

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO
NA EQUAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE CAMINHÕES BASCULANTES:
UM ESTUDO DE CASO**

BRUNO CESAR PEREIRA

BELO HORIZONTE – MG
JULHO DE 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO
NA EQUAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE CAMINHÕES BASCULANTES:
UM ESTUDO DE CASO**

Autor: **BRUNO CESAR PEREIRA**

Orientadora: **PROFA. DRA. VIVIANE DA SILVA BORGES BARBOSA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Minas Gerais como parte obrigatória para obtenção do título de especialista.

BELO HORIZONTE – MG

JULHO DE 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

UFMG

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO BRUNO CÉSAR PEREIRA

Realizou-se, no dia 26 de agosto de 2022, às 09:00 horas, na Plataforma TEAMS, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de Monografia, intitulada "ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO NA EQUAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE CAMINHÕES BASCULANTES: UM ESTUDO DE CASO", apresentado por BRUNO CÉSAR PEREIRA, número de registro 2020719996, graduado no curso de ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Profa. Viviane da Silva Borges Barbosa - Orientadora, Professor Pedro Henrique Alves Campos (Universidade Federal de Minas Gerais), Vilson Carlesso dos Reis (Gerdau Aço Minas).

A Comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovada

Reprovada

Nota: _____

92,00 (noventa e dois pontos)

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 26 de agosto de 2022.

Viviane da Silva Borges Barbosa
Professora do Departamento de
Engenharia de Minas/UFMG

Profa. Viviane da Silva Borges Barbosa (Doutora)

Prof. Pedro Henrique Alves Campos (Mestre)

Vilson Carlesso dos Reis (Mestre)

Risia Magriotis Papini
Coordenadora do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

Aurea Domingos
Secretaria do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

RESUMO

Esta pesquisa foi elaborada com o intuito de conhecer a sensibilidade das variáveis que compõe o KPI de produtividade horária de uma frota de transporte em uma indústria de mineração. As operações unitárias de lavra da indústria do minério de ferro foram descritas, assim como os KPI's que compõe a equação da produtividade horária: a distância média de transporte, a velocidade média e os tempos fixos. A análise foi elaborada através de uma coleta documental no setor de operação de mina para o estudo de caso, onde foi possível definir o domínio de oscilação dos indicadores listados. Os dados utilizados compreenderam a movimentação de uma frota de caminhões de 100 toneladas, no período de abril de 2021 a dezembro de 2021. Após a análise dos dados foi possível identificar a sensibilidade de cada variável que compõe o KPI de produtividade horária da frota de transporte. Pôde-se concluir que apesar das variações na distância média de transporte determinarem maiores ganhos na produtividade, os esforços devem ser concentrados para ganhos na velocidade média, uma vez que o KPI distância média de transporte é rigidamente determinado pelos planos de lavra.

Palavras-chave: KPIs; produtividade horária; DMT; velocidade média; tempos fixos.

ABSTRACT

This research was designed with the aim of knowing the sensitivity of the variables that make up the hourly productivity indicator of a transport fleet in a mining industry. The unit operations of mining of the iron ore industry were described, as well as the indicators that make up the equation of hourly productivity: the average transport distance, the average speed and the fixed times. The analysis was carried out through a documentary collection in the mine operation sector for the case study, where it was possible to define the oscillation domain of the listed indicators. The data used comprised the movement of a fleet of 100-ton trucks, from April 2021 to December 2021. After analyzing the data, it was possible to identify the sensitivity of each variable that makes up the hourly productivity indicator of the transport fleet. It can be concluded that despite the variations in the average transport distance determine greater gains in productivity, efforts must be concentrated for gains in average speed, since the average transport distance indicator is rigidly determined by the mining plans.

Key-words: KPI's, hourly productivity transport, DMT and fleet sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Broca tricônica	14
Figura 2: Componentes da perfuração de rocha	14
Figura 3: Desmonte de rochas com explosivos	15
Figura 4: Carregadeira de pneus efetuando carregamento.	16
Figura 5: Ciclo de caminhões	21
Figura 6: Análise de sensibilidade dos indicadores DMT, velocidade média e tempos fixos: (a) valores de PH em módulo; (b) variação percentual em torno da média 162,78 t/h.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – KPIs do ano de 2021.....	24
Tabela 2 – Resumo dos KPIs.....	24
Tabela 3 – Resultado da PH em função da variação nos indicadores tempos fixos, velocidade e DMT.	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Objetivo geral	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
1.3 Justificativa.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Extração de minério de ferro	12
2.2 Operações unitárias.....	13
2.2.1 Perfuração e Desmonte.....	13
2.2.2 Carregamento e Transporte	15
2.2.3 Principais indicadores de desempenho das frotas de carga e transporte	17
2.2.3.1 Disponibilidade Física (DF)	18
2.2.3.2 Utilização Física (UF)	18
2.2.3.3 Produtividade horária de transporte (PH).....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5. CONCLUSÃO.....	30
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

Visando alavancar o aumento da produtividade e a redução dos gastos de produção, as empresas têm se empenhado para buscar novas tecnologias para implantarem em seus processos. Atualmente, existem diversos recursos voltados para o auxílio na tomada de decisão. Como exemplo desses recursos, pode-se citar os softwares e modelos matemáticos que auxiliam no dimensionamento dos equipamentos de uma frota que irá operar em uma indústria de mineração.

