



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
MINAS



SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES
ARTICULADOS VIA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS:
ESTUDO DE CASO DA MINEDORA FERRO +

CAIO DE OLIVEIRA TURCI

OURO PRETO
2021

CAIO DE OLIVEIRA TURCI

**SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES
ARTICULADOS VIA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS:
ESTUDO DE CASO DA MINEDORA FERRO +**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos E. Arroyo Ortiz

OURO PRETO
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T932s Turci, Caio de Oliveira.

Seleção e dimensionamento da frota de caminhões articulados via simulações de eventos discretos [manuscrito]: estudo de caso da Mineradora Ferro +. / Caio de Oliveira Turci. - 2021.

86 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração - Carregamento e transporte. 2. Mineração a céu aberto. 3. Métodos de simulação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



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



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezesseis dias do mês de abril de 2021, às 16h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente Caio de Oliveira Turci, matrícula 17.2.1369, intitulado: **SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES ARTICULADOS VIA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS: ESTUDO DE CASO DA MINERADORA FERRO +**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, Eng.º de Minas Bruno Inácio Pereira e MSc. Walter Schmidt Felsch Jr. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º de Minas Bruno Inácio Pereira, segundo o MSc. Walter Schmidt Felsch Jr. e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota **09 pontos (nove)**, sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 16 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Membro: Eng.º de Minas Bruno Inácio Pereira

Membro: M. Sc. Walter Schmidt Felsch Jr.

Discente: Caio de Oliveira Turci

RESUMO

Apesar da modernização da mineração com o passar dos anos, muitas decisões sobre equipamentos de carga e transporte, ainda, são tomadas sem um estudo prévio e com base nas situações vividas pelo colaborador que atua na área. Infatigavelmente, busca-se otimizar os processos operacionais nas empresas, para aumentar sua eficiência e conseqüentemente viabilizar as operações, porém para realizar essa melhoria, é necessário um estudo da linha de processo da empresa. O presente trabalho tem como objetivo simular o melhor cenário e compatibilidade entre os equipamentos de carga (escavadeira) e transporte (caminhões articulados), alocados nas frentes de lavra de estéril da mina J8, da Ferro + Mineração, de forma a maximizar as operações e conseqüentemente o transporte de massa, lucratividade e eficiência operacional, auxiliando nas tomadas das decisões operacionais em uma mina de minério de ferro à céu aberto. Para tal, utilizamos o programa Delphos Open Pit Simulator®, visando um melhor aproveitamento da frota da companhia Ferro + Mineração, situada em Congonhas, Minas Gerais. Com enfoque nas operações de carregamento e transporte, utilizamos ferramentas de qualidade, estatísticas e simulações, para comparar dois caminhões articulados, Volvo A45F® e Volvo A60H®, carregados pela escavadeira Sany SY750H®, para comprovar os benefícios operacionais obtidos pela aquisição de um equipamento de menor porte. Para a coleta de dados, foi utilizado o sistema de despacho SmartMine, 24 horas por dia, operando seis dias na semana (segunda-feira à sábado). Na revisão bibliográfica são apontados os conceitos de operação de mina em lavra à céu aberto, as variáveis de produtividade, os equipamentos utilizados na operação de mina, sistema de despacho e simulação. Um dos resultados do trabalho apontam que é viável a aquisição do modelo A45F, devido a sua utilização em 82% da operação, menor gasto energético e de manutenção, demonstrando a assertividade da mineradora em estudo ao realizar a compra do equipamento.

Palavras-Chave: Seleção e Dimensionamento, Frota de Caminhões, Simulação.

ABSTRACT

The mining industry has considerably developed over the years. However, employees are still responsible for the decisions and operation using empirical and traditional methods. Researches and studies in the field aim to optimize the operation processes of the mining industry to increase their efficiency, but it requires a complete study of the operation process of the mining company. Therefore, the present work carries out a deep study in the optimization of the transport process of iron and mining using the software Delphos Open Pit Simulator® to optimize the efficiency of the transport operation. The study case was performed in a mining company located in Cogonhas, Minas Gerais, Brazil. Statistical tools and simulations are used to improve the transport of mining resources using trucks. We also perform a comparison between two different trucks, Volvo A45F® and Volvo A60H® carried by the bulldozer Sany SY750H® to prove the benefits of the acquisition of a smaller equipment. A dispatching system SmartMine is used 24/7 for the data acquisition process. We perform a discussion about the empirical analysis, mining operation, variable factors, dispatching, and equipment used during the project. The obtained results show that the acquisition of the truck model A45F was the best choice due to its energy-efficiency and smaller maintenance cost.

Keywords: Selection and Dimension, Fleet of Trucks, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPONENTES DA LAVRA EM BANCADA.....	15
FIGURA 2 - LAVRA EM BANCADA DE MINÉRIO DE FERRO.....	16
FIGURA 3 – MÉTODOS DE PERFURAÇÃO – 1 MARTELO DE FUNDO, 2 E 3 MARTELO DE CABEÇA, 4 ROTATIVA.....	17
FIGURA 4 – MECANISMOS DE RUPTURA DE ROCHA.....	18
FIGURA 5 – ETAPA DE CARREGAMENTO.....	19
FIGURA 6 – TRATOR DE ESTEIRA CATERPILLAR D9T®.....	21
FIGURA 7 - TRATOR DE RODAS CATERPILLAR 854K®.....	22
FIGURA 8 - SCRAPER CATERPILLAR DE CAÇAMBA ABERTA 657G®.....	23
FIGURA 9 – DRAGLINE CATERPILLAR 8200®.....	24
FIGURA 10 – ESCAVADEIRA HIDRÁULICA 336®.....	25
FIGURA 11– CARREGADEIRA SOBRE RODAS CATERPILLAR 988K®.....	26
FIGURA 12 – MOTONIVELADORA CASE VHP 865B®.....	27
FIGURA 13 – ROLO COMPACTADOR CATERPILLAR CP533E®.....	28
FIGURA 14 – CAMINHÃO FORA-DE-ESTRADA CATERPILLAR 772G®.....	29
FIGURA 15 – CAMINHÃO ARTICULADO VOLVO A60H®.....	31
FIGURA 16 – CAMINHÃO ARTICULADO VOLVO A45®.....	32
FIGURA 17 – ESCAVADEIRA SANY SY750H.....	33
FIGURA 18 – SISTEMA DE DESPACHO.....	34
FIGURA 19 – SIMULAÇÃO DELPHOS OPEN PIT SIMULATOR®.....	38
FIGURA 20 – FATOR DE ENCHIMENTO SEGUNDO A ISO 7546.....	40
FIGURA 21 – CARGA DE TOMBAMENTO.....	41
FIGURA 22 – TEMPO DE CICLO CAMINHÃO.....	45
FIGURA 23 – EFICIÊNCIA GLOBAL DOS EQUIPAMENTOS.....	46
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	48
FIGURA 25 – LOCALIZAÇÃO FERRO + MINERAÇÃO.....	53
FIGURA 26 – MINA EM ESTUDO.....	54
FIGURA 27 – CENÁRIO 1 E 2.....	56
FIGURA 28 – CENÁRIO 1: OPERAÇÃO CAMINHÃO A60H PDE NORTE.....	57
FIGURA 29 – CENÁRIO 2: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F PDE NORTE.....	58
FIGURA 30 – CENÁRIO 3 E 4.....	59
FIGURA 31 – CENÁRIO 3: OPERAÇÃO CAMINHÃO A60H PDE SUL.....	60
FIGURA 32 – CENÁRIO 4: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F PDE SUL.....	61
FIGURA 33 – CENÁRIO 5: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F E A60H PDE SUL.....	62

FIGURA 34 – CENÁRIO 6: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F E A60H PDE NORTE.....	63
FIGURA 35 – CENÁRIO 7 E 8	64
FIGURA 36 – MASSAS CARREGADAS PELAS ESCAVADEIRAS 49 E 50	65
FIGURA 37 – CENÁRIO 7: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F PARA PDE NORTE E A60H PARA PDE SUL	65
FIGURA 38 – CENÁRIO 8: OPERAÇÃO CAMINHÃO A45F PARA PDE SUL E A60H PARA PDE NORTE.	66
FIGURA 39 – MASSAS CARREGADAS PELAS ESCAVADEIRAS 49 E 50.	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MÉTODOS DE TRANSPORTE	20
TABELA 2 – TEMPO MÉDIO ENTRE MANUTENÇÕES E REPARO	50
TABELA 3 – TEMPO MÉDIO DE CARREGAMENTO VOLVO A60H	50
TABELA 4 – TEMPO MÉDIO DE CARREGAMENTO VOLVO A45F	50
TABELA 5 – EQUIPAMENTOS EM ESTUDO	52

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
OBJETIVO	13
OBJETIVO GERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
ESTRUTURA DO TRABALHO	13
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
1.1 MÉTODOS DE LAVRA - MINA À CÉU ABERTO	14
1.2 OPERAÇÃO DE MINA	16
1.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA LAVRA À CÉU ABERTO	20
1.4 EQUIPAMENTOS EM ESTUDO	30
1.5 SMARTMINE® – SISTEMA DE DESPACHO	33
1.6 DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS	34
1.7 TEMPO ENTRE MANUTENÇÃO E TEMPO MÉDIO DE REPARO	36
1.8 SIMULAÇÃO	36
1.9 PRODUTIVIDADE	38
2 METODOLOGIA	48
2.1 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS	48
2.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO	49
2.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	51
2.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS – EXTRAÇÃO DE ESTÉRIL	51
3 ESTUDO DE CASO	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2 – ESTÉRIL	55
4.2 CENÁRIO 3 E CENÁRIO 4 - ESTÉRIL	58
4.3 CENÁRIO 5 E CENÁRIO 6 - ESTÉRIL	61
4.4 CENÁRIO 7 E CENÁRIO 8 – ESTÉRIL	63

CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	70
ANEXO I	75
ANEXO II	76
ANEXO III	77
ANEXO IV	78
ANEXO V	79
ANEXO VI	80
ANEXO VI	81
ANEXO VII	82
ANEXO VIII	83
ANEXO IX	84
ANEXO X	85
ANEXO XI	86
ANEXO XII	87
ANEXO XIII	88

INTRODUÇÃO

Com a inserção constante de novas tecnologias na mineração, criou-se um ambiente com diversos equipamentos e montadoras buscando por seu espaço, oferecendo a cada dia um novo produto de maior complexidade. Essas inovações, para serem aplicadas, necessitam de um estudo prévio, e caso sejam utilizadas de forma correta, podem gerar ganhos expressivos para a mineradora, aumento da produtividade e consequentemente lucratividade, além de ampliar a segurança das operações.

O presente estudo, ocorreu na Ferro + Mineração, grande produtora de minério de ferro localizada em Minas Gerais. Podendo auxiliar nas operações, visto que um dos grandes gargalos da mineração, devido ao alto custo, são os equipamentos de carregamento e transporte, o dimensionamento e selecionamento dos mesmos devem ser realizados antes da tomada de decisões.

Com uma média mensal de 1,4% de relação estéril/minério, os equipamentos em estudo são alocados para transporte e carregamento de estéril. Os ganhos obtidos com a aquisição de um caminhão Volvo A45F® de menor porte, ao invés de um caminhão Volvo A60H® de maior porte, serão debatidos, neste trabalho, de forma a comprovar que lucratividade, transporte de massa e eficiência operacional não estão ligadas somente ao porte dos equipamentos.

Para simular diversos cenários, usaremos o *software* Delphos Open Pit Simulator, que é uma ferramenta de planejamento capaz de estimar a produção de uma lavra através de três fatores: layout da mina, a frota de equipamentos de carga e transporte, e um plano que indique qual a massa transportada em cada frente de trabalho. A partir desses dados, o *software* realiza uma simulação de manuseio de materiais, gerando relatórios de produção, tempo de ciclo e velocidade. (DELPHOS, 2021)

OBJETIVO

Objetivo Geral

Comprovar via simulação de frotas qual o melhor equipamento de transporte alocado nas frentes de lavra de estéril da mina J8, da Ferro + Mineração, de forma a maximizar as operações e conseqüentemente a movimentação da massa, lucratividade e eficiência operacional, para auxiliar nas tomadas das decisões operacionais em uma mina de minério de ferro à céu aberto.

Objetivos Específicos

- Comparar dois modelos de equipamento de transporte: Volvo A60H® e Volvo A45F® (caminhões articulados), via simulação de eventos discretos;
- Subsidiar estudos já elaborados pela mineradora ao optar por um equipamento de transporte de menor porte.

Estrutura do Trabalho

O presente estudo é composto de quatro capítulos acrescidos à introdução, que apresenta também a justificativa e os objetivos do presente trabalho.

No primeiro capítulo de revisão bibliográfica, apresentamos apontamentos sobre a operação de lavra à céu aberto, o mesmo método utilizado na mineradora, as operações realizadas na mina, os equipamentos que operam na mina, fatores que afetam a produtividade dos mesmos e o método de simulação.

No segundo capítulo, é apresentado a metodologia para o desenvolvimento do trabalho, da coleta de dados até a utilização final na simulação. No terceiro capítulo, foi debatido o estudo de caso, explicando a mina em questão, sua localização espacial e sua litologia. Por fim, expomos o quarto capítulo, no qual traçamos os resultados que nos levaram as conclusões do estudo realizado, apresentados ao final do mesmo.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentaremos conceitos fundamentais relativos à operação de mina em lavra à céu aberto, variáveis de produtividade, os equipamentos utilizados na operação de mina, sistema de despacho e simulação.

1.1 Métodos de Lavra - Mina à Céu Aberto

Segundo Curi (2017) denomina-se método de lavra a sistematização e coordenação das várias operações unitárias visando ao aproveitamento de uma jazida mineral. Sendo que, para a escolha do método de lavra a ser utilizado, o principal fator a ser levado em conta é a geometria do corpo mineral, que irá nos informar o planejamento da mina a curto, médio e longo prazo. O melhor método, deve associar a economia, comunidade ao entorno das operações, e o meio ambiente.

A lavra pode ser feita a céu aberto ou subterrânea, sendo que no primeiro caso as operações são realizadas sobre a superfície, sem a necessidade de recurso humano no subsolo, e a lavra acontece de cima para baixo; no segundo caso as operações acontecem sob a superfície e podem variar, sendo realizadas de cima para baixo ou inversamente.

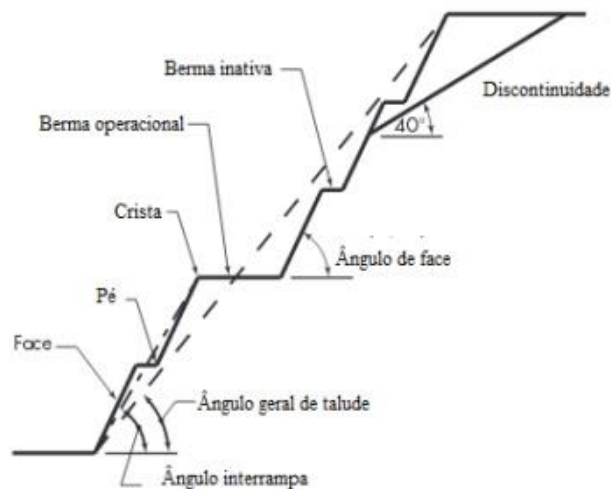
Os principais métodos de lavra a céu aberto são aqueles de exploração a seco, ou seja, a lavra por bancadas (encosta e *open pit*), lavra em tiras e a lavra de pedreiras (CURI, 2017). Ainda segundo este autor, o método por bancadas é mais usado quando o corpo de minério está coberto por um capeamento mais extenso, o método em tiras é mais usado em depósitos tabulares ou com camadas horizontais com pouca espessura de capeamento, e por fim, as pedreiras de onde se extraem materiais para construção civil, granulados.

1.1.1 Lavra por Bancada

Na mineração à céu aberto uma bancada (Figura 1 e 2) é um nível de operação dentro do qual os materiais são escavados da face da bancada (SOUZA, 2001). O desenvolvimento da cava é simplificado e de alta produtividade, comparado a outros métodos. Em contrapartida, o alto investimento inicial é uma desvantagem.

De acordo com esse autor, quando a profundidade da cava é superior a 15 metros, normalmente necessita de mais de uma bancada. A largura da bancada varia de acordo com os equipamentos utilizados na operação, e as mesmas são utilizadas como vias de transporte, formando uma espiral até o fundo da cava. Outros fatores a serem observados são a altura e os ângulos dos taludes.

Figura 1 - Componentes da lavra em bancada



Fonte: Bernardo José, 2016

Figura 2 - Lavra em Bancada de Minério de Ferro



Fonte: acervo do autor

1.2 Operação de Mina

1.2.1 Perfuração

A perfuração é a primeira das operações unitárias, caso opte-se pelo desmonte químico. Os furos são feitos com uma malha pré-determinada (distribuição) e geometria adequada para que possam ser carregados com explosivos. Basicamente, busca-se atingir o diâmetro correto, a profundidade da bancada, ser estável e retilíneo.

