade de carga do modelo autônomo a ser introduzido na mineração, o Komatsu 930E, que possui 292 t de capacidade contra 291 t do 794AC. Portanto, apesar da introdução a uma nova frota de caminhões com volume de caçamba diferentes, não foi necessário fazer a troca da escavadeira, o que permitiu uma análise focada na troca de frota. A troca do modelo de escavadeira poderia prejudicar o objetivo dessa análise, já que a carga máxima e tempo por passe da nova escavadeira calculada poderia ser diferente da que é atualmente. Apesar de a escavadeira ser a mesma, o número de passes para encher a caçamba é diferente de acordo com o modelo; 3 para o Komatsu 930E e 4 para o Caterpillar 797F.

Figura 8 - Tabela de compatibilidade Escavadeira - Caminhão da Caterpillar

	Payload	7295	7395	7495 HD	7495	7495 HF
MODEL	tonne (ton)	45 (50)	64 (70)	82 (90)	109* (120*)	109* (120*)
785D	136 (150)	3				
789D	181 (200)	4	3			
MT4400D AC	221 (244)		4	3		
793F	227 (250)		4	3		
794 AC	291 (320)			4	3	3
795F AC	313 (345)			4	3	3
797F	363 (400)				4	4

*Indicates maximum payload.

Fonte: Caterpillar performance handbook

4.10. Tempo de Ciclo da Escavadeira

Os tempos de carregamento, rotação de caçamba cheia ou vazia, assim como tempo de descarga foram calculados a partir da média aritmética dos valores obtidos com a contagem dos segundos de duração de cada etapa, a partir de vídeos reais da operação desse modelo de escavadeira em Carajás ou em outras minas. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 8:

Tabela 8 - Tempo de ciclo da escavadeira CAT 7495

	Caterpillar 7495
Carregamento (s)	13
Rotação de Caçamba Cheia (s)	13
Descarga (s)	3
Rotação de Caçamba Vazia (s)	11
Tempo de Ciclo (s)	40

Fonte: Elaboração própria

4.11. Tempo de Ciclo do Caminhão

Os tempos de carregamento, manobra e basculamento dos caminhões foram obtidos a partir da média dos valores alcançados com a contagem dos segundos de duração de cada etapa, a partir de vídeos reais da operação desses caminhões em Carajás ou em outras minas. Apesar de não terem sido obtidos a partir do manual do fabricante, os valores calculados para duração das manobras e basculamento se enquadram dentro ou próximos dos intervalos típicos de duração do manual do fabricante.

É importante perceber que o tempo de ciclo do modelo 930E da Komatsu, mesmo recebendo um passe a mais da escavadeira, é inferior ao do modelo convencional. As durações dos ciclos foram de cada modelo calculadas a partir da Fórmula 10 e podem ser observadas na Tabela 9:

Tabela 9 - Tempo de ciclo dos caminhões

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Número de Passes	4	3	4
Velocidade Média (m/s)	6,3	6,6	6,6
DMT Global (m)	4.989	4.989	4.989
Tempo de Manobrar e Posicionar (s)	50	50	50
Tempo de Carregmento (s)	160	120	160
Tempo de Manobrar e Bascular (s)	105	105	105
Tempo Transporte (s)	1.589	1.522	1.522
Tempo de Ciclo (s)	1.904	1.797	1.837
Tempo de Ciclo (min)	31,7	29,9	30,6

Fonte: Elaboração própria

4.12. Número de Veículos

Com o tempo de ciclo dos caminhões, foi possível estimar a quantidade de caminhões necessários na cava N5E. Os valores calculados podem ser verificados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Número de caminhões calculados

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Capacidade do Caminhão (t)	363	292	363
Movimentação Horária de Material (t/h)	6.753	6.036	6.036
Número de Viagens/Hora	18,6	20,7	16,6
Ciclo/Hora	1,9	2,0	2,0
Número de Caminhões	9,8	10,3	8,5

Fonte: Elaboração própria

É recomendado adotar sempre o número inteiro superior de caminhões calculados, uma vez que é preferível depender da adição de um caminhão a de uma escavadeira.