O processo para quantificação e seleção do porte dos equipamentos de escavação, carga e transporte dentro da indústria de mineração é denominado dimensionamento de equipamentos. Essa etapa visa o atendimento das diretrizes conforme o plano de lavra, buscando retornar valor econômico para empresa e levando em consideração as limitações do local a ser lavrado. Em virtude dessas limitações, o dimensionamento dos equipamentos deve ser revisado periodicamente. Indicadores de desempenho como a distância média de transporte, a velocidade média, os tempos de carregamento e basculamento, dentre outros, devem ser continuamente monitorados. O dimensionamento dos equipamentos considera a movimentação necessária para o transporte de estéril e minério, levando em consideração porte e capacidade produtiva dos equipamentos, conforme produção planejada. Geralmente, após a definição quanto ao tipo e porte dos equipamentos a serem utilizados, determina-se o custo necessário, elaboram-se os planos de produção e detalham-se as atividades a serem executadas.

É possível encontrar diversos empreendimentos de mineração cujo dimensionamento de equipamentos não é elaborado de acordo com as restrições operacionais ou com o porte dos equipamentos. Um dimensionamento inadequado pode levar à uma quantificação maior ou menor dos equipamentos necessários, impactando na produtividade horária da operação e, conseqüentemente, resultando em custos maiores por tonelada movimentada. Um dos indicadores-chave considerados para o dimensionamento de frota é a produtividade horária de caminhões basculantes. Logo, é importante entender como a produtividade é calculada e quais variáveis compõe o seu cálculo.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é apresentar conceitos importantes relacionados às operações de lavra a céu aberto e demonstrar como indicadores de desempenho específicos podem impactar no indicador de produtividade dos caminhões.

1.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral, pretende-se:

- ✓ Descrever as operações unitárias de lavra, com foco na extração a céu aberto, realizada por caminhões e escavadeiras;
- ✓ Discorrer sobre o indicador Distância Média de Transporte (DMT) e seus impactos no cálculo da produtividade;
- ✓ Discorrer sobre o indicador Velocidade Média de Transporte e seus impactos no cálculo da produtividade;
- ✓ Discorrer sobre o indicador Tempos Fixos de uma frota de transporte e seus impactos no cálculo da produtividade.

1.3 Justificativa

Atualmente, com a acentuada queda de preços das commodities e pronunciamento de alguns especialistas em economia sobre o fim do superciclo do minério de ferro, empresas do ramo de mineração se veem obrigadas a reduzirem seus custos operacionais para se manterem competitivas frente ao acirrado mercado global. De acordo com Lisbôa (2019, p. 12):

Na mineração, assim como nas mais diversas atividades industriais, o custo operacional final está associado ao conjunto de atividades necessárias para o desenvolvimento do produto que será vendido. Os custos, em sua grande maioria, são gerados pela execução dos processos dentro do empreendimento, e suas vantagens surgem na execução desses processos de forma mais eficiente, seguindo os padrões estatísticos internacionais.

No cenário de declive de commodities, as operações unitárias que compõem a lavra de minas (perfuração, desmonte, carregamento, transporte e infraestrutura) são ligeiramente desafiadas a operarem otimizando ao máximo os recursos para que seja possível uma extração de minério pautada na segurança, consciência ambiental e, não menos importante, viabilidade econômica. Tendo em vista essa competitividade, é necessário sempre buscar ganhos de produtividade. E para isso, novas tecnologias e equipamentos, melhoria nos processos, treinamento e engajamento da equipe são alguns dos fatores que podem contribuir para que a empresa continue gerando retorno financeiro para seus acionistas.

Segundo Tangen (2003), as medições de desempenho são frequentemente utilizadas para melhorar a competitividade e a lucratividade dos sistemas de manufatura e assegurar aos gestores uma perspectiva de longo prazo, permitindo alocar os recursos de maneira mais eficiente. Os Indicadores-Chave de Desempenho, mais conhecidos pela denominação em inglês *Key Performance Indicators* (KPIs), são essenciais para quantificar e avaliar o desempenho dos equipamentos de carregamento e transporte. KPIs como a Disponibilidade Física (DF), a Utilização Física (UF) e a Produtividade Horária (PH) são recorrentemente monitorados nas minas a céu aberto. Através da análise desses KPIs, torna-se possível mapear pontos de melhorias ou mudanças operacionais, em busca de uma operação mais eficiente e produtiva.

Conforme abordado por Lisbôa (2019) e Lages *et al.* (2020), em uma análise dos custos das operações unitárias que compõem a extração de minério, o transporte corresponde em até 60% dos custos associados à operação, portanto, ganhos relacionados a produtividade horária de transporte tornam-se favoráveis ao aumento de produção com menor custo.

O trabalho que será desenvolvido permitirá conhecer a influência de variáveis que compõem a produtividade horária, para que o foco de melhorias contínuas e redução de desperdícios sejam direcionados àquelas com maiores ganhos em produção com menor custo associado, tomando como base a frota de transporte de caminhões fora de estrada de capacidade nominal de 100 toneladas (modelo CAT 777), considerando uma mina de extração de minério de ferro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está subdividida de maneira a dar os subsídios teóricos para o entendimento da fórmula de produtividade dos caminhões basculantes, permitindo analisar as variantes que envolvem o problema. Para este estudo, objetiva-se analisar a DMT, velocidade média, tempos fixos e carga média, sendo essas as principais variáveis que compõem a produtividade horária de transporte.