De acordo com Silva (2009), existem três tipos de perfuração (Figura 3): perfuração rotativa com brocas tricônicas (Holler Bit), Martelo de superfície (Top-Hammer, método roto-percussivo) e Martelo de fundo de furo ou furo abaixo (Down the Hole, método roto-percussivo), e a escolha do método a ser utilizado deve-se basear no diâmetro do furo, tipo de rocha, profundidade máxima do furo, avanço, etc.

Figura 3 – Métodos de perfuração – 1 Martelo de Fundo, 2 e 3 Martelo de cabeça, 4 Rotativa



Fonte: Operações Mineiras – Demin/UFOP

1.2..2 Desmonte

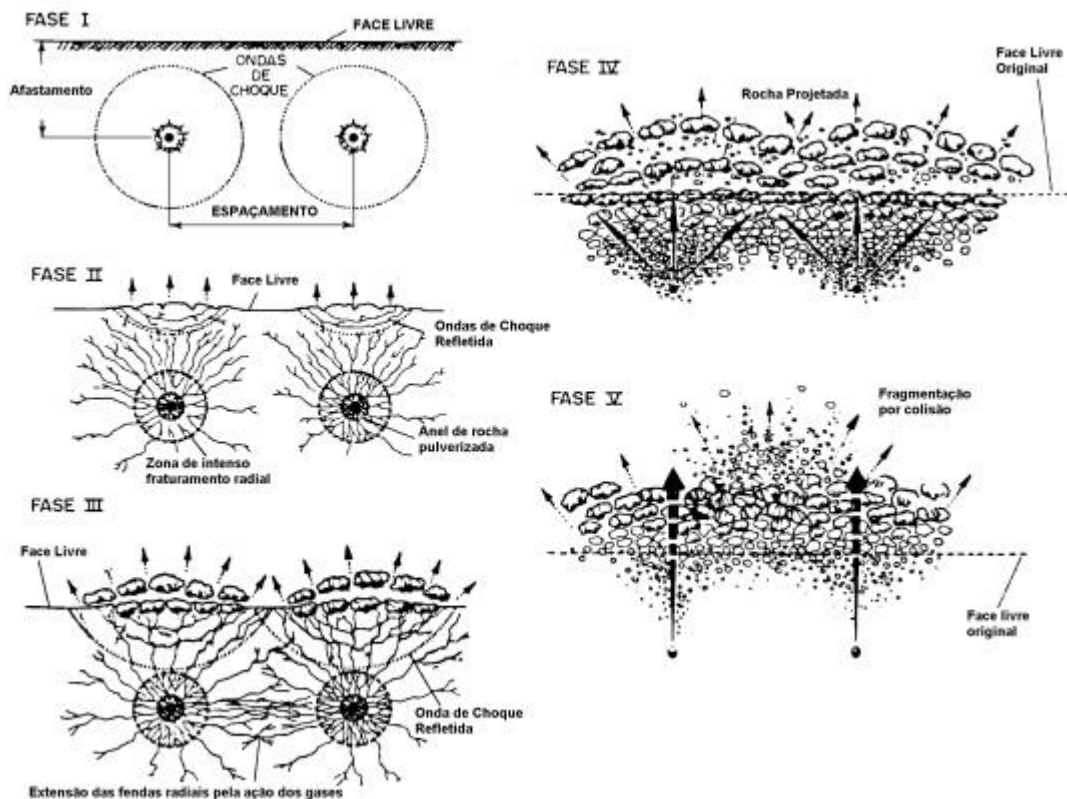
O desmorte de rocha pode ser feito de forma mecânica, hidráulica e química, sendo que o método a ser escolhido, depende de fatores como a resistência da rocha, orientação das descontinuidades, vibrações no terreno, ruídos, etc.

Segundo Silva (2009) o método mais utilizado na mineração e construção civil é o método químico, sendo que existem 3 tipos de explosivos comerciais: alto explosivos, caracterizados pela elevada velocidade de reação; baixos explosivos, que possuem uma velocidade de reação muito baixa; e agente detonantes, misturas cujo os ingredientes não são classificados como explosivos. Com a utilização do desmorte mecânico, têm-se maior segurança, controle operacional e das vibrações, sendo este também um método bastante difundido.

Deve-se manter o plano de fogo o mais próximo possível do ideal, para se obter a fragmentação adequada do maciço e se evite desperdício de perfuração e explosivos (Figura 4), havendo redução de custos nas próximas etapas, como o carregamento e cominuição (BOTELHO, 2014). Para isso, fatores como espaçamento, afastamento, tipo de malha, profundidade do furo, inclinação do furo, diâmetro, etc. devem ser

monitorados.

Figura 4 – Mecanismos de ruptura de rocha



Fonte: Operações Mineiras – Demin/UFOP

1.2.3 Carregamento

De acordo com Hartman e Mutmanky (2002), a etapa de carregamento é realizada com a elevação do material e conseqüentemente o descarregamento em algum veículo de transporte, sendo essas duas etapas sempre interligadas, formando o ciclo de transporte. Este ciclo, consiste, basicamente, no carregamento, tempo de transporte cheio, descarregamento e tempo de transporte vazio. Estas etapas, segundo Silva (2009) representam mais da metade dos custos de operação.

Segundo Wethereld e Wielen, 2011, o carregamento pode ser realizado por três equipamentos (Figura 5): pás carregadeiras, escavadeiras hidráulicas e à cabo. Para

operações que necessitam de maior mobilidade, utiliza-se a carregadeira, enquanto o que difere as escavadeiras são a quantidade de material deslocado por cada uma.

Os mesmos autores citam que para dimensionamento da frota deve-se levar em conta a produtividade, a altura da bancada em que irão operar, o porte dos equipamentos de transporte que irão ser carregados e o espaço na praça de trabalho disponível para eventuais manobras.

Figura 5 – Etapa de carregamento



Fonte: acervo do autor

1.2..4 Transporte

O transporte do material em mina à céu aberto, normalmente é realizado por caminhões ou correias transportadoras (Tabela 1), que fazem, respectivamente, o trabalho de forma cíclica e contínua. Isto significa, que a correia transportadora não para de transportar massa enquanto estiver operando, enquanto que o caminhão em seu ciclo, opera com a caçamba vazia.

O minério extraído da mina, é transportado para as usinas de beneficiamento, enquanto o estéril tem como destino as pilhas de estéril. Também pode ocorrer a movimentação de rejeito, quando filtrado, pode ser realocado nas pilhas de rejeito.

Tabela 1 – Métodos de transporte

Operação	Método	Distância de Transporte
Céu Aberto	Trem	Ilimitado
	Caminhão	0,6 – 16 km
	Caminhão articulado	150 - 1500 m
	Pá carregadeira	< 300 m
	Correia Transportadora	0,3 – 16 km
	Mineroduto	Ilimitado
Subterrânea	Trem	Ilimitado
	Caminhão/Shuttle car	150 – 1500 m
	LHD	90 – 600 m
	Skip	< 12 km
	Correia Transportadora	0,3 – 8 km

Fonte: Lages (2018)

1.3 Equipamentos utilizados na Lavra à Céu Aberto

Buscando acompanhar toda evolução na mineração que ocorrera nos últimos anos, tornando possível lavar um minério mais pobre e de maior dificuldade de extração, os equipamentos tiveram de adaptar-se, e as montadoras passaram a buscar por novas tecnologias.

Visando uma maior produtividade e eficiência, menores custos e maior segurança, a seleção dos equipamentos em uma mina deve ser feita de forma sistêmica e embasada em estudos, em vista que um mal dimensionamento pode comprometer toda a operação.

De acordo com Souza e Catalani (2007), podemos dividir os equipamentos de uma mina em sete categorias: Unidades Escavo (Transportadoras, Carregadoras e

Empurradoras), Unidades Aplainadoras, Unidades de Transporte, Unidades Compactadoras e Unidades de Perfuração. Algumas categorias serão tratadas abaixo.

1.3..1 Unidades Escavo - Empurradoras

Há dois tipos de tratores, de esteira (Figura 6) e de pneus (Figura 7), e com uma adaptação realizada, nos quais são instalados uma lâmina (“*Bulldozer*”), passam assim, além de realizar a atividade de empurrar a terra, escava-la. Recebendo o nome de Unidades Escavo Empurradoras (FERREIRA, 2013).

Segundo Souza e Catalani (2007), o escarificador ou “*ripper*”, é provido de um ou mais dentes reforçados, usados para romper rochas e solos compactos. A “chapa frontal” é uma seção transversal e curva, que realiza a movimentação de material, e em sua parte inferior, possui uma lâmina para o corte do terreno.

Figura 6 – Trator de esteira Caterpillar D9T®



Fonte: Caterpillar, 2021

Figura 7 - Trator de rodas Caterpillar 854k®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.3..2 Unidades Escavo -Transportadora

Escavo-Transportadoras são os equipamentos que conseguem escavar, carregar e transportar o material. São exemplos o *Scraper* (Figura 8) e *MotoScraper*. sendo que a maior diferença entre os dois é que o primeiro necessita de ser rebocado, usualmente por um trator, enquanto o segundo tem a movimentação autônoma, feita por um rebocador acoplado. (SOUZA E CATALANI, 2007)

Figura 8 - Scaper Caterpillar de caçamba aberta 657G®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.3.3 Unidades Escavo – Carregadoras

Como visto anteriormente, e confirmado por Souza e Catalani (2007), Unidades Escavo – Carregadoras são aquelas que escavam o material e o carregam, realocando-o em um outro equipamento, que irá realizar o transporte do mesmo até o local de descarga. Sendo assim, para realizar o ciclo de transporte, são utilizados dois equipamentos distintos:

1.3.3.1 Escavadeiras

As escavadeiras possuem um papel fundamental na mineração, podendo ser utilizadas para carregamento, quando houver desmonte prévio do material, ou também, se tratando de uma rocha friável, pode ser usada para escavar a rocha e depois carregá-la.

Segundo Souza e Catalani (2007), a escavadeira deve se movimentar o mínimo possível (trabalhando parada), tendo sua movimentação não contabilizada em seu ciclo de produção. Além disso, pode girar 360°, mas quanto menor o ângulo de giro, maior será sua produtividade.

Podemos dividir as escavadeiras em dois grupos: escavadeiras cíclicas e contínuas. No primeiro grupo encontramos a escavadeira com caçamba “Shovel”, “Dragline” (Figura 9) e Hidráulica (Figura 10); no segundo grupo podemos observar a “Bucket-Wheel”. As retroescavadeiras também podem ser incluídas no grupo de escavadeiras cíclicas.

As escavadeiras “Shovel” são utilizadas no corte de materiais de primeira categoria (devido a força disponível no braço e na caçamba), e devem ser posicionadas em um talude abaixo do que irão escavar; as escavadeiras “Dragline” são utilizadas em terrenos pouco consistentes situados abaixo do nível em que a máquina se encontra; a escavadeira hidráulica é usada em solos friáveis e até mesmo em solos compactos, e devem estar alocadas em um patamar mais alto do qual será escavado (SOUZA E CATALANI, 2007). A “Bucket-Wheel”, são utilizadas em minas de grande porte, e normalmente ficam alocadas no mesmo nível do material que irão escavar.

Figura 9 – Dragline Caterpillar 8200®



Fonte: Caterpillar, 2021

Figura 10 – Escavadeira Hidráulica 336®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.3.3.2 Carregadeiras

As carregadeiras (Figura 11) podem se locomover sobre rodas ou esteiras, e sua escolha deve ser tomada analisando diversos fatores da operação, como a distância percorrida na operação e o terreno no qual irá se locomover.

Segundo Rodrigues (2018) suas principais funções são: carregamento de material solto, cortes em materiais com pouca resistência, limpeza da praça de trabalho, nivelamento de terreno.

Estes equipamentos, possuem uma caçamba frontal, que é movimentada por um sistema hidráulico, este sistema permite o carregamento do material, para que o mesmo seja depositado/despejado em outro local. (RACIA, 2016)

Figura 11– Carregadeira sobre rodas Caterpillar 988k®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.3..4 Unidades Aplainadoras

Os equipamentos da mineração, como visto, são de grande porte, fazendo com que o terreno por onde passam, com o tempo e a variação climática (chuva), se deformem. As motoniveladoras (Figura 12), conhecidas também como “patrol”, realizam o nivelamento deste terreno deformado, ajustando o melhor greide para operação. (SOUZA E CATALANI, 2007).

Figura 12 – Motoniveladora Case VHP 865B®



Fonte: acervo do autor

1.3..5 Unidades Compactadoras

Segundo Ferreira (2013) a compactação do solo é realizada para se alcançar um menor índice de vazios no solo e conseqüentemente um aumento da resistência do mesmo, melhorando o translado dos equipamentos da mina. É considerado um processo mecânico, que aumenta a densidade do material compactado, de forma geral realizada pelo Rolo Compactador (Figura 13).

Figura 13 – Rolo Compactador Caterpillar CP533E®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.3.6 Unidades Transportadoras

Como visto anteriormente, o transporte de material em uma mina à céu aberto pode ser realizado por caminhões ou correias transportadoras. Geralmente, devido a flexibilidade operacional e pela grande distância a ser percorrida, utiliza-se, caminhões rígidos de maiores portes. Para Burt e Caccetta (2013) a capacidade de carga varia entre 36 e 315 toneladas, sendo que quanto maior for o equipamento, menor será sua velocidade de traslado.

Para a seleção dos equipamentos de transporte, alguns fatores devem ser levados em conta: ser compatível com os equipamentos de carga, baixo custo de manutenção e operação, alta disponibilidade física e utilização, etc. (BORGES, 2013). Desta forma, será feita a escolha entre caminhões articulados, rodoviários ou fora-de-estrada (Figura 14).

Segundo Rodrigues e Pinto (2012) a alocação dos equipamentos de transporte, deve ser feita através do sistema de despacho, para que haja uma otimização do processo. Essa alocação, pode ser feita de maneira estática ou dinâmica, e dependem de fatores como a produtividade, disponibilidade e compatibilidade entre equipamentos de carga e transporte.

Podemos observar algumas vantagens de se utilizar os caminhões para transporte ao invés das correias transportadoras: alta flexibilidade operacional, a lavra pode ocorrer em vários níveis o que facilita a “blendagem” do material, pode-se deslocar os caminhões para outras frentes de trabalho que possui diferentes materiais (litologias), menor variação dos teores médios da jazida devido a sua verticalização, facilidade de contratar operador no mercado, as operações não são interrompidas devido a falha de um equipamento, pode-se alterar o equipamento de carregamento por algum de porte parecido e possui grande agilidade para evacuar o produto (LOPES,2010).

Figura 14 – Caminhão Fora-de-Estrada Caterpillar 772G®



Fonte: Caterpillar, 2021

1.4 Equipamentos em Estudo

1.4.1 Transporte

1.4.1.1 Volvo A60H®

São caminhões de modelo articulado, utilizados em minas que possuem restrições de acesso e locomoção, mas em contra partida conseguem carregar uma grande quantidade de matéria. Segundo sua fabricante, o Volvo A60H® (Figura 15) tem capacidade para transportar 55 toneladas e uma caçamba de 33,6 m³, um peso líquido de 43,75 toneladas. Um motor Volvo D16J® com potência bruta de 470kW, velocidade máxima atingida de 55km/h e tração em todas suas rodas.

Foi lançado em 2016, e ocupava o cargo de maior caminhão articulado do mundo. Por possuir um sistema de pesagem a bordo (OBW), o operador consegue garantir uma carga ideal a ser transportada, maximizando a produtividade e diminuindo os desgastes da máquina e de combustível.

Figura 15 – Caminhão Articulado Volvo A60H®



Fonte: Volvo, 2021

1.4..1.2 Volvo A45F®

O Volvo A45F® (Figura 16) é um caminhão articulado produzido pela mesma montadora do caminhão citado anteriormente, o que os diferem são suas especificações. A Volvo nos diz que o caminhão possui capacidade de carga de 41 toneladas, e uma caçamba de 25,1 m³, um peso líquido de 30 toneladas, motor Volvo D16E®, motor com potência bruta de 350kW e velocidade máxima de 57km/h. Possui também o sistema de pesagem a bordo (OBW), além do MATRIS™, CareTrack™.

Figura 16 – Caminhão Articulado Volvo A45®



Fonte: Volvo, 2021

1.4.2 Carregamento

1.4.2.1 Sany SY750H®

A escavadeira hidráulica Sany SY750H® (Figura 17), tem origem chinesa e segundo a montadora, possui alta eficiência, força de escavação e baixo consumo de combustível. Sua caçamba tem capacidade para 8,3m³, velocidade de deslocamento de 2,9 km/h, força de escavação do braço de 345 kN e um motor Isuzu 6WG1 com potência nominal de 1800kW. Sua altura máxima de escavação é de 11,2m, com altura máxima do despejo de 7,25m, alcance máximo de 12,05m e raio de giro mínimo de 2,475m.