Para a cava N5E, portanto, o recomendado seria: 10 caminhões convencionais 797F, 11 caminhões 930E e 9 caminhões autônomos 797F.

4.12.1. Cenário Alternativo

Foi considerado para o dimensionamento feito que, no caso da adoção de veículos autônomos, a cava poderia operar de forma autônoma em dias em que antes não operava, como no caso de feriados nacionais. No entanto, caso o regime de operação da mina seja diferente do que foi adotado no dimensionamento, considerou-se também um cenário em que ela opere em todos os dias do ano, assim como os caminhões autônomos. Nesse novo cenário, o número de caminhões convencionais necessários diminui de 9,8 para 9,4. Esse valor e os demais KPI's podem ser conferidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Número de caminhões calculados no cenário alternativo

	Convencional Caterpillar 797F
Horas Possíveis de Trabalho/Ano	8760
Velocidade Média (Km/h)	22,6
Disponibilidade Física	87,4%
Eficiência Operacional	76,0%
Horas Trabalhadas/Ano	6662
Movimentação Horária de Material (t/h)	6473
Tempo de Ciclo (s)	1.904
Número de Caminhões	9,4

Fonte: Elaboração própria

Evidenciou-se neste estudo, no entanto, o regime de trabalho em que há dias nos quais não tenha operação, devido à falta de condutores, seja por greve ou por feriados legais ou por motorista adoecido. Nestas situações citadas, caso a frota autônoma fosse utilizada, o dia de trabalho não seria perdido.

4.13. Tempo de Espera

A partir do número de caminhões calculado foi possível estimar o tempo de espera em filas através da Fórmula 15. Vale ressaltar que o tempo de espera estimado ocorre se forem adotados o número inteiro superior de caminhões.

Tabela 12 - Tempo de espera em filas dos caminhões

	Convencional Caterpillar 797F	Autônomo Komatsu 930E	Autônomo Caterpillar 797F*
Número de Caminhões Calculado	9,8	10,3	8,5
Número Inteiro Menor de Caminhões Calculado	9	10	8
Capacidade do Caminhão (m³)	240	211	240
Capacidade da Escavadeira (m³)	63	63	63
Tempo de Ciclo Escavadeira (min)	0,7	0,7	0,7
Tempo Estimado de Espera (min)	2,1	0,7	1,2
Tempo Estimado de Espera Cenário Alternativo (min)	1,7	1,0	1,9

Fonte: Elaboração própria

5. Discussão de Resultados

Os resultados mostraram que, ao se comparar os números mínimos de caminhões necessários, a versão 797F *retrofit* da Caterpillar foi a mais vantajosa. O cálculo indicou que 8,5 seriam suficientes para atender à demanda da cava, enquanto que para a versão convencional do mesmo modelo indicou 9,8. Já em comparação com o mesmo modelo que foi implantando na cava N4E da mina de Carajás, o *Komatsu* 930E, o dimensionamento indicou que haveria necessidade de se ter um caminhão a mais. Isto se deve pelo fato deste último ter uma capacidade de carga de transporte (292 t) significativamente inferior ao modelo convencional (363 t), o que implica em uma maior necessidade de viagens por hora. Vale ressaltar também que o tempo estimado em filas na frota convencional é superior frente à autônoma.

Apesar dos resultados apontarem para uma maior eficiência do modelo adaptado (797F*) para atuar de forma autônoma, este trabalho não teve acesso às informações suficientes para afirmar o motivo da mineradora Vale não ter optado por essa opção de caminhão na cava N4E. É provável que as necessidades e características dessa cava sejam diferentes da cava N5E; por isso optaram por esse outro modelo.