2.1 Extração de minério de ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, “podendo ser encontrado em grandes jazidas na forma de minerais com teores extremamente variáveis e até mesmo como elemento traço” (DUARTE, p. 1146, 2019). Entre todos os metais, o ferro é o que possui maior escala de produção, ele é encontrado em minerais como: hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), siderita (FeCO_3), e goethita (FeO/OH). Segundo Jesus (2009), as Formações Ferríferas Bandadas (FFB), denominadas itabiritos, constituem os maiores depósitos brasileiros de minério de ferro.

O minério de ferro explotado no Quadrilátero Ferrífero, região onde se localiza a mina estudada, é dividido em dois grupos principais: o minério itabirítico e o minério hematítico, que por sua vez, são classificados conforme sua mineralogia e texturas.

O minério itabirítico, segundo Carvalho *et al.* (2014), é constituído por camadas alternadas de ferro e sílica, com teores que variam de 20% a 55% de ferro total. Ainda, sua textura pode ser dividida em compacta e friável, a depender da intensidade de processos intempéricos sofridos pela rocha. Os corpos de hematita são homogêneos e possuem alto teor de ferro, superiores a 64%, e são encontrados sob a forma de lentes mergulhadas na rocha itabirítica. Eles podem apresentar características texturais compactas, friáveis e de granulometria fina sem estrutura interna.

A extração desse minério de ferro é realizada a partir do sequenciamento das atividades de lavra, conhecidas como operações unitárias. No caso das minas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, são comuns as seguintes operações unitárias: perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

2.2 Operações unitárias

As operações unitárias de lavra ocorrem de forma cíclica, até a exaustão do minério em determinada frente de trabalho. O objetivo dessas operações é encaminhar o minério-bruto para as instalações de tratamento de minério.

2.2.1 Perfuração e Desmonte

Hermann (1968) afirma que o processo de perfuração visa perfurar o maciço rochoso de um determinado local com profundidade e espaçamento entre furos que futuramente serão carregados com material explosivo. Durante esse processo, são necessárias máquinas perfuratrizes, movidas por motor a combustão interna ou motores elétricos. As perfuratrizes utilizam hastes e bits para executar a penetração no maciço, para produzir os furos de perfuração. Utilizam-se compressores de ar para a retirada do material durante o processo (RICARDO; CATALANI, 2007).

Silva (2011) afirma que existem três principais métodos de perfuração para o desmonte de rochas com explosivos aplicados na mineração: (i) a perfuração rotativa com brocas tricônicas (*holler bit*), (ii) a perfuração roto-percussiva utilizando o martelo de superfície (*top hammer*) e (iii) o método roto-percussivo, utilizando o martelo no fundo do furo (*down the hole*). A Figura 1 ilustra a broca tricônica utilizada na perfuração rotativa. A Figura 2 ilustra os principais componentes na perfuração de rochas.



Figura 1: Broca tricônica
Fonte: Atlas Copco, 2015, s. p.

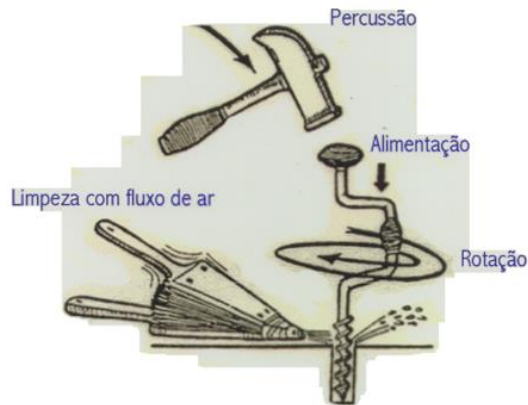


Figura 2: Componentes da perfuração de rocha
Fonte: Silva (2011).

Após a conclusão da etapa de perfuração do local definido, inicia-se a etapa do desmonte de rochas. Nessa etapa, Ricardo e Catalani (2007) afirmam que os furos previamente executados no processo de perfuração serão carregados com materiais explosivos para a detonação da área especificada no plano de fogo. A detonação é utilizada para fragmentar e desagregar o material, gerando uma porção mais fina do mesmo.

Silva (2011) define o desmonte a explosivos como o processo que visa a fragmentação de parte do maciço rochoso para produzir blocos de rochas menores e individualizar o corpo mineral da sua

ocorrência *in situ*. A Figura 3 ilustra o momento em que está ocorrendo o desmonte de rochas com o auxílio dos explosivos.



Figura 3: Desmonte de rochas com explosivos
Fonte: Vale, 2015, s. p.

Geraldi (2011) ressalta que a energia gerada nas detonações deve ser utilizada na fragmentação da rocha ou minério segundo o plano de fogo, de modo a evitar as perdas e abalos resultantes de sua dissipação pelo maciço ou vizinhança.

Tomando por base as afirmações de Ricardo e Catalani (2007), Silva (2011) e Geraldi (2011), a detonação é de extrema importância para a remoção do material da mina, sendo que quanto mais eficaz a detonação, mais eficiente será o processo de remoção do material detonado.

2.2.2 Carregamento e Transporte

Uma vez concluída a etapa do desmonte com explosivos, equipamentos de carregamento, escavação e transporte realizam os trabalhos de remoção do material. No caso de falta de material detonado na mina, os equipamentos ficam ociosos, gerando prejuízos para a empresa de mineração (EPAMINONDAS; SIQUEIRA, 2010).