Figura 17 – Escavadeira Sany SY750H



Fonte: Sany, 2021

1.5 SmartMine® – Sistema de Despacho

Previamente abordado, minas à céu aberto utilizam de dois critérios para alocação de caminhões: alocação estática, a qual os caminhões são fixados em um ponto de carga e descarga; e alocação dinâmica, na qual os caminhões a cada ciclo são direcionados pelo sistema de despacho para um ponto específico. (RODRIGUES E PINTO, 2012).

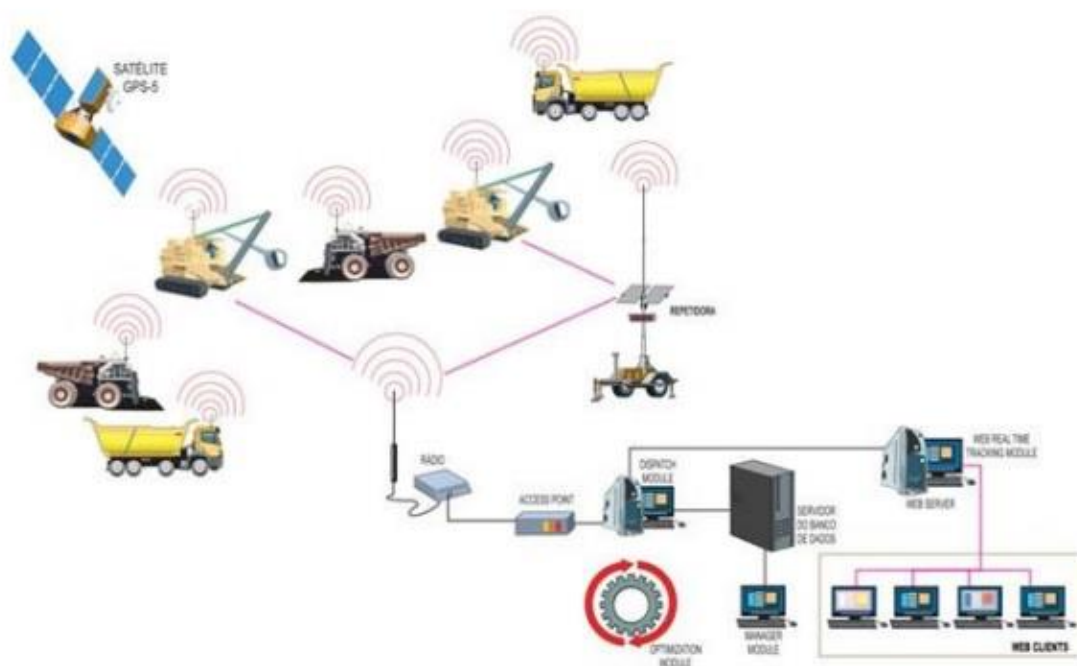
Um sistema de despacho (Figura 18) reúne um algoritmo de alocação dinâmica, algoritmo de sequenciamento de viagem, um sistema de comunicação entre equipamento de carga, caminhões e central de comandos. (COSTA, 2004).

Diversos parâmetros podem ser observados pelo controlador através do sistema de despacho, como a localização do equipamento, velocidade, quantidade de combustível

e seu consumo, filas, etc. Para realizar o envio e recebimento de dados, pode-se utilizar o *GPS*, *Wi-Fi* ou rádio.

Na mina em estudo, o sistema de despacho utilizado é o SmartMine®. O programa foi desenvolvido pela Devex® e em 2014 adquirido pela Hexagon®. Segundo Pereira (2016), o SmartMine® garante que todos os eventos ocorridos na mina sejam armazenados em um banco de dados, podendo ser posteriormente consultados. O programa combina técnicas de otimização e simulação nos processos da indústria mineral, gerando aumento da produtividade e qualidade.

Figura 18 – Sistema de Despacho



Fonte: Pereira, 2016

1.6 Dimensionamento e Seleção de Equipamentos

O dimensionamento dos equipamentos deve ser realizado após a escolha do método de lavra da jazida e dos ciclos básicos de operação, visando atingir as metas de produção. Após o dimensionamento, deve ser realizada a seleção dos equipamentos para minimizar os custos unitários de produção (JÚNIOR, 2012).

1.6..1 Dimensionamento de Equipamentos

O dimensionamento dos equipamentos é de suma importância para que alcance uma maior eficiência global, viabilizando a operação dos equipamentos que irão trabalhar de forma conjugada. Segundo Silva (2009) a compatibilização dos equipamentos deve ser, inicialmente, baseada em restrições físicas, como: a altura da bancada (H) condiciona o equipamento de carga, e o alcance de descarga condiciona o equipamento de transporte. Podemos observar a relação dos equipamentos de carga com a altura da bancada:

- Pá Carregadeira: $H = 5$ a 15 metros;
- Escavadeira Hidráulica: $H = 4 + (0,45 \times Cc)$;
- Escavadeira à cabo: $H = 10 + 0,57 \times (Cc - 6)$.

Onde Cc é a Capacidade da Caçamba.

Após o estudo dessas restrições, a compatibilização dos equipamentos deve atender, então, outros fatores que irão afetar a eficiência da operação, tal como o número de passes dados para encher o equipamento de transporte, considerando de 3 a 5 um bom número.

1.6..2 Seleção dos Equipamentos

Para Baççentin (2006) a seleção de equipamentos tem interface com o projeto de instalação da mina e de produção, influenciando assim nos parâmetros econômicos operacionais e de longo prazo.

A seleção dos equipamentos de carga é feita, normalmente, através de parâmetros da mina e sua localidade, como a taxa de produção, condições climáticas, frentes de lavras e deslocamento entre frente de trabalho. Para os equipamentos de transporte, a seleção é realizada pela taxa de produção e se baseia em alguns fatores como a compatibilidade ao equipamento de carga, capacidade de carga, manutenção, custos de aquisição e operação, utilização e disponibilidade, etc.

1.7 Tempo entre Manutenção e Tempo Médio de Reparo

As empresas possuem alto custo relacionados à falha dos equipamentos e suas manutenções. De acordo com Bartholomew-Biggs e Zuo (2009), a ocorrência das falhas pode ser diminuída pelas manutenções periódicas, aumentando a confiabilidade de seu sistema através de modelos matemáticos.

Dentre os índices controlados pela mecânica, o tempo entre manutenção corresponde a transcrição do tempo entre uma manutenção e outra; e o tempo médio de reparo refere-se há quanto tempo o equipamento ficou parado para que se realizasse a manutenção. Quanto maior o tempo médio entre manutenção e menor o tempo médio de reparo, melhor para a empresa, que poderá utilizar o equipamento na operação, aumentando a produtividade.

1.8 Simulação

Para Chwif e Medina (2010) podemos dividir a simulação em duas categorias: simulação computacional e não computacional. A primeira necessita de um computador para realizar uma simulação de algum processo que ocorre no mundo real, enquanto a segunda não necessita do computador. Ambas não devem ser aplicadas para melhorias ou otimização do processo.

Quando estamos simulando algo, estamos em busca da simulação de algum sistema. De acordo com Forrester (1968) o sistema é um agrupamento de partes que operam juntas, em busca de um objetivo final comum. Possuem então, uma relação de causa-efeito sobre as partes que o compõem.

As simulações devem ser aplicadas quando o processo é complexo, dinâmico e aleatório. Caso o problema seja estatístico, seus estados não se alteram com o tempo; ou determinístico, não apresenta comportamento aleatório; não se deve usar a simulação, pois seus resultados não serão satisfatórios (CHWIF E MEDINA, 2010).

1.8..1 Delphos Open Pit Simulator®

O Delphos (Figura 19) é um simulador de eventos discretos (cada evento ocorre em um determinado tempo e marca uma mudança de estado) e nos permite estimar a produção de um plano de lavra através de três fatores: layout da mina (frentes de carga e descarga), a frota de equipamentos de carga e transporte, e um plano que indica quanto você deseja enviar de cada frente de trabalho. Ao inserir esses elementos são gerados relatórios de produção, velocidade e tempo de ciclo dos equipamentos. (DELPHOS, 2021)

Dessas entradas necessárias para a simulação, temos que descrever: o layout da mina, o local e produtividade dos britadores, as frentes e locais de trabalho, as frotas de equipamentos, eventos e manutenções que ocorrem e o plano de extração. Quando inserido esses itens, o programa realiza a simulação.

Figura 19 – Simulação Delphos Open Pit Simulator®



Fonte: Delphos, 2021

1.9 Produtividade

Para atingir a produtividade esperada, alguns fatores devem ser analisados na operação de mina, em especial nos equipamentos de carga e transporte, por utilizarem o óleo diesel como fonte de combustível e este ser um dos grandes gargalos da mineração devido ao seu alto custo.

De acordo com Tupy e Yamaguchi (1998) a produtividade de uma unidade de produção é entendida como a relação entre a quantidade de seus produtos e insumos. A produtividade varia de acordo com a diferença na tecnologia de produção, na eficiência do processo e no ambiente que ocorre a produção.

Para o cálculo da produtividade dos equipamentos Silva (2011), cita alguns fatores que devem ser levados em consideração. Os mesmos se encontram abaixo.

1.9.1 Volume da Caçamba

Embora projetados para suportar um certo peso, na prática, os equipamentos são utilizados para transportar/carregar certo volume de massa, sendo que a sobrecarga da caçamba, pode afetar a confiabilidade, a disponibilidade e vida útil do equipamento e dos pneus. (KAIZER, 2004). Visto isto, é de suma importância o cálculo do volume da caçamba para termos a capacidade de cada equipamento, sendo representado pela fórmula:

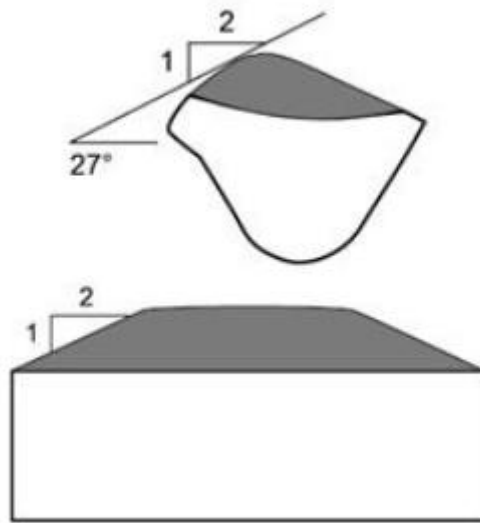
$$V_c = \frac{C_{max}}{\lambda}$$

Onde V_c é o Volume da Caçamba, C_{max} a Carga Máxima da Caçamba e λ o Peso Específico do material.

1.9.2 Fator de Enchimento

Para o mesmo autor, o fator de enchimento é aplicado sobre a capacidade operacional da caçamba, basicamente, será função das características do material, das condições do desmonte, da altura da bancada e da forma de penetração do equipamento. De acordo com a ISO 7546 (Figura 20), o ângulo de repouso do material na caçamba deve ser de 27° ou 1:2, com a caçamba posicionada na horizontal

Figura 20 – Fator de Enchimento segundo a ISO 7546



Fonte: SDLG Latin America

1.9.3 Empolamento

Quando o material é desagregado, ele tem um aumento aparente de seu volume em relação ao estado anterior, compacto. Cada material possui diferente valor de fator de empolamento, afetando assim a carga transportada por cada equipamento. Pode ser calculado através da fórmula abaixo:

$$\lambda = \lambda_c \div \lambda_s$$

Onde λ é o Fator de Empolamento, λ_c o peso específico do material no corte e λ_s o peso específico do material empolado (solto). Para cálculo do empolamento, temos:

$$\varepsilon = (\lambda - 1) \times 100$$

Onde ε é o Empolamento. E para cálculo do volume do material pós fragmentação:

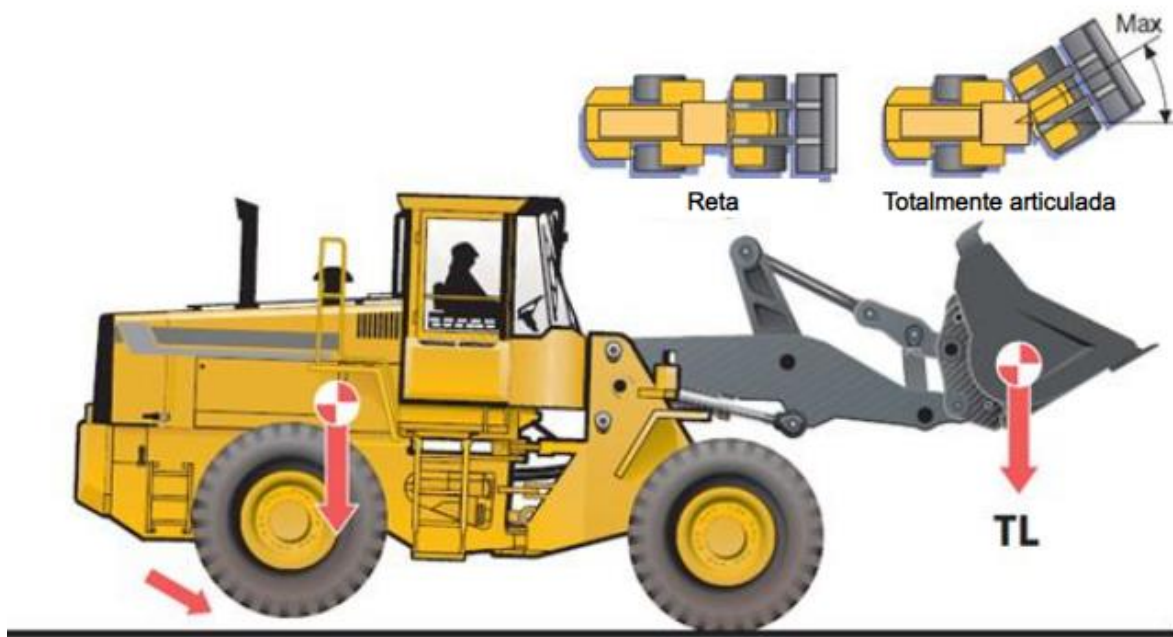
$$V_s = V_c \times \frac{\lambda_c}{\lambda_s} = V_c \times \lambda$$

Onde V_c é o Volume do Corpo *in situ* e V_s o Volume do Material Fragmentado (SILVA,2011).

1.9.4 Carga de Tombamento

Carga excedente que ocasiona o tombamento do equipamento de carga (Figura 21), este fator ocorre quando o valor da carga na caçamba ultrapassa o valor do contrapeso da máquina.

Figura 21 – Carga de Tombamento



Fonte: SDLG Latin America

1.9..5 Carga Útil

Pode ser representada por até 80% da carga de tombamento, carga na qual não ocorre o acidente com o equipamento de carga, representando um fator de segurança de 1,25 para a operação.

1.9..6 Disponibilidade

A disponibilidade representa o tempo em que o equipamento está disponível para a operação. Podemos dividir a disponibilidade em duas: disponibilidade mecânica e física. A primeira soma todas as horas possíveis de trabalho (horas horizontes), com exceção das manutenções mecânicas; e a segunda quando além da manutenção mecânica são excluídas o tempo de deslocamento até a oficina da manutenção e a manutenção preventiva e corretiva. Fatores como má organização da mina e das condições de trabalho, operação exaustiva da máquina em todos os turnos e manutenções realizadas de forma incorreta podem impossibilitar a utilização da máquina.

Podemos calcular a disponibilidade mecânica de acordo com a fórmula:

$$DM = \frac{Ht - (Mp + Mc + Tp)}{Ht} \times 100$$

Onde DM é a Disponibilidade Mecânica, Ht as Horas Horizontes, Mp Manutenção Preventiva e Tp o Tempo de Deslocamento.

E a disponibilidade física pode ser calculada:

$$DF = \frac{(Hp - Hm)}{Hp}$$

Onde DF é disponibilidade física, Hp as Horas Horizontes e Hm as Horas de Reparo. Para obtermos uma boa disponibilidade, é necessário que haja confiabilidade do processo (SILVA,2011).

1.9..7 Utilização Física (UF)

Tempo em que o equipamento está disponível para operar, e realmente está sendo utilizado na operação da mina (horas efetivas trabalhadas). O cálculo é diretamente afetado por atrasos operacionais, como: número de unidades ou porte, maior ou menor, do que o requerido; falta de operador; paralisação de outros equipamentos; eficiência do operador; condições climáticas que impeçam operação; eficiência do desmonte e preparação das frentes de lavra. Podemos calcular a utilização da seguinte forma:

$$U = \frac{Ht}{(Hp - Hr)}$$

Onde Ht são as Horas Efetivas Trabalhadas, Hp as Horas Horizontes levando em conta a manutenção mecânica e Hr as Horas de Reparo (SILVA,2011).