6. Conclusão

Nesse trabalho, foi possível apresentar uma metodologia preliminar de avaliação dos impactos no dimensionamento de uma mineração, com a adoção de frota autônoma pela mesma. Ficou demonstrado como a autonomia de veículos pode tornar a exploração mineral, além de mais segura e menos poluente, mais eficiente. Foi possível observar que, em caminhões de mesma capacidade de transporte, a frota autônoma necessitou de um veículo a menos do que a frota convencional, para o transporte de uma mesma quantidade de minério no ano. Consequentemente, haveria menos emissão de gases poluentes decorrente na atmosfera

O dimensionamento proposto não teve intenção de obter resultados concordantes ao da frota atual da mina N5E, uma vez que não foram levadas em consideração todas as variáveis necessárias para um dimensionamento completo, e nem restrições físicas e/ou econômicas da mina. Por fim, conclui-se que este trabalho atendeu seus objetivos propostos e espera-se que ele possa servir como ferramenta de auxílio na tomada de decisão em dimensionamentos com caminhões autônomos de projetos futuros, bem como em futuros estudos sobre o assunto, como sugerido no item a seguir.

6.1. Recomendação para Trabalhos Futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar de um estudo comparativo dos custos operacionais e de investimento de uma frota de caminhões autônomos frente a uma frota convencional;
- Dar continuidade ao dimensionamento proposto valendo-se de dados mais precisos da cava e de outras variáveis não consideradas neste trabalho. Recomenda-se ainda a utilização de simulação dinâmica para identificar possíveis gargalos na operação, a fim de tornar o estudo mais confiável.

Revisão Bibliográfica

Australia dominates global autonomous haul trucks use with numbers set to triple. MINING TECHNOLOGY. 2020. Disponível em: <<https://www.mining-technology.com/comment/australia-autonomous-haul-trucks-use/>>. Acesso em 10 de outubro de 2021.

BARBOSA, Rodrigo Correia. **Uso de simulação de eventos discretos para avaliação de desempenho de caminhões autônomos em mineração**. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2020. Mestrado.

CATERPILLAR. A World Leader in Autonomous Mining. 2020. Disponível em <<https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews/customer-dealer-product/a-world-leader-in-autonomous-mining.html>>. Acesso em 22 de agosto de 2021.

CATERPILLAR. Caminhões de Mineração. Caterpillar. 2021. Disponível em <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18092621.html>. Acesso em 12 setembro de 2021.

CATERPILLAR. Caterpillar To Develop Autonomous Mining Truck Technology for Additional Models and Brands. Caterpillar, 2017. Disponível em: <https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/caterpillar-to-develop-autonomous-mining-truck-technology-for-additional-models-and-brands.html>. Acesso em 21 de novembro de 2021.

CATERPILLAR, **Performance Handbook**. 48ª edição, Peoria Illinois, USA. 2018.

CHAOWASAKOO, P. *et al.* **Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching**. 2nd ed. Espoo: Elsevier, 2017. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268617300538#b0035>>. Acesso em 21 de novembro de 2021.

CLEUDISON. Mina de ferro no Pará mais um dia de trabalho. [2020?]. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=JdKKsshAfEE>>. Acesso em 03 de outubro de 2021.

CLEUDISON. Escavadeira gigante mina de ferro de Carajás Pará Brasil. [2020?]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vPugkm1ywHw&t=23s>>. Acesso em 03 de outubro de 2021.

CONEXÃO MINERAL. O desafio de manter mais de 500 equipamentos operando em Carajás. 2018. Disponível em: <<https://www.conexaomineral.com.br/noticia/961/o-desafio-de-manter-mais-de-500-equipamentos-operando-em-carajas.html>>. Acesso em 03 de outubro de 2021.

IBRAM. Com foco em segurança e pessoas, Vale inicia operação de caminhões autônomos em seu maior complexo, no Pará. IBRAM. 2021. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/com-foco-em-seguranca-e-pessoas-vale-inicia-operacao-de-caminhoes-autonomos-em-seu-maior-complexo-no-para/>>. Acesso em 10 de outubro de 2021.

GABER, T. *et al.* **Autonomous Haulage Systems in the Mining Industry: Cybersecurity, Communication and Safety Issues and Challenges**. V. 10, 10th ed. MDPI: Journal, 2021.

GOOGLE EARTH. Mapas. Mina de Carajás. Disponível em <<http://maps.google.com.br>>. Acesso em 10 de novembro de 2021.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. *et al.* **Open Pit Mine Planning & Design 3rd Edition**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

KOMATSU. Komatsu celebrates 10th anniversary of commercial deployment of Autonomous Haulage System (AHS):100-AHS-trucks-in-operation milestone inspires plans to accelerate pace of mining automation. 2018. Disponível em <<https://www.komatsu.jp/en/newsroom/2018/20180129>>. Acesso em 14 de setembro de 2021.