Ricardo e Catalani (2007) afirmam que durante a remoção de materiais, são utilizados equipamentos de escavação e carregamento. Dentre esses equipamentos, pode-se citar escavadeiras, pás carregadeiras, retroescavadeiras, entre outros, movidos por motores elétricos ou por motores de combustão interna.

As carregadeiras ou pás-carregadeiras são montadas sobre esteiras ou rodas com pneus. Geralmente, a caçamba é instalada na parte dianteira e ela varia de posição entre a escavação até a descarga. No carregamento, esses equipamentos se deslocam, movimentando-se entre o talude e o modal de transporte, sendo que o ciclo das carregadeiras ou pás-carregadeiras compreende dois movimentos de ré e dois à frente (RICARDO; CATALANI, 2007). A Figura 4 ilustra uma carregadeira de pneus efetuando o carregamento do material desmontado no caminhão.



Figura 4: Carregadeira de pneus efetuando carregamento.
Fonte: Vale, 2015, s. p.

Diferente das carregadeiras, as escavadeiras são definidas por Ricardo e Catalani (2007) como equipamentos estacionários, ou seja, de locomoção lenta e dificultosa. Sua estrutura se destina apenas a lhe permitir o deslocamento sem, contudo, participar do ciclo de trabalho. As escavadeiras podem ser montadas sobre esteiras, rodas e trilhos, sendo o equipamento de esteira mais utilizado no ambiente da mineração. As escavadeiras se dividem em diferentes grupos conforme o seu porte e a finalidade em que são empregadas. As escavadeiras têm por objetivo efetuar a escavação do

material que fora desmontado com explosivos e efetuar o carregamento dos caminhões que posteriormente o movimentará até a planta de tratamento de minério.

Após a etapa de carregamento, o minério então é transportado da mina para a unidade de tratamento de minério através de caminhões fora de estrada ou caminhões rodoviários. No caso de caminhões fora de estrada, Ricardo e Catalani (2007) relatam que são caminhões com capacidade de transporte acima de 90 toneladas de material. Os caminhões devem entregar uma quantidade de material para a usina de forma a mantê-la em plena operação, independentemente das adversidades comuns em ambientes de lavra. Por isso, pilhas-pulmão são estruturas comuns na interface entre mina e usina.

Em um ambiente de mineração, devido a heterogeneidade das frentes de lavra, opta-se pelo uso dos caminhões, devido ao fato de serem equipamentos de transporte rápidos frente a outras alternativas, de baixo custo e que possuem maior capacidade produtiva (RICARDO; CATALANI, 2007).

Uma vez que os caminhões são carregados, eles são liberados para o transporte do material desmontado até a planta de tratamento de minério ou pilha-pulmão. O transporte do material é a última fase do processo de extração do minério.

2.2.3 Principais indicadores de desempenho das frotas de carga e transporte

O desempenho das operações unitárias é mensurado através de indicadores de desempenho; o monitoramento de indicadores permite quantificar e avaliar as atividades de lavra. Para os equipamentos de carga e transporte, os mais utilizados entre empresas de minério de ferro são: disponibilidade física (DF), utilização física (UF) e produtividade horária (PH).

2.2.3.1 Disponibilidade Física (DF)

A Disponibilidade Física (DF) é um indicador de desempenho relacionado às horas disponíveis para a execução de atividades fins do equipamento, descontadas as horas necessárias para manutenção. A DF é a razão entre as horas que o equipamento está disponível para sua utilização e as horas totais, conforme mostra a Equação 1. As horas totais contabilizam as horas de turno de operação da mina.

$$DF = \frac{HC - (MP + MC)}{HC} \times 100\% \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

- HC = Horas calendário, que são horas disponíveis num determinado período de trabalho, como por exemplo, um ano;
- MP = Tempo de manutenção preventiva, que corresponde a todo o período de serviços planejados para inspeção e conservação do bom funcionamento do equipamento;
- MC = Tempo de manutenção corretiva, equivalente ao período de serviços não planejados, executados para corrigir problemas e evitar maiores perdas.

Segundo Racia (2016), os principais fatores que influenciam na DF dos equipamentos são: condições de trabalho adversas, manutenções corretivas ou preventivas inadequadas e má condição de infraestrutura de acessos ou más condições nas frentes de lavra.

2.2.3.2 Utilização Física (UF)

A Utilização Física (UF) de um equipamento é a razão entre as horas efetivamente trabalhadas em relação à sua disponibilidade, isto é, corresponde ao tempo em que o equipamento está de fato realizando sua atividade fim. A Equação 2 expressa a Utilização Física.

$$UF = \frac{HT}{(HP - HM)} \times 100\% \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- HT = Horas efetivamente trabalhadas;
- HP = Horas planejadas para o trabalho;
- HM = Horas destinadas à manutenção, seja preventiva (MP) ou corretiva (MC).

Segundo Racia (2016), a UF pode ser impactada pelo número de equipamentos, pelo porte das operações da mina, inexperiência do operador, paralisação de demais equipamentos, falta de operador, condições climáticas, características do desmonte e infraestrutura das frentes de lavra.