1.9..8 Rendimento

O rendimento relaciona a disponibilidade física com a utilização física, e pode ser calculado multiplicando o resultado desses dois fatores.

1.9..9 Eficiência de Operação

O ritmo da produção deve ser mantido constante para obter-se uma maior lucratividade. Os fatores que mais afetam o desempenho dos equipamentos são: as

características do material, supervisão do trabalho, espera no britador, falta de equipamento de transporte, nível de habilidade do operador interrupções para a limpeza da frente de lavra, desmonte de rochas, capacidade da caçamba e pequenas interrupções devido aos defeitos mecânicos, não computados na manutenção. Segundo Silva (2011) podemos calcular a eficiência pela seguinte fórmula:

$$E = \frac{1}{1 + \sum \frac{Tp}{TCmin}}$$

Caso $Tp = 0$, Eficiência é 100%

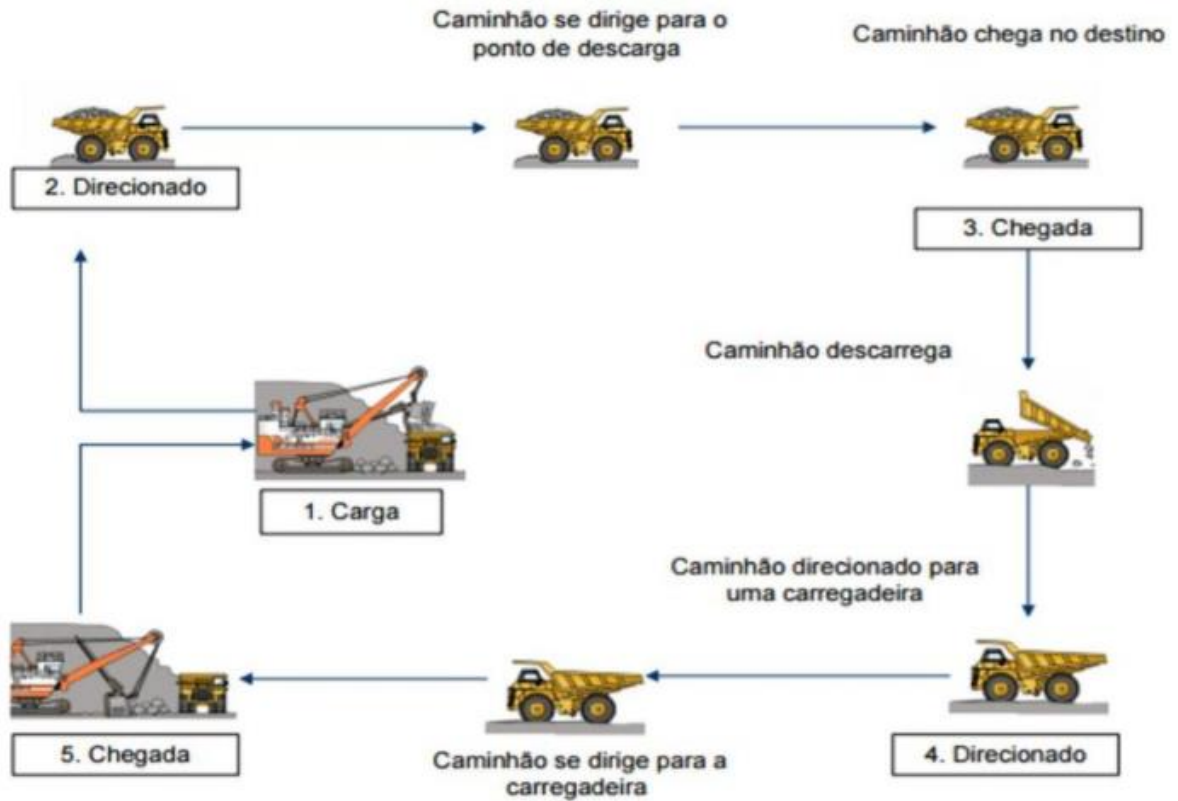
$Tp \neq 0$, Eficiência é menor que 100%

1.9..10 Tempo de Ciclo

Tempo que um equipamento gasta para completar um ciclo de operação (Figura 22), voltando ao seu estado inicial. No caso dos caminhões, em um período de tempo, seu ciclo seria: carregamento, transporte cheio, manobra para bascular, basculamento, transporte vazio e manobra para carregar.

De acordo com Silva (2011), o ciclo de operação pode ser dividido em seis etapas: carregamento, transporte, descarga, retorno, posicionamento e atraso.

Figura 22 – Tempo de Ciclo Caminhão



Fonte: Mariz, 2019

1.9.11 Eficiência Geral do Equipamento

A eficiência geral do equipamento, “*Overall Equipment Effectiveness*”, teve seu início na Toyota, criada por Seichi Nakajima. É uma ferramenta composta por três categorias: performance, disponibilidade e qualidade.

A performance relaciona-se com o tempo de ciclo dos equipamentos, a disponibilidade relaciona-se a Utilização e Disponibilidade, e a qualidade com os materiais fora das especificações exigidas. (TGN BRASIL, 2016).

A partir de uma análise simplificada, o OEE, nos permite indicar áreas que necessitam de mudanças. Observando as perdas resultantes das variabilidades dos equipamentos, podemos determinar em qual direção seguir para resolver e sanar os problemas. Sendo as perdas, o fator mais importante para cálculo da eficiência global.

Para tal cálculo, devemos analisar os fatores essenciais abaixo (Figura 23): quebras, setup e ajustes, ociosidades e pequenas paradas, redução de velocidade, defeitos de qualidade e retrabalho, e startup. Ao quantificarmos quanto essas perdas estão influenciando no processo, podemos calcular o OEE, sendo que devemos buscar como meta minimizar os Setup e Startup, e zerar os demais parâmetros:

$$OEE = Disponibilidade \times Performace \times Qualidade$$

Figura 23 – Eficiência Global dos Equipamentos



Fonte: Fidelis, 2017

1.9..12 Resistência e Coeficiente de Rolamento

A manutenção efetiva das pistas de rolagem é de suma importância, uma vez que garantem a segurança operacional e permitem uma velocidade ideal de trabalho, além de reduzir os gastos com pneus.

Podemos definir resistência de rolamento como a força necessária para superar o atrito interno dos rolamentos. Em unidades com rodas pneumáticas, a força necessária para superar o retardamento entre o pneu e o solo (resistência gerada pela penetração dos

pneus no solo e o flexionamento do pneu exercido pela carga). Pode ser calculada pela fórmula:

$$Rr = K \times PBV$$

Onde Rr é a Resistência ao Rolamento, K o Coeficiente de Rolamento e PBV o Peso Bruto do Veículo.

1.9..13 Resistência da Rampa

Força necessária que o equipamento deve realizar para superar o aclive de uma rampa, locomovendo contra a gravidade no eixo Fx. Para realizar o caminho inverso, declive, a força atua na mesma direção, ajudando o equipamento a se locomover.

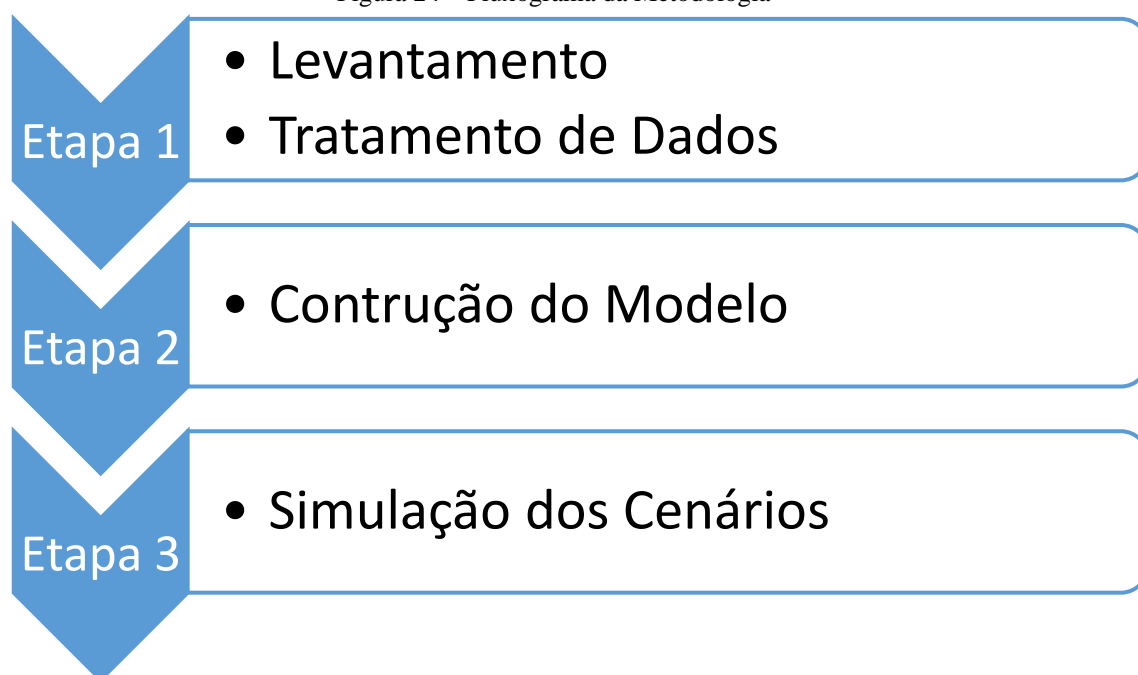
Segundo Souza (2021) o valor da inclinação de rampa (grade) é dado em porcentagem, e relaciona a distância que se locomove na horizontal para atingir certa altura, vertical. Pode-se calcular a resistência de rampa pela seguinte fórmula:

$$RR = FRR \times PV$$

Onde FRR é o Fator de Resistência da Rampa e PV o Peso da Máquina (t).

2 METODOLOGIA

Figura 24 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: acervo do autor, 2021

O caminhão articulado Volvo A45F®, foi testado inicialmente para suprir a baixa disponibilidade física dos caminhões articulados Volvo A60H®, o que impactava diretamente nos custos da operação e manutenção da mineradora em estudo.

Para alcançarmos nossos objetivos definimos utilizar o software para simulação de eventos discretos, Delphos Open Pit Simulator®. Posteriormente foi realizado o levantamento e tratamento dos dados, para construir um modelo computacional que retratasse a realidade operacional. Logo, testes computacionais foram realizados para compreender o processo (Figura 24).

2.1 Levantamento e Tratamento de Dados

Os dados para utilização no Delphos Open Pit Simulator® (DSIM), foram coletados através do programa de despacho Smart Mine®; o setor de Geologia e Planejamento de Mina forneceram a topografia da mina (arquivo em formato DXF); e as

rotas dos equipamentos de transporte foram criadas manualmente, igualando assim a distância média de transporte (DMT) para os dois equipamentos de transporte e observando os acessos da topografia.

A massa transportada pelos caminhões foram as mesmas especificadas pela Volvo®, e da escavadeira, operando no estéril, uma capacidade de 8,3 toneladas (densidade média estéril de 1,95g/cm³). Como a empresa em estudo possui no devido momento, somente um caminhão Volvo A45F®, os valores utilizados para que se obtivesse uma frota de 3 caminhões, foram estipulados, em 5% para mais e 5% para menos dos valores do equipamento existente.

Os demais dados, como velocidade média, tempo de carregamento, tempo de manobra e basculamento, e os índices da manutenção (MTBF e MTTR) e gastos de diesel foram obtidos por valores médios medidos mensalmente. Para eliminarmos valores discrepantes, *outliers*, todos os dados utilizados foram revisados.

2.2 Construção do Modelo

A simulação do evento foi criada no *software* DSIM, seguindo o manual do programa. As rotas foram escolhidas devida a grande movimentação de estéril nessas áreas, com a frente de lavra na cava central e a descarga na pilha de rejeito sul e pilha de rejeito norte, a massa lavrada de estéril não afetou a simulação.

Para a frota de caminhões, como citado acima, foram imputados 3 caminhões A60H com capacidade para 55 toneladas e 3 caminhões A45F com capacidade de 41 toneladas, e duas escavadeiras ST750H com capacidade de 8,3 toneladas. O tempo médio entre manutenções e tempo médio de reparo (Tabela 3), foram obtidos no SmartMine, do período de 01 de Janeiro de 2021 até 01 de Março de 2021, assim como o restante dos dados para realização das médias.

Tabela 2 – Tempo médio entre manutenções e reparo

Volvo A45						
Equipamento	Horas Efetivas (hef)	Horas Trabalhadas (h)	Horas Manutenção Corretiva (h)	Número de Falhas	MTBF (h)	MTTR (h)
CA07	783:04:17	942:22:33	37:34:36	3	314,13	12,53
Total:Volvo A45	783:04:17	942:22:33	37:34:36	3	314,13	12,53
Volvo A60H						
Equipamento	Horas Efetivas (hef)	Horas Trabalhadas (h)	Horas Manutenção Corretiva (h)	Número de Falhas	MTBF (h)	MTTR (h)
CA04	511:02:50	648:58:24	302:13:16	24	27,04	12,59
CA05	688:13:45	848:25:28	72:03:34	14	60,60	5,15
CA06	724:29:56	881:11:55	50:07:21	8	110,15	6,27
Total:Volvo A60H	1923:46:31	2378:35:47	424:24:11	46	51,71	9,23
ESC SANY SY750H						
Equipamento	Horas Efetivas (hef)	Horas Trabalhadas (h)	Horas Manutenção Corretiva (h)	Número de Falhas	MTBF (h)	MTTR (h)
ESC49	668:52:57	994:49:11	08:48:38	5	198,96	1,76
ESC50	704:57:45	987:40:28	10:58:41	5	197,53	2,20
Total:ESC SANY SY750H	1373:50:42	1982:29:39	19:47:19	10	198,25	1,98

Fonte: acervo do autor, 2021

Para as frotas de caminhões, o tempo médio de carregamento (Tabela 4 e 5) foi calculado em relação a escavadeira em estudo, obtendo os seguintes valores:

Tabela 3 – Tempo Médio de Carregamento Volvo A60H

ESC SANY SY750H	
Tipo de Movimentação	Tempo Médio de Ciclo Carregamento (min.)
F.Lavra x P.Estéril	2,11

Fonte: acervo do autor, 2021

Tabela 4 – Tempo médio de Carregamento Volvo A45F

ESC SANY SY750H	
Tipo de Movimentação	Tempo Médio de Ciclo Carregamento (min.)
F.Lavra x P.Estéril	1,34

Fonte: acervo do autor, 2021

Após adicionado todos os equipamentos no circuito, foram definidas as velocidades máximas, de acordo com levantamento realizado em campo e assinalado pelos instrutores de trânsito, velocidade essa de 30km/h para o equipamento carregado e 35km/h para o caminhão vazio. O tempo de manobra vazio e cheio, em média, é de 30 segundos, e o consumo de combustível (diesel) para o modelo A60H é de 31l/h, enquanto que do modelo A45F é de 21l/h.

Para maior fidelidade ao plano, foram realizadas 100 réplicas para cada cenário, comparando os resultados obtidos com os resultados obtidos em campo. Atrasos operacionais e impedimentos operacionais foram levados em consideração (fila, troca de turno, lanche, etc.).

2.3 Simulação dos Cenários

Oito cenários, com 6 caminhões e 2 escavadeiras foram simulados:

- Cenário 1: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A60H destinados para cava Norte, carregando estéril.
- Cenário 2: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A45F destinados para cava Norte, carregando estéril.
- Cenário 3: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A60H destinados para cava Sul, carregando estéril.
- Cenário 4: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A45F destinados para cava Sul, carregando estéril.
- Cenário 5: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A45F e três Volvos A60H destinados para cava Sul, carregando estéril.
- Cenário 6: uma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três Volvos A45F e três Volvos A60H destinados para cava Norte, carregando estéril.
- Cenário 7: duas escavadeiras Sany SY750H alocadas na cava central, com três Volvos A45F destinados para cava Norte e três Volvos A60H destinados para cava Sul, carregando estéril.
- Cenário 8: duas escavadeiras Sany SY750H alocadas na cava central, com três Volvos A45F destinados para cava Sul e três Volvos A60H destinados para cava Norte, carregando estéril.

2.4 Características Gerais – Extração de Estéril

Com quatro cavas para operação: norte, central, sul e leste, a maior parte do minério e estéril são oriundos da cava central e norte.

O minério extraído, a depender do teor e suas características, é levado para quatro pilhas de ROM: na pilha 1 se encontra o material rico, na pilha 2 a canga (intermediário), pilha 3 o material pobre e pilha 4 o material assoreado.