KOMATSU. What is a FrontRunner AHS truck, and how do they operate? 2021. Disponível em: <<https://www.komatsu.com.au/innovation/autonomous-haulage-system/what-is-a-frontrunner-ahs-truck,-and-how-do-they-o>>. Acesso em 25 de agosto de 2021.

KOMATSU 930E-2.JPG. WIKIPEDIA. 2021. Disponível em <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/KOMATSU_930E-2.JPG>. Acesso em: 12 setembro de 2021.

LAGES, Augusto Ribeiro. **Estudo preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. Monografia.

MAIA, Carlos. Ciclo de carregamento e transporte de uma mina a céu aberto. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Ciclo-de-carregamento-e-transporte-de-uma-mina-a-ceu-aberto_fig1_344381628. Acesso em: 1 de outubro de 2021.

MEDEIROS, Valdemar. Vale investe R\$ 200 milhões em frota de dez caminhões autônomos para uso em Carajás (PA), a maior mina a céu aberto do mundo. Click Petróleo e Gás. 2021. Disponível em <<https://clickpetroleoegas.com.br/vale-investe-r-200-milhoes-em-frota-de-dez-caminhoes-autonomos-para-uso-em-carajas-pa-a-maior-mina-a-ceu-aberto-do-mundo/>>. Acesso em 06 de setembro de 2021.

MINING NEWSWIRE. Top Manufacturers of Autonomous Haulage Systems for the Mining Industry. Mining Newswire. 2021. Disponível em <<https://www.miningnewswire.com/top-manufacturers-of-autonomous-haulage-systems-for-the-mining-industry/>>. Acesso em 10 de setembro de 2021.

MOREIRA, Felipe Nako. **Dimensionamento de frota de transporte e carregamento para as operações unitárias de uma mina em expansão**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Monografia.

NOTÍCIAS DE MINERAÇÃO. Vale opera primeira mina do Brasil com caminhões autônomos. 2018. Disponível em:

<<https://www.noticiasdemineracao.com/automa%C3%A7%C3%A3o/news/1346451/vale-come%C3%A7a-operar-primeira-mina-do-brasil-com-caminh%C3%B5es-aut%C3%B4nomos>>. Acesso em 3 de novembro de 2021.

RACIA, Ismael Momade. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Mestrado.

ROBINSON, Dan. How autonomous technology could make mining safer, cheaper and more valuable. NS Energy, 2019 Disponível em <<https://www.nsenergybusiness.com/features/autonomous-mining-technology-zyfra/>>. Acesso em 18 de agosto de 2021.

SÁ, G.; FIGUEIREDO, R.; MAGALHÃES, F. **Ruptura do talude sudeste da mina de N4E – um estudo de caso, Carajás, estado do Pará**. Revista ABGE. v 2, nº 2, 2012. p. 116.

UNITED STATE DEPARTMENT OF LABOR. Safety Topic: Seat Belt Usage | Mine Safety and Health Administration (MSHA). United State Department of Labor. Disponível em <<https://www.msha.gov/training-education-safety-and-health-materials/safety-topics-seat-belt-usage>>. Acesso em: 20 de agosto de 2021.

MINING TECHNOLOGY. US mining industry accidents and fatalities in 2018 analysed. Mining Technology. 2019. Disponível em <<https://www.mining-technology.com/mining-safety/us-mining-accidents-fatalities-2018>>. Acesso em 20 de agosto de 2021.

APÊNDICE A – Distâncias Percorridas Pelos Caminhões

A.1. Distância Frente de Lavra 1 – Britagem.

Figura 9 - Distância FL 1 - Britagem



Fonte: Google Earth

A.2. Distância Frente de Lavra 2 – Pilha de Estéril.

Figura 10 - Distância FL 1 - Britagem



Fonte: Google Earth

A.3. Distância Frente de Lavra 2 – Pilha de Estéril.

Figura 11 - Distância FL 1 - Britagem



Fonte: Google Earth