2.2.3.3 *Produtividade horária de transporte (PH)*

A produtividade horária de transporte (PH) é o quociente entre as toneladas transportadas por hora trabalhada efetivamente, ou seja, é o indicador que mede a eficiência da utilização das horas trabalhadas, conforme mostra a Equação 3.

$$PH = \frac{\text{Carga média}}{\text{Tempo de Ciclo}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Das variáveis que compõem a PH, a carga média é uma delas e, portanto, é impactada pelo tipo de material transportado com sua respectiva densidade e pela confiabilidade da balança incorporada no equipamento¹. No entanto, muito embora a sobrecarga possa parecer algo atraente do ponto de vista de maior quantidade de massa movimentada em menor tempo, ela compromete os componentes do equipamento, o que pode gerar muitos custos associados à manutenção,

¹ Caminhões fora de estrada, geralmente, possuem balanças incorporadas.

englobando gastos relacionados a material e mão de obra, além de todos os reflexos na operação decorrentes da baixa disponibilidade física do equipamento e, conseqüentemente, redução da sua vida útil.

Outro ponto não menos importante e relacionado a carga é o posicionamento correto da mesma sobre a caçamba. Em um caminhão fora de estrada, o ideal é que o material esteja devidamente centralizado, isto é, não deve estar muito posicionado para frente, para trás, para uma das laterais e tampouco sobre o popular “chapéu” do caminhão. Sendo assim, a carga situada corretamente na dentro da caçamba garante segurança operacional e longevidade nas manutenções.

Outra variável da PH é o tempo de ciclo dos equipamentos de transporte, que é calculado pela soma dos tempos fixos e variáveis, conforme expresso na Equação 4.

$$\textit{Tempo de ciclo} = \sum \textit{Tempos fixos} + \sum \textit{Tempos variáveis} \quad \text{Eq. (4)}$$

O tempo de ciclo é monitorado pelo despacho de mina desde o início de cada turno de trabalho, para direcionar os equipamentos às frentes de operação, levando em consideração o dimensionamento elaborado pelo planejamento de mina e diretrizes alinhadas com a operação de mina, decorrentes das necessidades operacionais, em busca de maior produtividade.

Considerando uma situação em que o caminhão esteja vazio, o ciclo inicia-se com a orientação do despacho para a frente de carregamento, em seguida o equipamento desloca-se, sendo este o tempo de deslocamento vazio (tempo variável). Ao chegar no ponto de carregamento, o equipamento pode entrar em fila (tempo fixo), em uma situação em que haja outro equipamento de transporte carregando e assim o tempo será contabilizado, ou pode ir diretamente carregar (tempo fixo), nesse caso será medido o tempo de manobra (tempo fixo), do qual compreende o tempo que o operador posiciona o caminhão no melhor ponto para que o equipamento de carga também possa operar com a maior produtividade. Em seguida o tempo de carregamento inicia-se.

Vale ressaltar que o tempo de carregamento pode variar de acordo com o tipo de material, eficiência do desmonte, condição de lavra, técnica de carregamento, entre outras.

Após o carregamento, o equipamento desloca-se cheio ao destino e, assim como na origem, no destino o equipamento pode entrar em fila, posteriormente faz-se a manobra para bascular, realiza o basculamento e desloca-se vazio para a frente orientada. A Figura 5 ilustra o ciclo ideal de caminhões, ou seja, desconsidera-se as filas que são desperdícios, apesar de eventos comuns, nos fluxos dos equipamentos.



Figura 5: Ciclo de caminhões
Fonte: Relatório interno Vale

A Equação 5 apresenta o cálculo dos tempos fixos e a Equação 6 apresenta o cálculo dos tempos variáveis.

$$\Sigma \text{Tempos fixos} = TFC + TMC + TC + TFB + TMB + TB \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

- TFC = Tempo de fila para carregamento;

- TMC = Tempo de manobra para carregamento;
- TC = Tempo de carregamento;
- TFB = Tempo de fila para basculamento;
- TMB = Tempo de manobra para basculamento;
- TB= Tempo de basculamento.

$$\text{Tempos variáveis} = \frac{DMT \times 2}{\text{Velocidade média}} \quad \text{Eq. (6)}$$

Diferentemente dos tempos fixos que são impactados pelas condições operacionais da frente de carregamento e de basculamento, os tempos variáveis são os quocientes da distância média de transporte pela velocidade média.

A velocidade média é a relação entre distância percorrida e tempo gasto. Ela é impactada diretamente pelas condições de acessos, *grades* de pistas, raios de curvaturas, largura de vias, pontos de estreitamento, visibilidade, sinalização, dentre outros. Dessa forma, em períodos chuvosos, a velocidade é um indicador afetado, em virtude das condições dos acessos e necessidade operacionais para garantir a segurança do transporte. Portanto a confiabilidade e utilização de equipamentos de apoio como motoniveladoras são essenciais para a operação, assim como um plano de drenagem eficiente para preparação das vias para o período chuvoso com objetivo de reduzir os impactos na frota.

A DMT (Distância Média de Transporte) representa o percurso médio percorrido pelo equipamento de transporte, ou seja, é a média do trajeto carregado até o destino com o trajeto vazio até a origem do carregamento, como mostra a Equação 7.

$$DMT = \frac{\text{Dist. Cheio} + \text{Dist. Vazio}}{2} \quad \text{Eq. (7)}$$

As estratégias operacionais definidas pelo planejamento de mina são essenciais para a otimização do indicador DMT e, conseqüente, para o ganho de produtividade. Adicionalmente, as oportunidades de redução de DMT observadas em campo pela operação de mina são fundamentais para melhorias contínuas.