O estéril extraído, para liberar a lavra do minério, é destinado para as Pilhas de Estéril, localizadas nas cavas. Para tal operação em estudo, são utilizadas duas escavadeiras Sany SY750H®, três caminhões articulados Volvo A60H® e três caminhões Volvo A45F® (Tabela 5). Outros equipamentos utilizados na mina para extração de estéril são a escavadeira Volvo EC480D®, caminhão articulado Volvo A40F® e caminhão fora de estrada Sany SKT90S®. Como visto, a maior parte do material é friável,

sendo realizado seu desmonte de forma mecânica, apenas para regularização de alguns blocos (matacões) e materiais mais compactos é utilizado o rompedor.

A lavra do minério é realizada em três turnos de oito horas, em seis dias da semana, sendo um dia reservado para as manutenções preventivas. O estéril é dividido em 4 turnos, com 6 horas de operação em cada turno, nos mesmos dias em que ocorrem a lavra do minério. Essa divisão propicia maior utilização dos equipamentos de grande porte, que ficam alocados na lavra de estéril. A movimentação de estéril, se aproxima das 9 milhões de toneladas anuais, enquanto que o minério dos 6 milhões de toneladas anuais.

Tabela 5 – Equipamentos em estudo

Grupo de Equipamento Parâmetros								
Equipamento	Manutenção	Horas Paradas	Operando	Eficiencia	DF	UF	Produção	Prod. Efetiva
ESC 50T	01:57:15	25:39:23	72:11:00	16:41:53	99%	52%	162.852	600,15
Volvo A45F	26:14:00	112:35:00	333:47:00	20:43	95%	67%	98.955	296,47
Volvo A60H	123:14:00	395:46:00	869:20:00	19:51	92%	60%	214.096	246,28

Fonte: Acervo do autor, 2021.

3 ESTUDO DE CASO

Localizada entre os municípios de Congonhas e Ouro Preto (Figura 25), em Minas Gerais, a Ferro + Mineração (Figura 26) possui cerca de 530 colaboradores, pertence ao quadrilátero ferrífero, com foco na extração e beneficiamento de minério de ferro, possuindo uma capacidade de produção de minério de 5 milhões de toneladas por ano (FERRO+, 2021). O grupo J Mendes, dono da mineradora, possui mais uma mina ativa de minério de ferro, mina JMN, e mais duas minas em estudo, que terão operações iniciadas nos próximos anos.

Figura 25 – Localização Ferro + Mineração



Fonte: Google Maps, 2021

Figura 26 – Mina em estudo



Fonte: Acervo do autor, 2021.

O quadrilátero Ferrífero é a mais importante província mineral do sudeste do Brasil, localiza-se na região Centro Sul de Minas Gerais e estudos apontam que mais de 55 milhões de toneladas de minério de ferro foram explorados da região (Universidade Federal de Ouro Preto, 2021). Segundo Rosière e Chemale (2000) o quadrilátero é caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais onde afloram sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica, localizado na borda sul do Cráton do São Francisco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram providos de oito diferentes cenários, executados 100 réplicas de cada, para maior fidelidade ao plano, em um período de 24 horas cada replica.

A topografia do projeto, foi cedida pela mineradora Ferro +, sendo essa a maior dificuldade encontrada para rodar a simulação, devido a quantidade de curvas de nível apresentadas pela geologia.

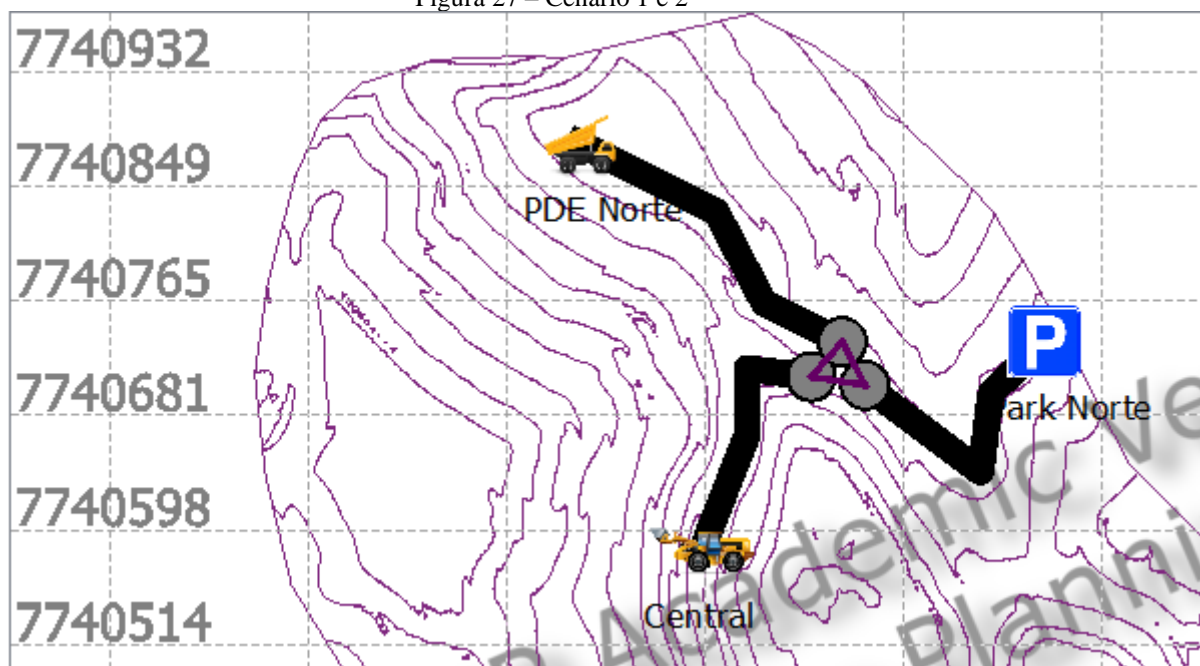
Outro fator importante, foi a escolha/criação das rotas. As mesmas foram feitas de forma manual, devido à alguns problemas encontrados nas rotas fornecidas pelos GPS's dos equipamentos, como está sendo instalados *Tablets* nos equipamentos como melhoria, estes ainda geram alguns erros. Para cada rota, foram considerados três caminhões, valor este que condiz com a realidade (três a quatro caminhões por frente de lavra), e em quatro cenários foram utilizados seis caminhões para analisar as perdas que podem ser geradas.

Nos oito cenários apresentados, podemos estudar as falhas que ocorrem nos equipamentos, a massa transportada, as perdas operacionais, a compatibilidade entre equipamento de carga e transporte, etc. Podemos analisa-los em pares 1/2, 3/4, 5/6 e 7/8, visto que a rota são as mesmas, o que difere são os caminhões e suas alocações.

4.1 Cenário 1 e Cenário 2 – Estéril

Como apresentado anteriormente, os cenários 1 e 2 são retratados por uma escavadeira Sany SY750H® alocada na cava central, com três caminhões (Figura 27), em cada cenário, transportando estéril para a pilha de estéril norte (PDE Norte).

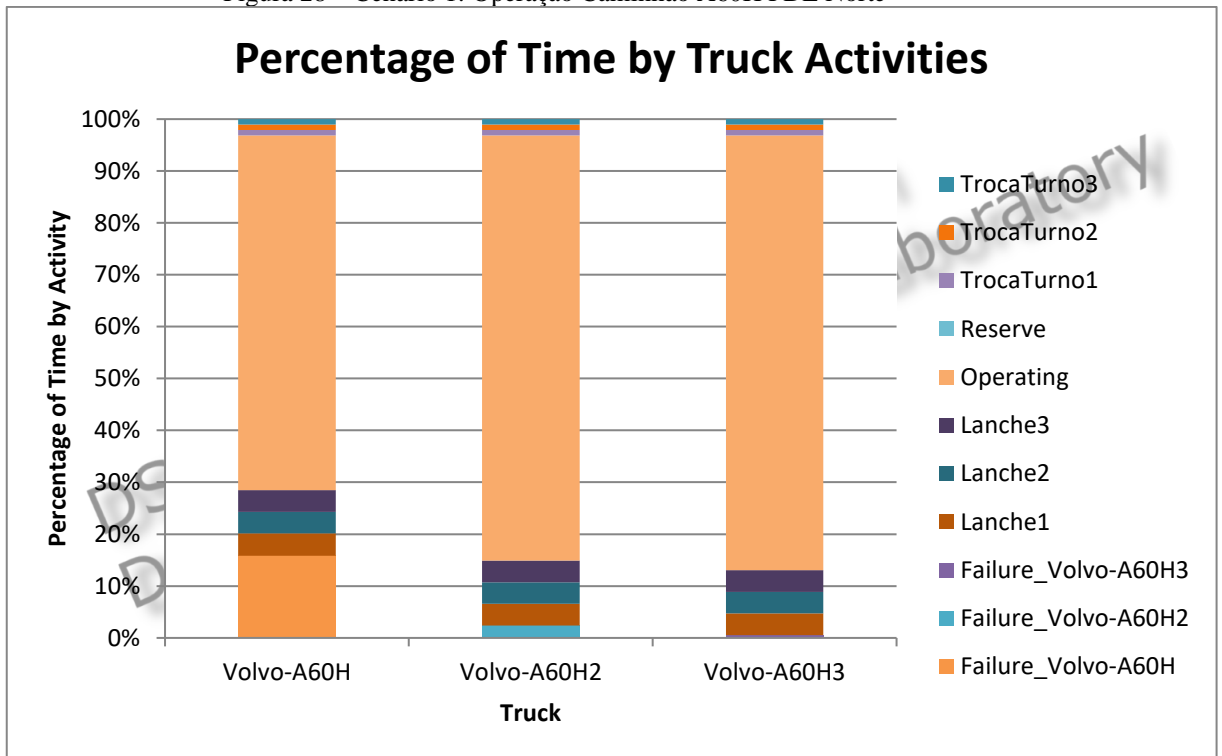
Figura 27 – Cenário 1 e 2



Fonte: Simulação do autor, 2021.

O primeiro cenário, com caminhões A60H, obtivemos uma operação de 78% da frota (Figura 28), e uma média de 6,2% em falhas, com uma velocidade média de 10,35km/h. A escavadeira operou em 79% do tempo, carregando uma massa de 3529 toneladas. O tempo de lanche e falhas são constantes para os dois cenários, em torno de 4,2% para o primeiro e 1,05% para o segundo.

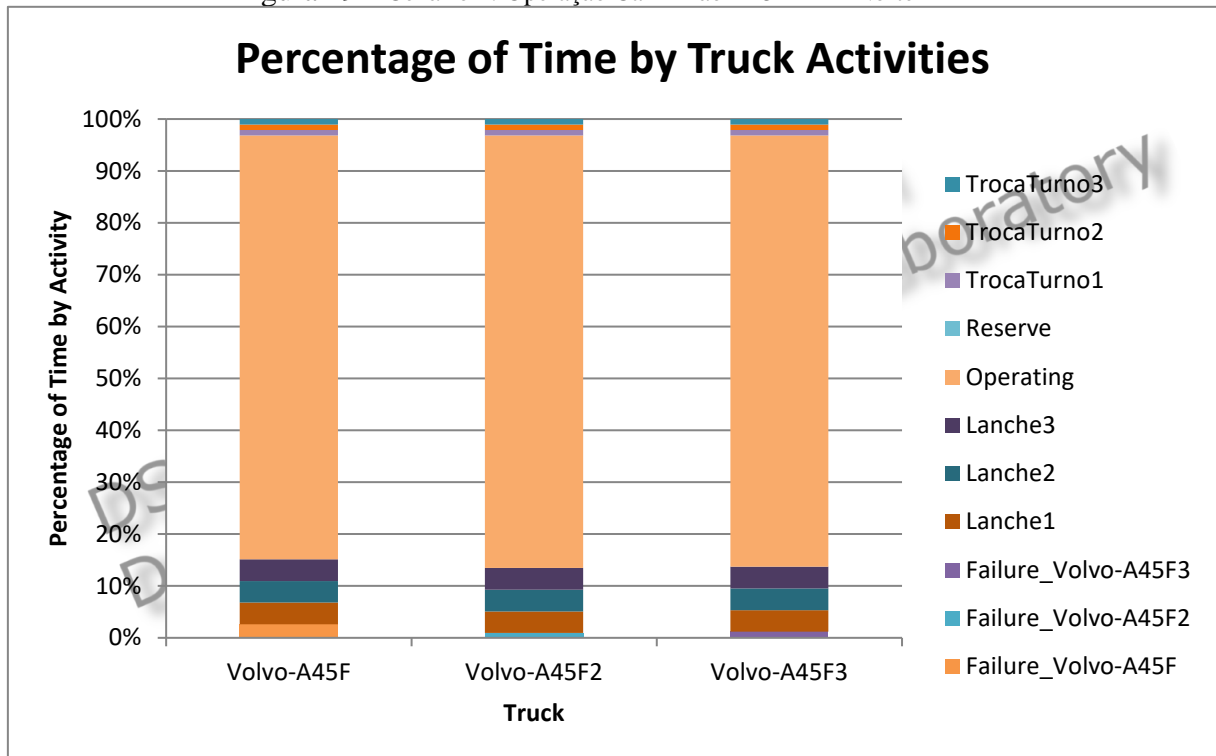
Figura 28 – Cenário 1: Operação Caminhão A60H PDE Norte



Fonte: Simulação do autor, 2021.

Para o segundo cenário, caminhões A45F, obtivemos uma operação (utilização) de 82,7% dos caminhões (Figura 29) e uma média de 1,56% em falhas. A escavadeira operou em 82% do tempo, carregando uma massa total de 5101 toneladas. Uma velocidade média de 12,3km/h.

Figura 29 – Cenário 2: Operação Caminhão A45F PDE Norte

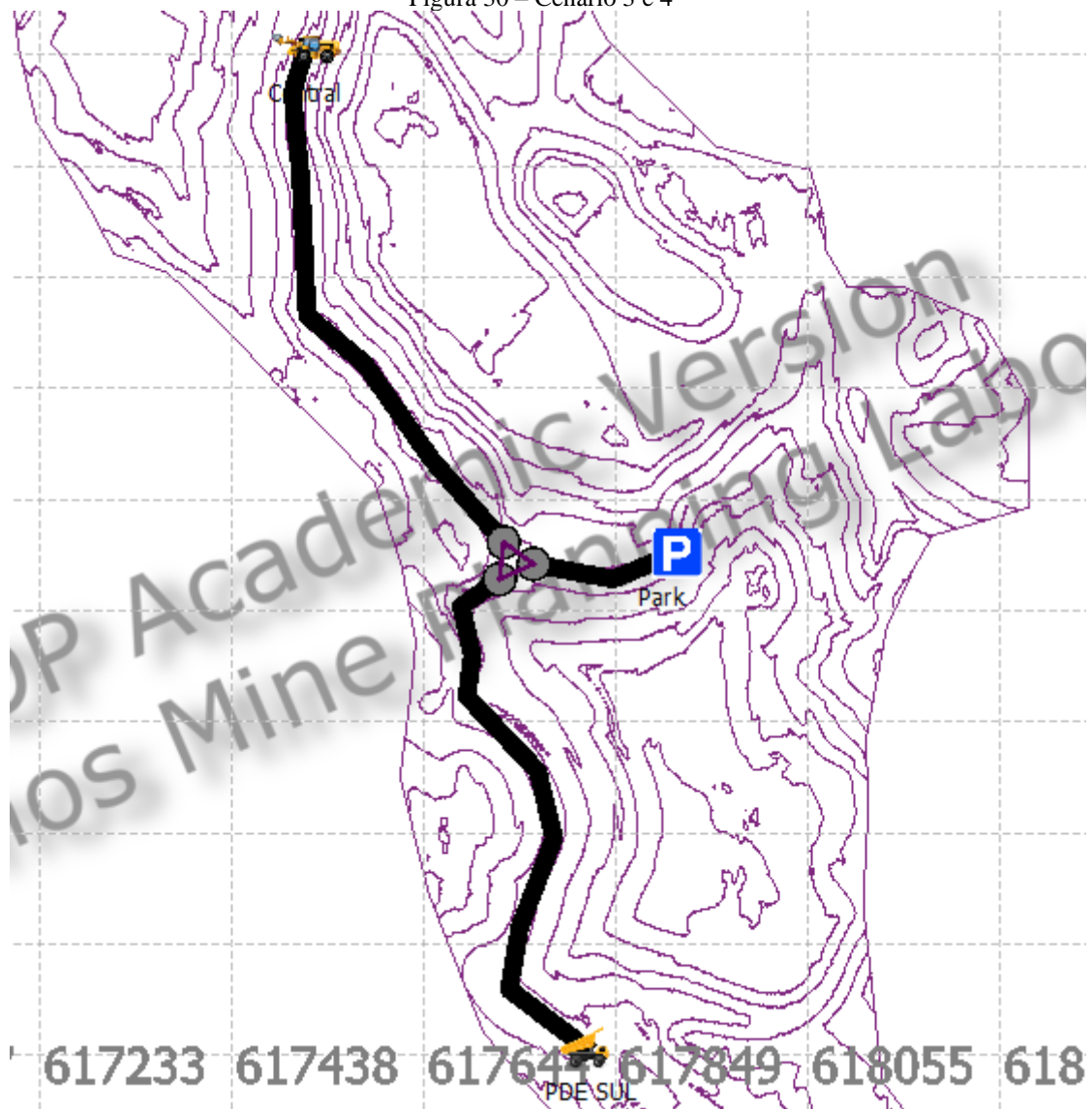


Fonte: Simulação do autor, 2021.

4.2 Cenário 3 e Cenário 4 - Estéril

Para os cenários 3 e 4, utilizamos a mesma escavadeira Sany SY750H alocada na cava central, com três caminhões de cada modelo transportando o estéril com destino a cava sul. Esta rota (Figura 30) possui uma maior distância entre o ponto de carregamento e basculamento, em relação aos cenários 1 e 2.

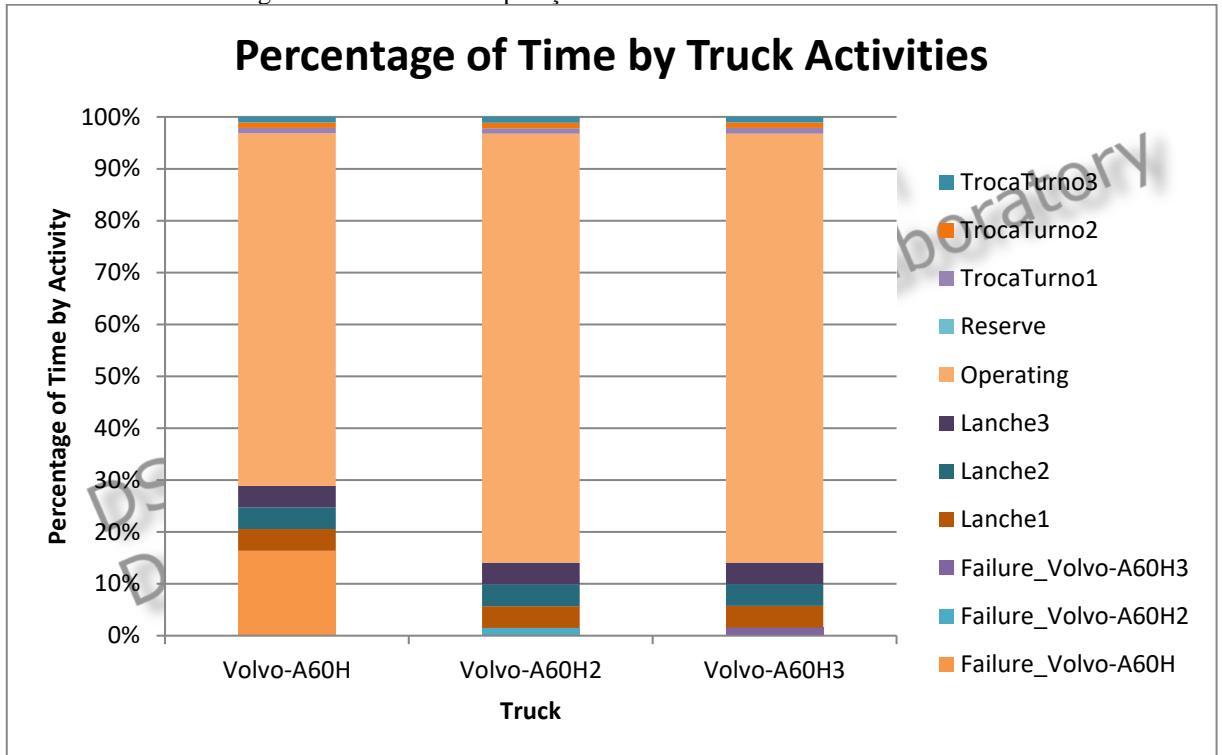
Figura 30 – Cenário 3 e 4



Fonte: Simulação do autor, 2021.

No terceiro cenário, utilizando os caminhões A60H, os caminhões estiveram operando em 77,7% do tempo (Figura 31), e 6,5% estiveram fora de circulação devido a problemas de manutenção, e suas velocidades médias foram de 18,3km/h. A escavadeira operou em 66% do tempo, movimentando uma massa de 2892 toneladas. Novamente o tempo de lanche e falhas foram constantes para os dois cenários, em torno de 4,2% para o primeiro e 1,05% para o segundo.

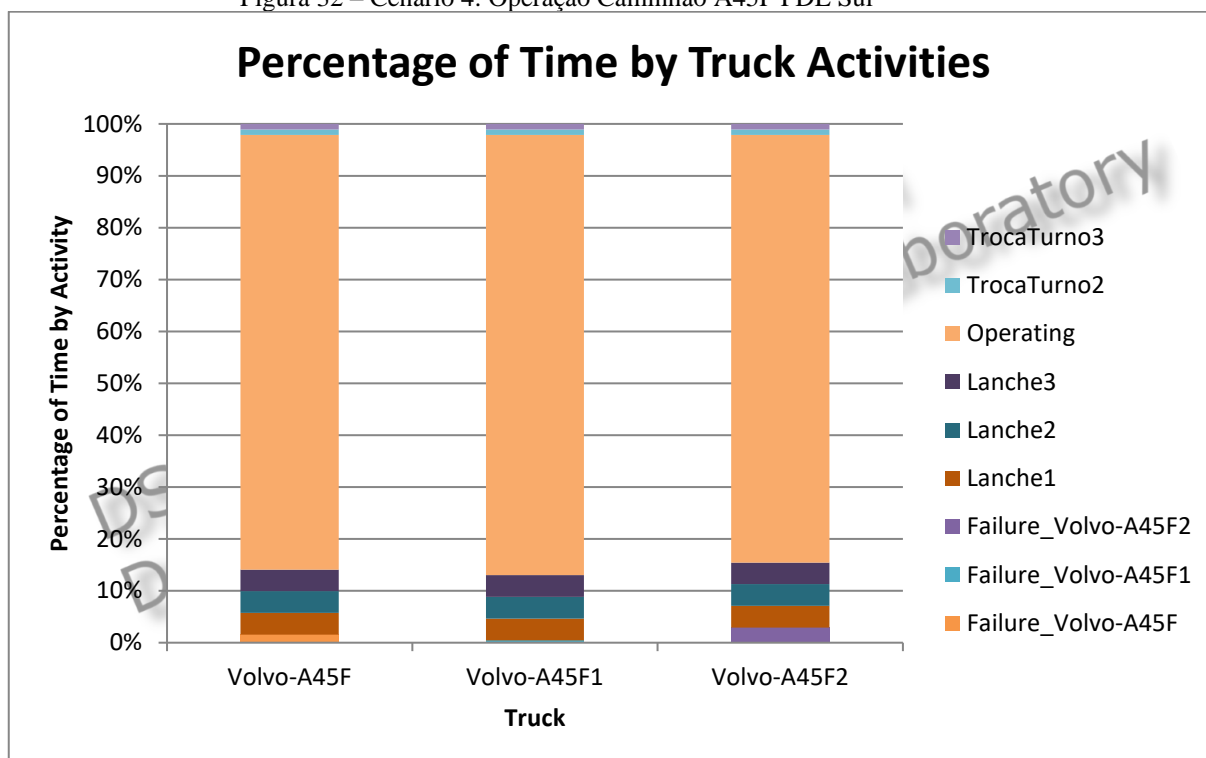
Figura 31 – Cenário 3: Operação Caminhão A60H PDE Sul



Fonte: Simulação do autor, 2021.

No quarto cenário, utilizando caminhões A45F, obtivemos uma operação de 84% dos caminhões (Figura 32) e uma média de 1,64% em falhas, e uma velocidade média de 19,41km/h. A escavadeira operou em 57% do tempo, devido à grande distância do trajeto e o pouco número de caminhões no sistema, carregando uma massa total de 3341 toneladas.

Figura 32 – Cenário 4: Operação Caminhão A45F PDE Sul



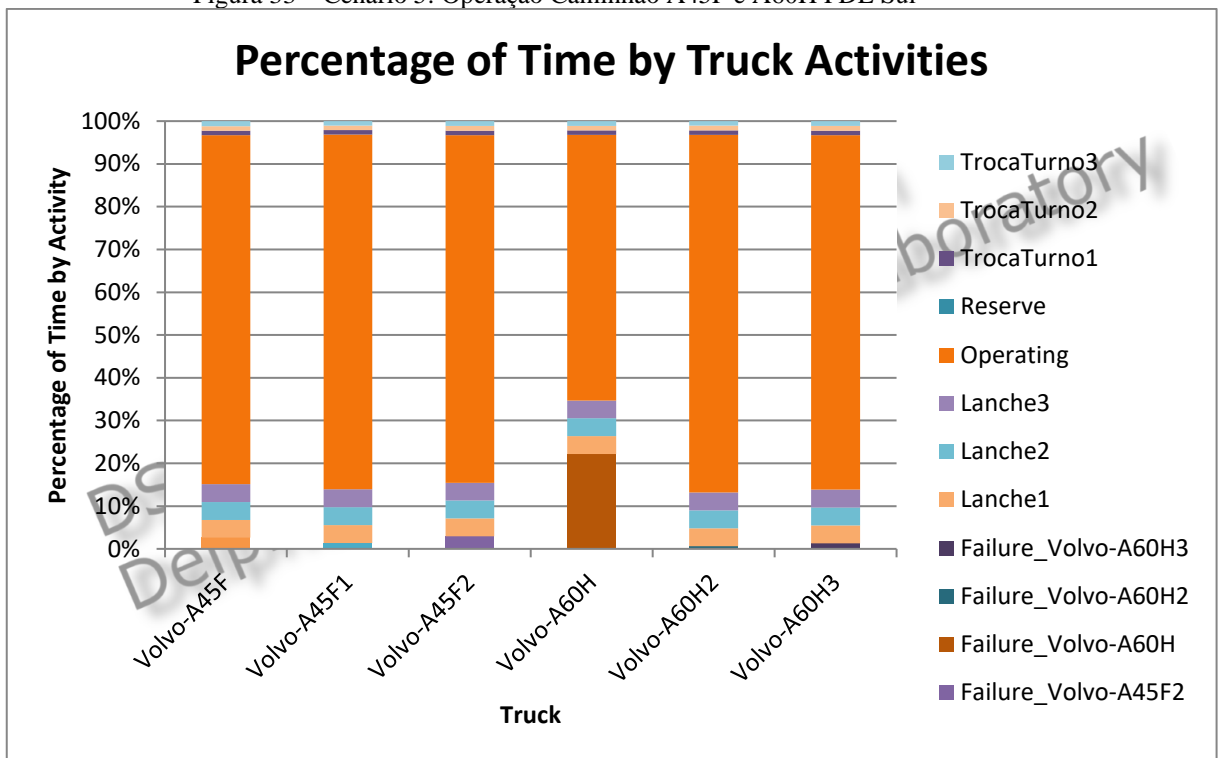
Fonte: Simulação do autor, 2021.

4.3 Cenário 5 e Cenário 6 - Estéril

O cenário 5 é representado pelos dois modelos de caminhões (três caminhões A60H e três caminhões A45F) transportando estéril para a PDE Sul, sendo carregados na cava central pela escavadeira Sany SY750H.

Os caminhões A45F estiveram operando em 82% do tempo (Figura 33), e 2,3% estiveram fora de circulação, suas velocidades médias foram de 14,2km/h. Os caminhões A60H operaram em 76%, e 8% do tempo em manutenção. A escavadeira operou em 82,5% do tempo, movimentando uma massa de 4230 toneladas. Horário de lanche e falhas foram constantes para os dois cenários, em torno de 4,2% para o primeiro e 1,05% para o segundo.

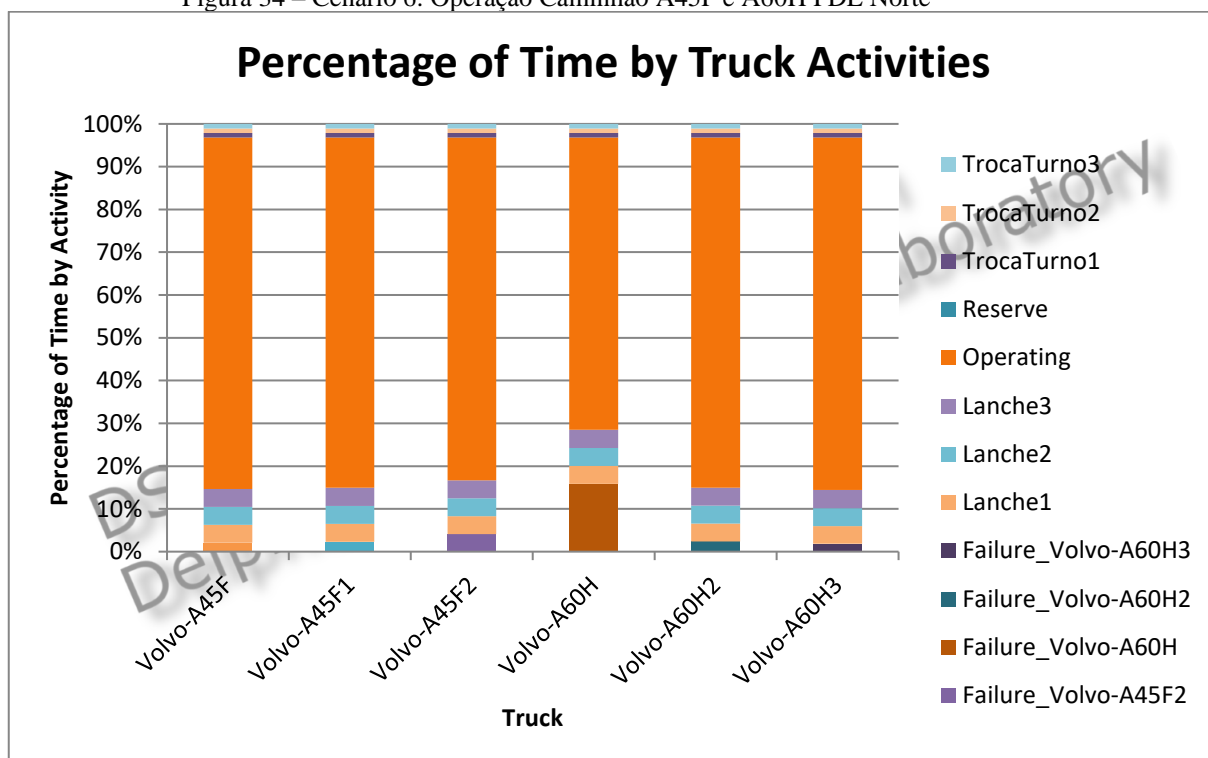
Figura 33 – Cenário 5: Operação Caminhão A45F e A60H PDE Sul



Fonte: Simulação do autor, 2021.

Para o cenário 6, mantivemos os mesmos equipamentos, porém a carga foi destinada a PDE Norte. O modelo A45F esteve operando em 81,3% do tempo (Figura 34), e 8,5% estiveram fora de circulação, suas velocidades médias foram de 5,91km/h. Os caminhões A60H operaram em 77,5% e estiveram em 6,7% do tempo em manutenção. A escavadeira operou em 83% do tempo, movimentando uma massa de 4248 toneladas.