Conforme salientado por Valadares (2012), pode-se concluir que a produtividade horária de transporte está diretamente relacionada ao conceito de ciclos, onde a operação é medida durante um determinado período, retornando à condição inicial. A Equação 8 apresenta o indicador Produtividade Horária (PH) em função da carga média, tempos fixos, DMT e velocidade média.

$$PH = \frac{Carga\ média(t)}{\sum Tempos\ fixos\ (h) + \sum \frac{2xDMT(km)}{Velocidade\ Média(km/h)}} \quad Eq. (8)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos estudos, foram considerados dados reais de uma mina de minério de ferro. Os dados foram extraídos do sistema de despacho eletrônico, compreendendo o período de abril de 2021 a dezembro de 2021, e estão relacionadas com a frota de caminhões modelo CAT 777 (capacidade nominal de 100 toneladas).

A Tabela 1 contém dados sobre carga média, DMT (variável x), velocidade média (variável y) e tempos fixos (variável w). A Tabela 2 apresenta um resumo sobre o desempenho dos indicadores no período estudado, apresentando os valores médios, mínimos, máximos e a diferença entre os valores máximos e mínimos dos KPIs.

Tabela 1 – KPIs do ano de 2021.

Descrição	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Carga (t)	88,48	88,53	88,53	89,19	89,07	89,18	89,17	89,23	89,25
DMT (km) x	7,84	7,55	4,47	3,78	3,13	3,73	3,90	3,93	3,82
Vel. (km/h) y	20,26	20,26	20,254	21,55	21,59	21,48	18,00	17,00	17,00
Tempo (min) w	4,05	4,00	4,05	4,05	4,05	4,05	5,00	5,00	5,00

Tabela 2 – Resumo dos KPIs.

Descrição	Média	Menor	Maior	Diferença* (%)
Carga média (t)	88,96	88,48	89,25	1
DMT (km) x	4,68	3,13	7,84	101
Vel. (km/h) y	19,76	17,00	21,59	23
Tempo fixo (min) w	4,37	4,00	5,00	23

* Diferença porcentual em relação à média: razão da diferença entre o maior e menor valores pela média, multiplicado por 100.

Considerando os valores médios apresentados na Tabela 2 e a aplicação direta da Equação 8, a produtividade horária da frota de transporte no período foi de 162,78 t/h, como mostra a Equação 9. Importante ressaltar que as variáveis que compõem esse indicador possuem três parcelas de contribuição, sendo a DMT uma premissa do planejamento de lavra, a velocidade média uma premissa da equipe de infraestrutura de mina e os tempos fixos e carga média uma premissa do time de operação de mina.

$$p(x, y, w) = \frac{c}{\frac{x}{y} + w} = \frac{88,96}{\frac{4,68 \times 2}{19,76} + \frac{4,37}{60}} = 162,78 t/h \quad \text{Eq. (9)}$$

Para contabilizar a influência das variáveis x , y e z no cálculo da produtividade, é necessário fixar valores médios, de modo que a variável em análise possa variar independentemente dentro do seu domínio. A Equação 10 mostra que caso haja ganho de 1 km no valor médio da DMT (ou seja, de 4,68 km passar para 3,68 km), isso resultaria em um aumento de 22,7% na produtividade horária.

$$p(x) = \frac{c}{\frac{x \times 2}{y} + \frac{w}{60}} = \frac{88,96}{\frac{x}{19,76} + \frac{4,37}{60}} \Rightarrow p(3,68) = \frac{88,96}{\frac{2 \times 3,68}{19,76} + \frac{4,37}{60}} = 199,77 t/h \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\Rightarrow \Delta p = 22,7\%$$

O mesmo raciocínio foi aplicado para as outras variáveis, como mostram as Equações 11 e 12. Considerando ganhos operacionais de 1 km/h na velocidade média (variável y) e 1 minuto nos tempos fixos (variável w), isso resultaria em ganhos de 4,4% e 3,1% na produtividade horária dos caminhões, respectivamente.

$$p(y) = \frac{c}{\frac{x \times 2}{y} + \frac{w}{60}} = \frac{88,96}{\frac{9,36}{y} + \frac{4,37}{60}} \Rightarrow p(20,76) = \frac{88,96}{\frac{9,36}{20,76} + \frac{4,37}{60}} = 169,87 t/h \quad \text{Eq. (11)}$$

$$\Rightarrow \Delta p = 4,4\%$$

$$p(w) = \frac{c}{\frac{x \times 2}{y} + \frac{w}{60}} \rightarrow p(w) = \frac{88,96}{\frac{9,36}{19,76} + \frac{w}{60}} \Rightarrow p(3,37) = \frac{88,96}{\frac{9,36}{19,76} + \frac{3,37}{60}} = 167,90t/h$$

$$\Rightarrow \Delta p = 3,1\%$$
Eq. (12)

Observa-se que, apesar de ter sido considerado um tempo fixo igual a 3,37 minutos para o cálculo de $p(w)$, o histórico de tempos monitorados pelo sistema de despacho da mina apontou que o menor tempo realizado do período foi igual a 4,00 minutos (Tabela 2). O cálculo foi realizado com o valor de 3,37 apenas a título de exemplo.