Figura 34 – Cenário 6: Operação Caminhão A45F e A60H PDE Norte

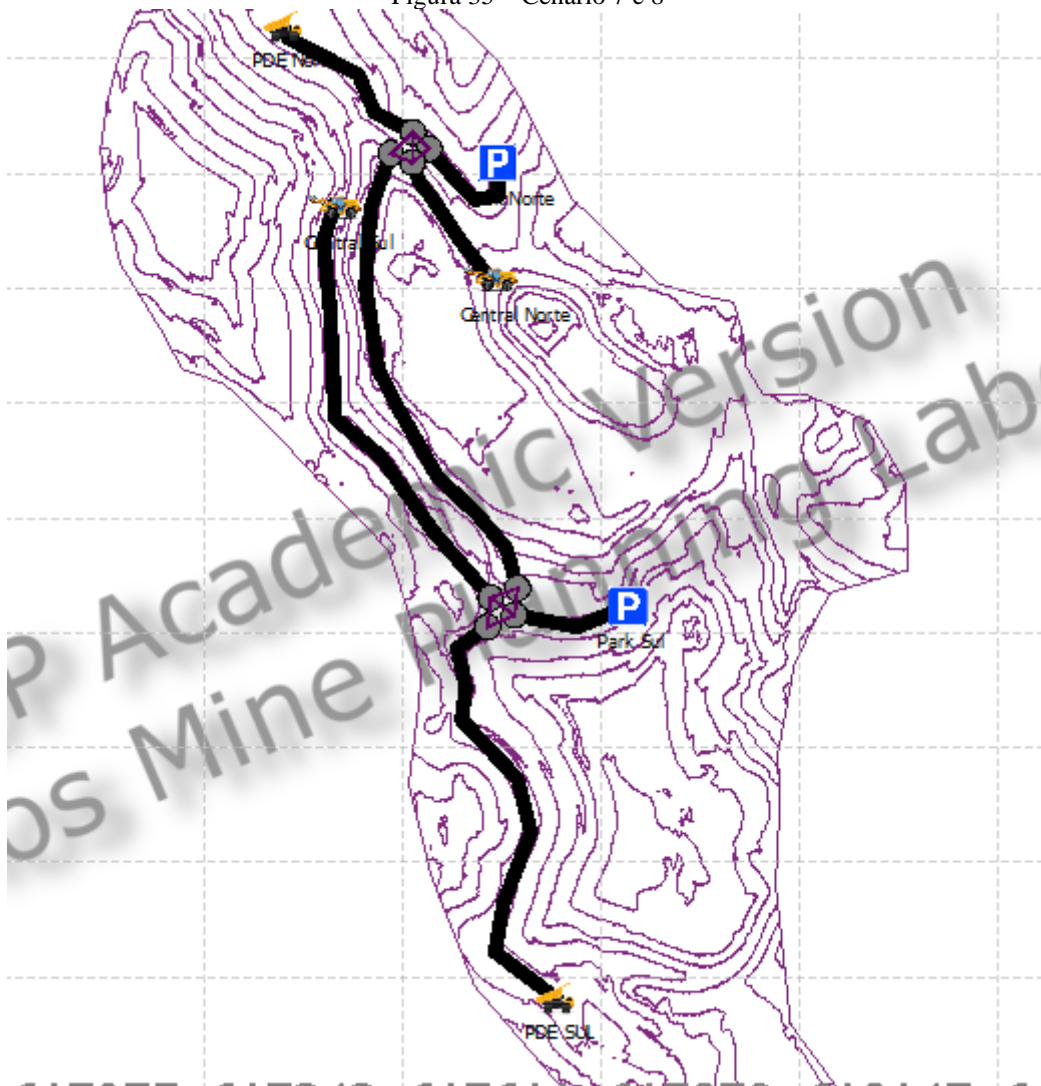


Fonte: Simulação do autor, 2021.

4.4 Cenário 7 e Cenário 8 – Estéril

Nos próximos cenários, foi criado uma rota da cava central para a PDE Norte e outra da cava central para a PDE Sul, interligadas por uma rota central. Duas escavadeiras de mesmo porte foram alocadas na cava central, carregando três caminhões A45F e três caminhões A60H (Figura 35).

Figura 35 – Cenário 7 e 8

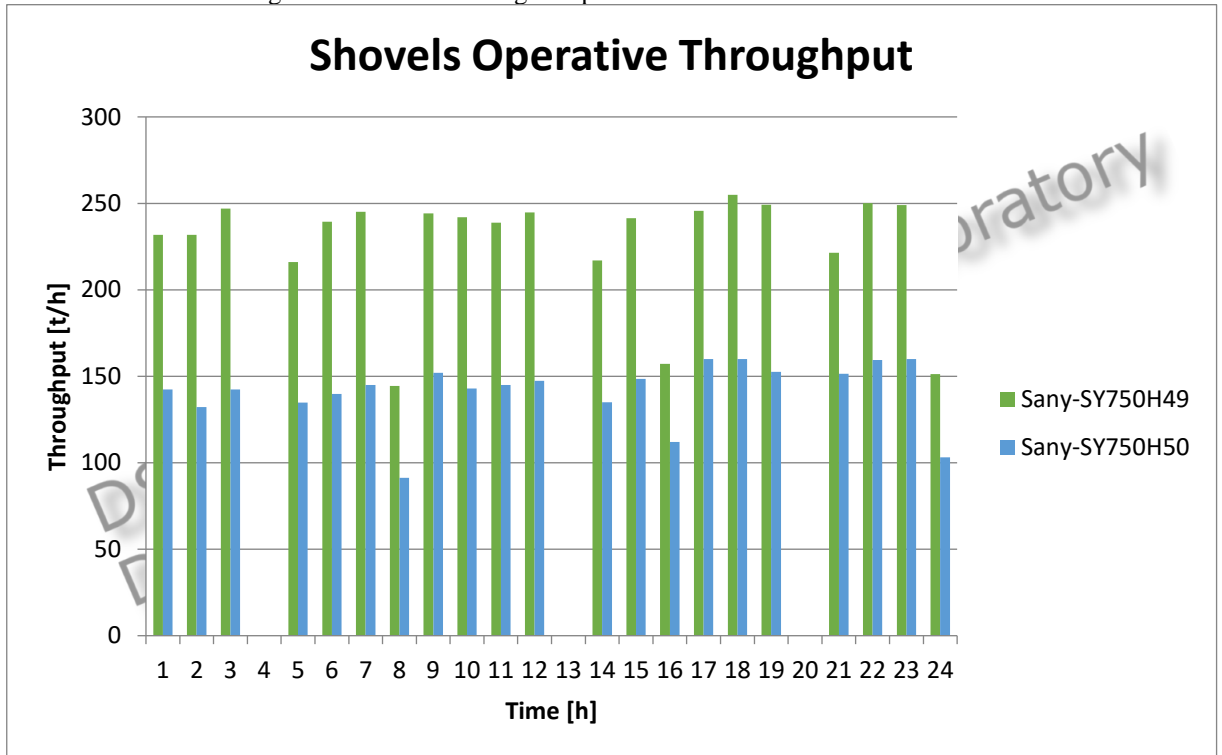


Fonte: Simulação do autor, 2021.

No cenário 7, alocamos a escavadeira Sany SY750H 49 na cava central, carregando os caminhões A45F, que transportam o estéril para a PDE Norte. A outra escavadeira, Sany SY750H 50, de mesmo porte, carrega os caminhões A60H na cava central com destino a PDE Sul (Figura 36).

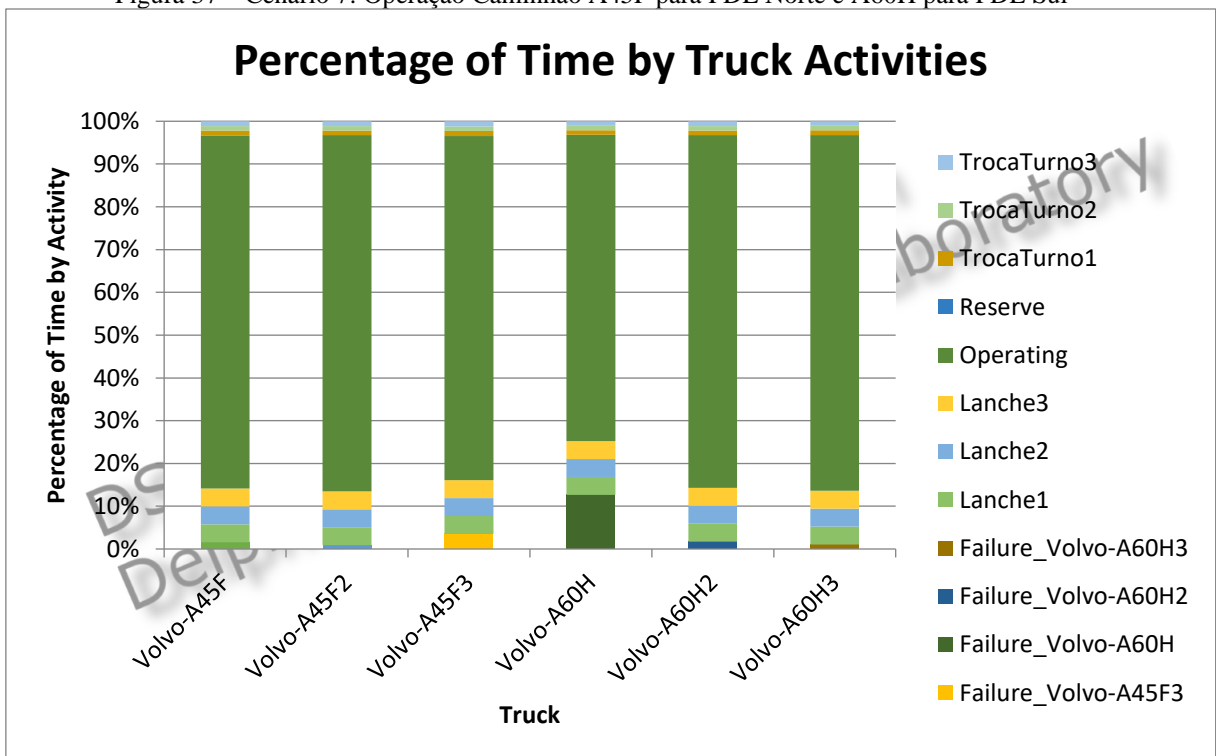
. O modelo A45F operou em 82% do tempo, e 1,99% estiveram fora de circulação, sua velocidade média foi de 12,6km/h. Os caminhões A60H foram utilizados em 79% e estiveram em 5,1% do tempo em manutenção (Figura 37) e sua velocidade média foi de 18,3km/h. As escavadeiras foram utilizadas em 73% do tempo, movimentando uma massa de 7719 toneladas.

Figura 36 – Massas carregadas pelas escavadeiras 49 e 50



Fonte: Simulação do autor, 2021.

Figura 37 – Cenário 7: Operação Caminhão A45F para PDE Norte e A60H para PDE Sul

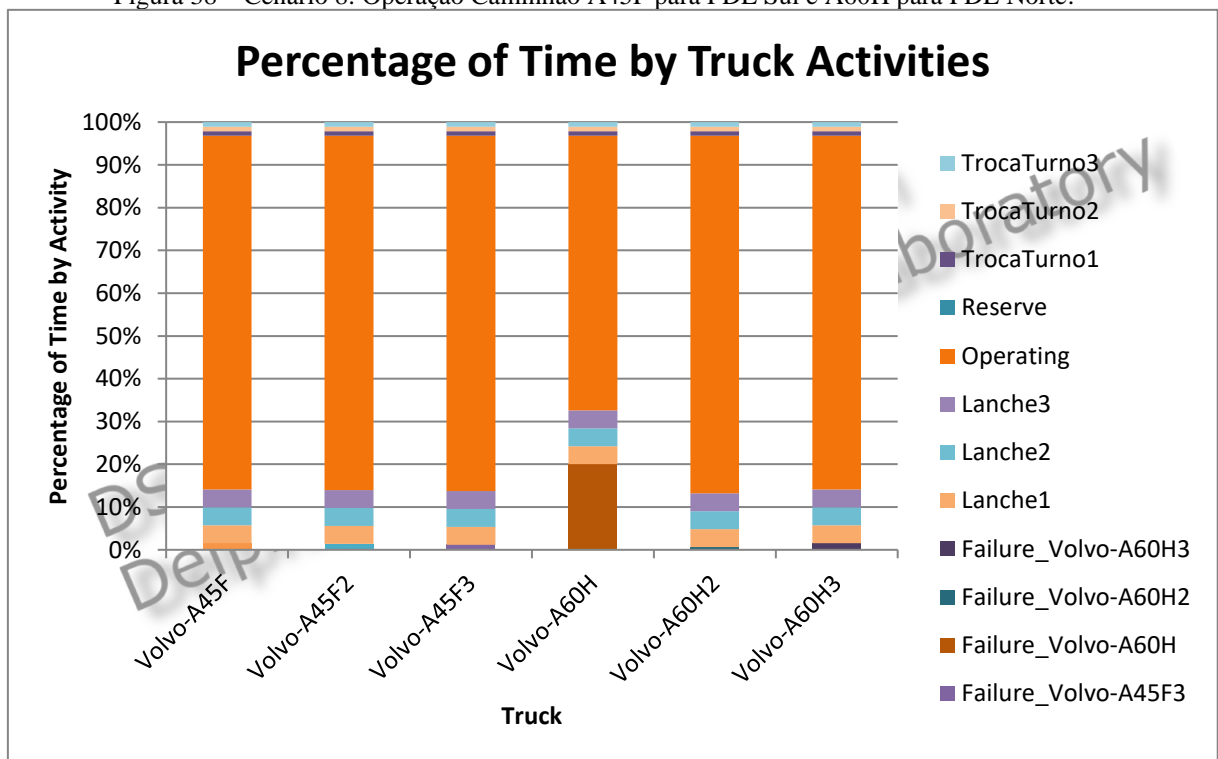


Fonte: Simulação do autor, 2021.

Por fim, o cenário 8, alocou-se a escavadeira Sany SY750H 49 na cava central, carregando os caminhões A60H, transportando estéril para a PDE Norte. A outra escavadeira, Sany SY750H 50, carrega os caminhões na cava central com destino a PDE Norte.

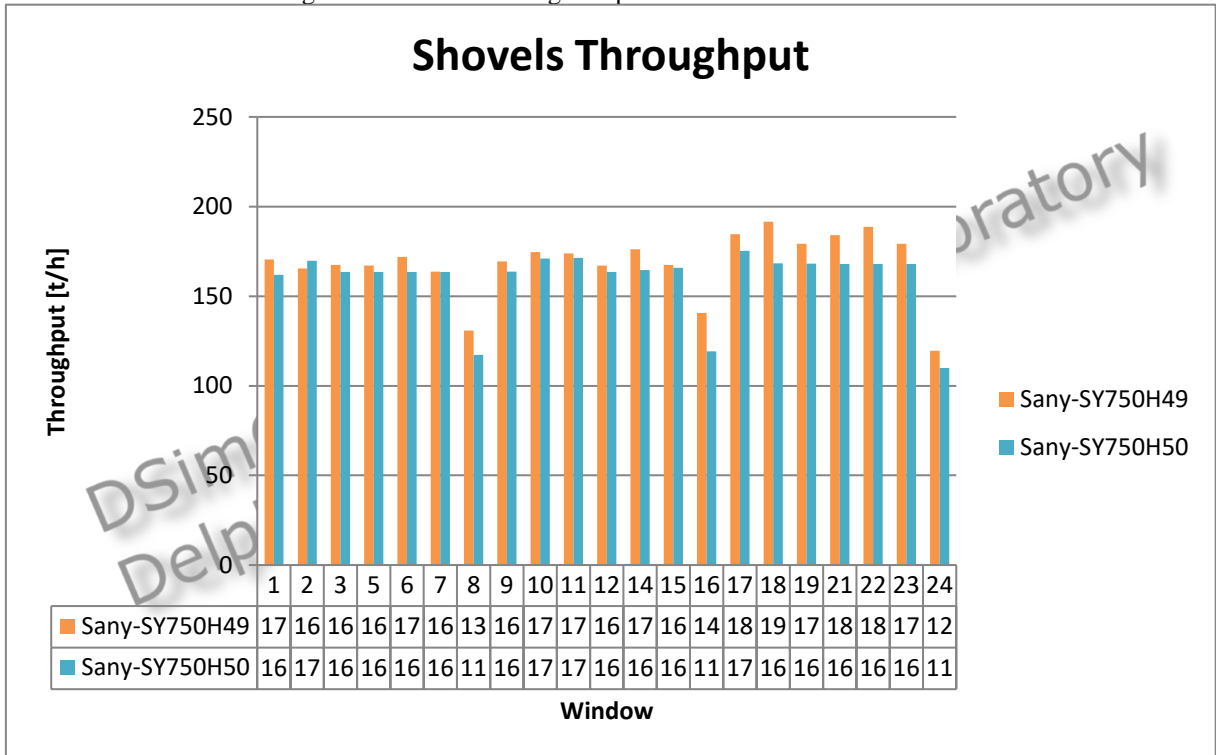
A45F operou em 83% do tempo, enquanto esteve parado 1,3%, sua velocidade média foi de 19,4km/h. Os caminhões A60H foram utilizados em 77% e em 7,4% do tempo estiveram em manutenção (Figura 38) e com uma velocidade média de 10,6km/h. As escavadeiras foram utilizadas em 68% do tempo, movimentando 6903 toneladas (Figura 39).

Figura 38 – Cenário 8: Operação Caminhão A45F para PDE Sul e A60H para PDE Norte.



Fonte: Simulação do autor, 2021.

Figura 39 – Massas carregadas pelas escavadeiras 49 e 50.



Fonte: Simulação do autor, 2021.

CONCLUSÃO

Para realizar a compra de um caminhão de menor porte, Volvo A45F®, a mineradora em estudo realizou um estudo prévio, comparando os gastos com diesel, manutenção e produção com o Volvo A60H®. Obteve-se então os custos com manutenção, devido à baixa DF dos caminhões A60H, e os gastos energéticos dos dois equipamentos, sendo que o caminhão de maior porte gasta 1,5l a mais por quilômetro.

Para comprovar o estudo realizado pela Ferro +, foi realizado simulações de eventos discretos no *software* DSIM, simulações estas que retratam a realidade operacional da mina. Em oito diferentes cenários, podemos comprovar a assertividade da mineradora, em adquirir o equipamento de menor porte, para transporte de estéril.