Para comparar os ganhos em produtividade horária devido à oscilação das variáveis, é necessário normalizar o domínio das variáveis para outro domínio arbitrário. Optou-se, então, por realizar uma mudança de variáveis para o intervalo $[0,1]$. A Equação 13 mostra a função f utilizada para a mudança de domínio da variável x , que oscila entre $[3,13;7,84]$, para a variável x' , que oscila entre $[0,1]$. O histórico da mina mostrou que a DMT variou entre 3,13 km e 7,84 km (Tabela 2), logo, pode-se considerar que 3,13 km representa o melhor caso e 7,84 o pior caso. Com a mudança de variáveis, o melhor caso será representado pelo 0 (zero) e o pior caso pelo 1 (um).

$$f(x) = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} = \frac{x - 3,13}{7,84 - 3,13} = \frac{x - 3,13}{4,71} = x'$$

$$\Rightarrow x = 4,71x' + 3,13$$
Eq. (13)

Logo, a função produtividade horária assumirá nova forma, uma vez que houve alteração de domínio da variável x para x' . A Equação 13 apresenta a nova forma da produtividade horária, em função de x' .

$$p(x) = \frac{c}{\frac{x \times 2}{y} + \frac{w}{60}} = \frac{88,96}{\frac{4,71x' + 3,13}{19,76} + \frac{4,37}{60}}$$
Eq. (13)

$$\Rightarrow p(x') = \frac{88,96}{0,24x' + 0,23}$$

O mesmo raciocínio é aplicado para as variáveis y e w , resultando nas formas apresentadas pelas Equações 14 e 15.

$$p(y') = \frac{408,33y' + 1512,32}{0,33y' + 10,60} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$p(w') = \frac{88,96}{0,473 + \frac{w' + 4}{60}} \quad \text{Eq. (15)}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a resolução das funções, em uma escala de variação entre 0 e 1, é possível constatar que a DMT é o indicador mais sensível da PH quando comparada com as variáveis de tempo fixo e velocidade. Entretanto, é importante ressaltar que neste estudo em questão, poucas são as alternativas para capturar ganhos de DMT nas operações, uma vez que as opções de frente de lavra são restritas e previamente estabelecidas pela equipe de planejamento de lavra. A variação na DMT é resultado da heterogeneidade das frentes de lavra: faz-se necessário *blendar* materiais de diferentes frentes para compor a qualidade do ROM ofertado para a usina de beneficiamento, possibilitando a produção do minério de ferro conforme especificação do cliente.

Em relação a velocidade média de transporte, essa pode ser uma boa alternativa para obter-se ganhos na produtividade horária. Para isso, faz-se necessário manter o foco nas atividades de infraestrutura de mina. Ações que promovam a melhoria dos acessos, *grade* e inclinações de rampas, sinalização eficiente de bordas de estradas em períodos noturnos e eliminação de estreitamento de pistas são algumas alternativas que irão promover o ganho de velocidade nos caminhões e conseqüentemente maximizar a produtividade horária da frota.

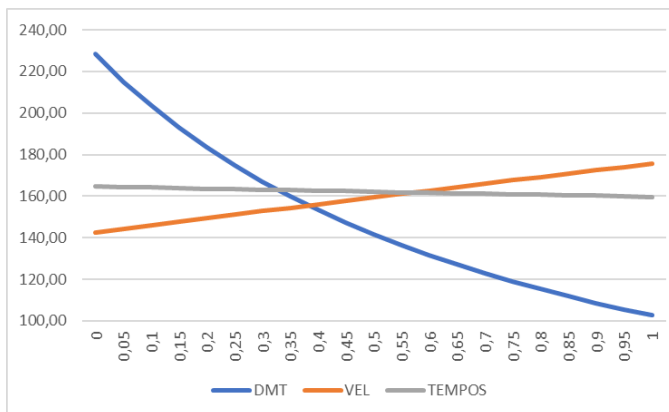
Importante mencionar também que o tempo fixo mostrou-se pouco sensível neste estudo: isso decorre do fato dos equipamentos estarem trabalhando perto da condição ideal ou limite, alterando em pouco o resultado da produtividade horária. O histórico de monitoramento do indicador tempo fixo mostrou pequenas oscilações em torno do valor mais recorrente (4,05 minutos).

Por fim, os resultados demonstraram uma similaridade fiel aos resultados de desempenho no empreendimento na qual se refere este estudo. Foi observar mediante os dados históricos que quanto menor a DMT proposta pela equipe do planejamento de lavra, maior foi a produtividade horária da frota de transporte no período analisado.

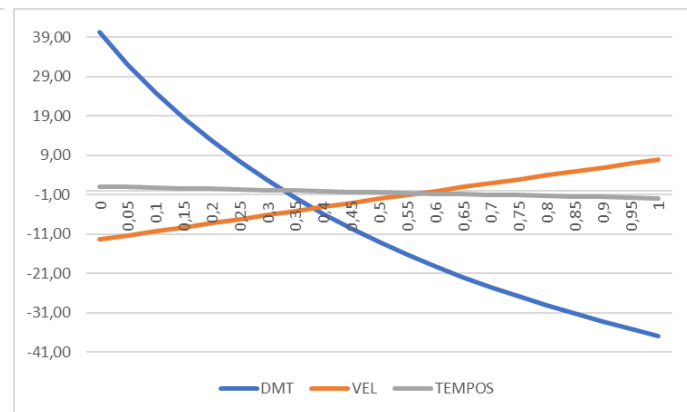
Tabela 3 – Resultado da PH em função da variação nos indicadores tempos fixos, velocidade e DMT.

Variação	Tempo fixo(h) -> [w]	Velocidade (km/h) -> [y]	DMT (km) -> [x]
0	164,63	142,70	228,32
0,05	164,38	144,40	215,15
0,1	164,13	146,09	203,43
0,15	163,88	147,78	192,91
0,2	163,62	149,46	183,43
0,25	163,37	151,14	174,84
0,3	163,12	152,81	167,01
0,35	162,88	154,48	159,86
0,4	162,63	156,14	153,29
0,45	162,38	157,79	147,25
0,5	162,13	159,45	141,66
0,55	161,89	161,09	136,48
0,6	161,64	162,73	131,66
0,65	161,40	164,37	127,18
0,7	161,15	166,00	122,99
0,75	160,91	167,63	119,06
0,8	160,67	169,25	115,38
0,85	160,43	170,86	111,92
0,9	160,19	172,48	108,66
0,95	159,95	174,08	105,59
1	159,71	175,68	102,68

Figura 6: Análise de sensibilidade dos indicadores DMT, velocidade media e tempos fixos: (a) valores de PH em modulo; (b) variação porcentual em torno da média 162,78 t/h.



(a)



(b)

5. CONCLUSÃO

Após análise dos resultados, foi possível concluir que o comportamento da DMT é mais sensível aos ganhos e/ou perdas no indicador de produtividade horária. Em seguida, a variável que também possui sensibilidade, porém menor que a mencionada acima, é a velocidade média. Já a variável de tempo fixo não demonstrou muita sensibilidade quando aplicada na função objetivo. Sendo assim, ganhos relacionados a DMT irão significar um maior desempenho de produtividade na frota de transporte da empresa de mineração mencionada neste estudo.

Entretanto, esta análise não é uma regra geral, pois os resultados obtidos estão diretamente relacionados com os valores mínimos e máximos de cada variável no período analisado. Pode ser que em outro empreendimento, com variáveis que oscilam em domínios diferentes daqueles considerados, aponte para uma velocidade e até mesmo um tempo fixo mais sensível ao indicador de produtividade. Logo, é necessário realizar a análise de sensibilidade através do histórico da mina e conhecer o resultado para a tomada de decisão.

Uma vez que o indicador DMT não pode ser reduzido por questões de *blend* de minérios, este estudo indica ser mais vantajoso focar esforços para o aumento da velocidade média dos equipamentos. Ganhos de até 8% na produtividade horária são possíveis de serem alcançados, considerando-se o histórico da mina.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS COPCO. **Site oficial da Atlas Copco Brasil.** Disponível em: <<http://www.atlascopco.com.br/>>. Acesso em 28/04/2022.

CARVALHO, P. S. L.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J. **Minério de ferro.** Rio de Janeiro: Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social, 2014. *E-book*. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20min%c3%a9rio%20de%20ferro_P.pdf . Acesso em: 03 ago. 2022.

DUARTE, H. A. Ferro - Um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 42, n. 10, p. 1146-1153, 2019.

EPAMINONDAS, L. A. R.; SIQUEIRA, P. V. B. O impacto da falta de componentes para a manutenção das perfuratrizes no processo produtivo de uma empresa mineradora. *In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Maturidade e desafios da Engenharia de Produção*, 30., 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ENEGEP, 2010. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STP_113_743_16073.pdf . Acesso em 26 abr. 2022.

GERALDI, J. L. P. **O ABC das Escavações de Rocha.** Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

JESUS, C. A. G. De. Ferro / Aço. **Dnpm**, 2009. n. 31, p. 99–116.

HERRMANN, Curt. **Manual de perfuração de rocha.** [S.l.]: Polígono, 1968.

LAGES, A. R.; BARBOSA, V. S. B.; CAMPOS, P. H. A.; BARBOSA, R. C.; SILVA, G. R.; CASAGRANDE, P. B.; MAGALHÃES, L. F. Distribution of the main operational costs due to the size of the loading and haulage fleet: Brazilian reality. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION*, 28th, 2019, Australia. **Proceedings [...]**. Switzerland: E. Topal (Ed.), 2020, p. 304–311. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33954-8_38

LISBÔA, Rodrigo César De Oliveira. **Influência dos tempos fixos na produtividade da frota de transporte.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197177/001097106.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 mar. 2022.

RACIA, Ismael Momade. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração.** 2016. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação**: terraplanagem e escavação de rocha - 3ª edição revisada e ampliada. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, V. C. **Desmonte de rochas por explosivos**. Belo Horizonte: Treinamento Técnico Especializado (TTE), 2011. Documento de uso restrito: apostila utilizada pelo Professor.

TANGEN, S. An overview of frequently used performance measures. **Emerald Research**, Sweden, v. 52, n. 7, p. 347-354, 2003, Work Study. Disponível em: [http://www.emeraldinsight.com/00\(3-8022.htm\)](http://www.emeraldinsight.com/00(3-8022.htm). Acesso em: 04 jul. 2022

VALADARES, T. N.; AMORIM, A. C. de; FRANÇA, A. L. da. **Aumento de produtividade da frota de transporte – Mina de Fábrica Nova (Vale Complexo Mariana)**. Revista Minérios e Minerales, Belo Horizonte, mai. 2012. Disponível em: <<http://www.mediafire.com/download/5ssc4msc8g9cl4o/14+%C2%BA+Pr%C3%AAmio+de+Excel%C3%AAncia.zip>>. Acesso em: 14/04/2022.

VALE. **Site oficial da VALE S.A.** Disponível em: <<http://www.vale.com>>. Acesso em 20/03/2022.