Mesmo com uma capacidade de carga menor, cerca de 14 toneladas a menos, o Volvo A45 possui maior velocidade de transporte, e uma maior disponibilidade física em relação ao Volvo A60. Sendo esses fatores fundamentais para a maior movimentação de massa alcançada em sete cenários, dos oito apresentados.

Nos cenários 1 e 2, tivemos uma massa de 1500 toneladas a mais transportada, e um ganho de 3% de operação, e 4,6% em tempo de manutenção.

Nos cenários 3 e 4, os caminhões percorrem uma distância maior em relação aos cenários anteriores, e possuem uma velocidade média maior devido a inclinação e linearidade do terreno. Tivemos uma massa de 450 toneladas a mais transportada, um ganho de 6,3% de operação, e 4,9% em tempo de manutenção.

Ao alocar os dois caminhões no mesmo sistema, cenários 5 e 6, mesmo percorrendo uma maior distância no sexto cenário, a produção dos caminhões foram maiores. Isto pode ter acontecido devido a problemas com filas no menor trajeto (Norte), ocorrendo um superdimensionamento da frota.

Nos últimos cenários, podemos confirmar a assertividade da empresa ao realizar a compra do equipamento de menor porte. Ao alocar o A45F na rota de menor distância (PDE Norte), obtivemos uma produção de 7719 toneladas, e quando mudamos esse caminhão para a rota de maior distância, a produção caiu para 6903. Porém, ao analisarmos, a produção separadamente, vimos no cenário 7 uma discrepância entre os valores de massa transportados, com o caminhão A45 transportando 4745 toneladas e o A60 2941 toneladas; já no cenário oito não temos essa alta variabilidade de massa transportada, com o A60 transportando 3532 toneladas e o A45 3347 toneladas, único

cenário onde este modelo de equipamento transporta uma maior massa, devido à distância de transporte.

Ao analisarmos todos os cenários acima, e toda descrição tecida ao longo do trabalho, podemos concluir que a tomada de decisão realizada pela mineradora de forma empírica, ao comprar um equipamento de menor porte, foi correta. Tendo essa decisão comprovada pelas simulações computacionais realizadas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARTHOLOMEW-BIGGS, M., ZUO, M. J., LI, X. **Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance.** Reliability Engineering and System Safety, 94, 53– 62, 2009.

BAŞÇETIN, A.; ÖZTAŞ, O.; KANLI, A. İ. **A new development software for equipment selection in mining engineering.** South-African Institute of Mining and Metallurgy, South-Africa, p. 28 - 44, 2006.

BOTELHO, Anneliese Honscha. **Influência da operação de desmonte de rochas no carregamento de material fragmentado.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica. Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/118836/000969156.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 dez. 2020.

BORGES, Thiago Campos. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração.** 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

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

CATTERPILAR. **Tratores de Rodas 824K.** Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-dozers/wheel-dozers/18591262.html . Acesso em: 10 de fev. 2021.

CATTERPILAR. **Trator D9T.** Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/dozers/large-dozers/18548120.html . Acesso em 05 de fev. 2021.

CATTERPILAR. **Escrêpores de caçamba aberta.** Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-tractor-scrappers/open-bowl-scrappers/2329200890743840.html . Acesso em: 05 de fev. de 2021.

CATTERPILAR. **Draglines 8200.** Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/draglines/draglines/18429930.html . Acesso em 05 de fev. 2021

CATTERPILAR. **Escavadeira 336.** Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/excavators/large-excavators/5254280666205637.html . Acesso em 05 de fev. 2021

CATTERPILAR. **Carregadeira 988k.** Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-loaders/large-wheel-loaders/18438276.html . Acesso em 05 de fev. 2021.

CATTERPILAR. **Compactador Vibratório de solo CP533E**. Disponível em https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/compactors/vibratory-soil-compactors/18230406.html. Acesso em; 05 de fev. 2021.

CHWIF, Leonardo; Medina, Afonso Celso. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. São Paulo: ed. dos autores, 2006. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=VOHV4tEZakoC&oi=fnd&pg=PR1&dq=simula%C3%A7%C3%A3o&ots=femiS8hkUE&sig=44ABqGoCpRJossCQLZCABY2qa1E#v=onepage&q=simula%C3%A7%C3%A3o&f=false>. Acesso em: 01 de fev. 2021.

COSTA, F. P., SOUZA, M. J. F., PINTO, L. R. Um modelo de alocação dinâmica de caminhões. **Brasil Mineral**, v. 231, p. 26-31, 2004.

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, 2017.

DELPHOS. **Manual do DSIM Open Pit V2.0**. Disponível em <https://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/221-manual-dsim>. Acesso em: 05 de mar. 2021.

FERREIRA, Leonardo Assis. **Escavação e exploração de Minas a céu aberto. Monografia de conclusão de curso**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. Disponível em <https://www.passeidireto.com/arquivo/21470672/escavacao-e-exploracao-de-minas-a-ceu-aberto>. Acesso em: 12 de dez. 2020

FIDELIS, Ronaldo Schaedler. **Melhoria da produtividade em uma mineração de calcário**. Monografia de conclusão de pós-graduação. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23234/1/PG_CEEP_2016_1_19.pdf. Acesso em: 16 de fev. 2021.

FORRESTER, Jay W. **Industrial Dynamics—After the First Decade**. Informs Pubs Online: Management Science, vol.1, n. 7, mar. 1968. Disponível em <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.14.7.398>. Acesso em: 12 de dez. 2020.

GRUPO J MENDES. **Ferro + Mineração**. Disponível em: <http://www.jmendes.com.br/ferro-mineracao/> Acesso em: 13 de mar. 2021.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons, 2002.

KAISER, Marcelino Diomar. **Otimização do volume e análise estrutural de caçamba para caminhão fora-de-estrada**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. PUCPR, Paraná, 2004. Disponível em

http://www.biblioteca.pucpr.br/tede/tde_arquivos/11/TDE-2007-11-30T074826Z-679/Publico/marcelino_diomar_kaizer.pdf. Acesso em: 10 de fev. 2021.

LAGES, Augusto Ribeiro. **Estudo preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto.**

Monografia de conclusão de curso. Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018. Disponível em <http://www.demin.ufmg.br/tcc/00025.pdf>. Acesso em: 10 de fev. 2021.

LOPES, J. R. **Viabilização Técnica e Econômica da Lavra Contínua de Minério de Ferro com o Uso de Sistema de Britagem Móvel "In Pit" Auto Propelido.**

Dissertação e mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

MARIZ, Jorge Luiz Valença. Influência do porte da escavadeira na viabilidade econômica convencional e probabilística de uma mineração de agregados. **IX Fórum de Mineração.** Recife, 2019. Disponível em

https://www.researchgate.net/publication/339298534_Influencia_do_porte_da_escavadeira_na_viabilidade_economica_convencional_e_probabilistica_de_uma_mineracao_de_agregados. Acesso em: 15 de mar. 2021.

PEREIRA, Leonardo Olivera; COTA, Priscila Mara. **Primarização X Terceirização: Um estudo de caso comparativo na atividade de manutenção do sistema de despacho eletrônico. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção.** 2016.

PEREIRA, Ricardo Melo. **O uso da simulação na análise de cenários em operações de carregamento e transporte na Mineração Usiminas S.A.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2016. Disponível em https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6817/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_UsoSimula%C3%A7%C3%A3oAn%C3%A1lise.pdf . Acesso em: 14 de jan. 2021.

RACIA, Ismael Momade. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração.** Dissertação de mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/163322/001023897.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

RODRIGUES, Jéssica Dias. **Proposta de melhoria da produtividade da escavadeira Liebherr R 954 SME através da metodologia Lean Seis Sigma.** 2018. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto.

RODRIGUES, Lásara Fabrícia. PINTO, Luiz Ricardo. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. **Revista Escola de Minas**, vol. 65, núm. 3, julio-septiembre, pp. 377-384. Ouro Preto, MG,

2012. Disponível em <https://www.redalyc.org/pdf/564/56424723015.pdf>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

ROSIÈRE, Carlos A. CHEMALE JUNIOR, Farid. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero: uma visão geral e discussão. **Revista Geonomos**, v. 8, n. 2. pp. 27-43. UFMG, 2020. Disponível em <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11571> . Acesso em: 27 de jan. 2021.

SANY. **Escavadeira Hidráulica SY750H**. Disponível em <http://sanydobrasil.com/portfolio-item/sy750h/>. Acesso em fevereiro, 2021.

SDLG Latin America. **Slides de apresentação**. Disponível em <https://slideplayer.com.br/slide/4146872/> . Acesso em: 15 de fev. 2021.

SILVA, Valdir Costa e. **Curso min 110: operações Mineiras**. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/245715374/Apostila-Operacoes-Mineiras> .Acesso em: 15 de mar. 2021.

SILVA, Valdir Costa e. **Curso min 112: operações Mineiras**. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2011. (Apostila).

SOUZA, H. R de; CATALANI, Guilherme. **Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha**. São Paulo: Pini, 2007.

SOUSA JÚNIOR, Wilson Trigueiro de. **Seleção de caminhos rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão: estudo de caso - Mineração de bauxita**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2012. Disponível em https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2649/1/DISSERTA%20c3%87%20%83O_Sele%20a%30Caminh%20b5esRodovi%20alrios.pdf . Acesso em 10 de jan. 2021.

SOUZA, Júlio César de. **Apostila da disciplina “Métodos de Lavra à céu aberto”**. Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, 2001. Disponível em <<https://www.passeidireto.com/arquivo/19815683/apostila-lavra-a-ceu-aberto-1>>. Acesso em: 10 de fev. 2021.

SOUZA, Felipe Ribeiro. **Notas de Aula**. Ouro Preto, 2021. Disponível em: <https://zeppelin10.ufop.br/minhaUfop/desktop/principal.xhtml> . Acesso em: 10 de jan. 2021

TGN BRASIL. **A Eficiência Geral ou Global dos Equipamentos ou Máquinas, medida pelo OEE – Overall Equipment Effectiveness**. Campinas, 2016. Disponível em: <http://tgnbrasil.com.br/> . Acesso em: 15 jan. 2021.

TUPY, Oscar. YAMAGUCHI, Luiz Carlos Takao. Eficiência e Produtividade. São Paulo: Agricultura, 1998.

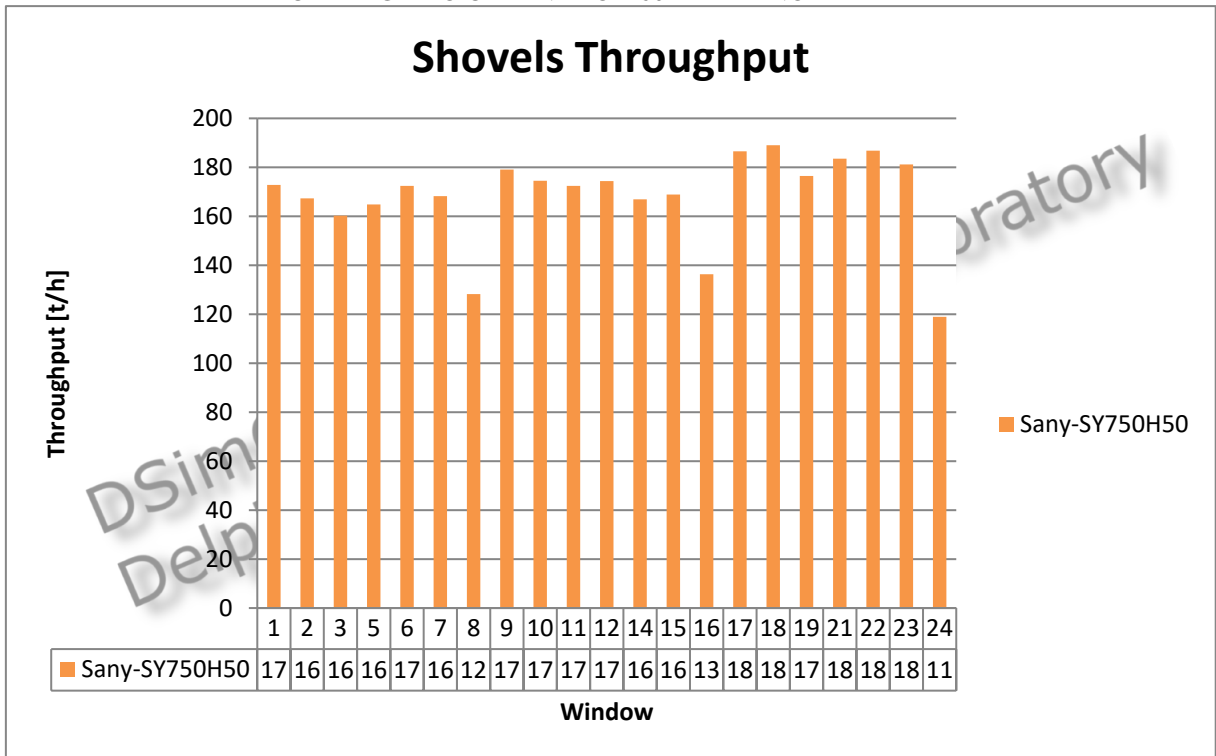
Universidade Federal de Ouro Preto. **Quadrilátero Ferrífero 2050: o que é.** Disponível em <<https://qfe2050.ufop.br/o-que-eh>>. Acesso em: 27 de jan. 2021.

VOLVO. **Volvo Brochure Articulated Hauler A60H.** Disponível em: <https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/articulated-haulers/brochures/brochure_a60h_t4f_pt_br_83_20057670_c.pdf?v=qv9GPw>. Acesso em: 10 de fev. 2021.

VOLVO. **Volvo Brochure Articulated Hauler A45G.** Disponível em: https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/articulated-haulers/brochures/brochure_a45g_stageii_stageiia_pt_br_83_20057660_a.pdf?v=kUIFPw . Acesso em: 10 de fev. 2021.

ANEXO I

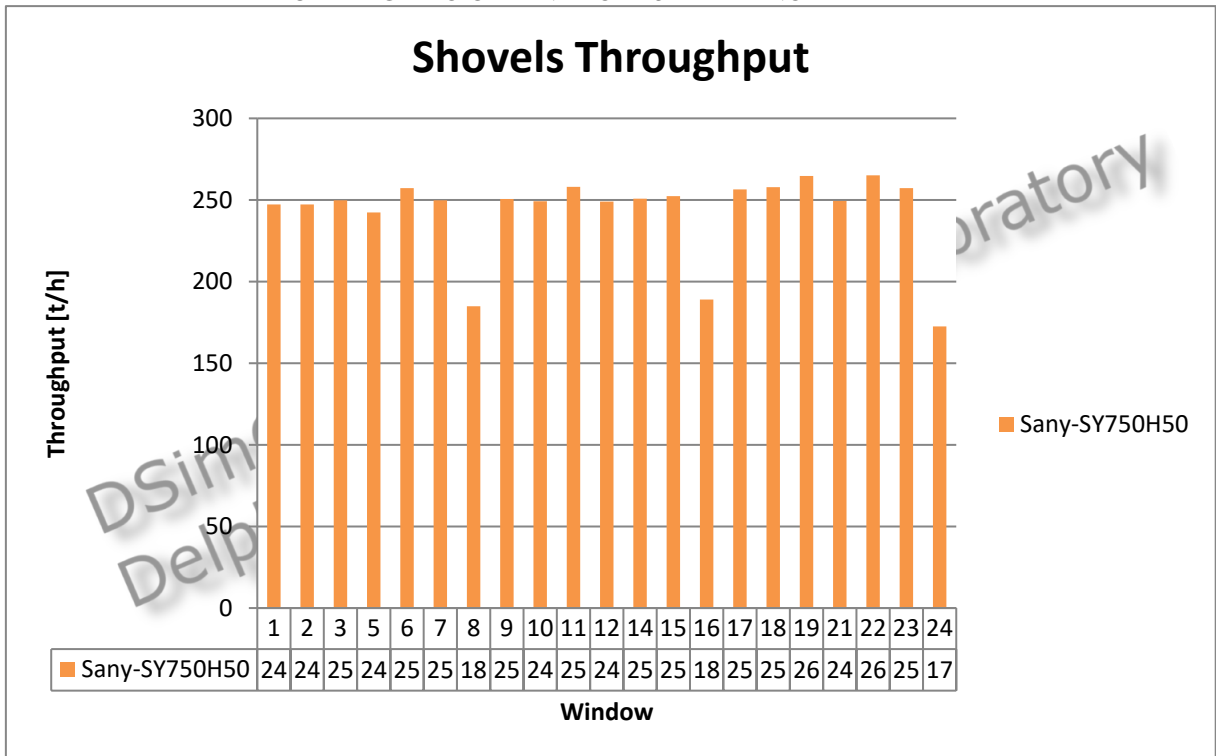
GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA CARREGAR O CAMINHÃO A60H – PDE NORTE



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO II

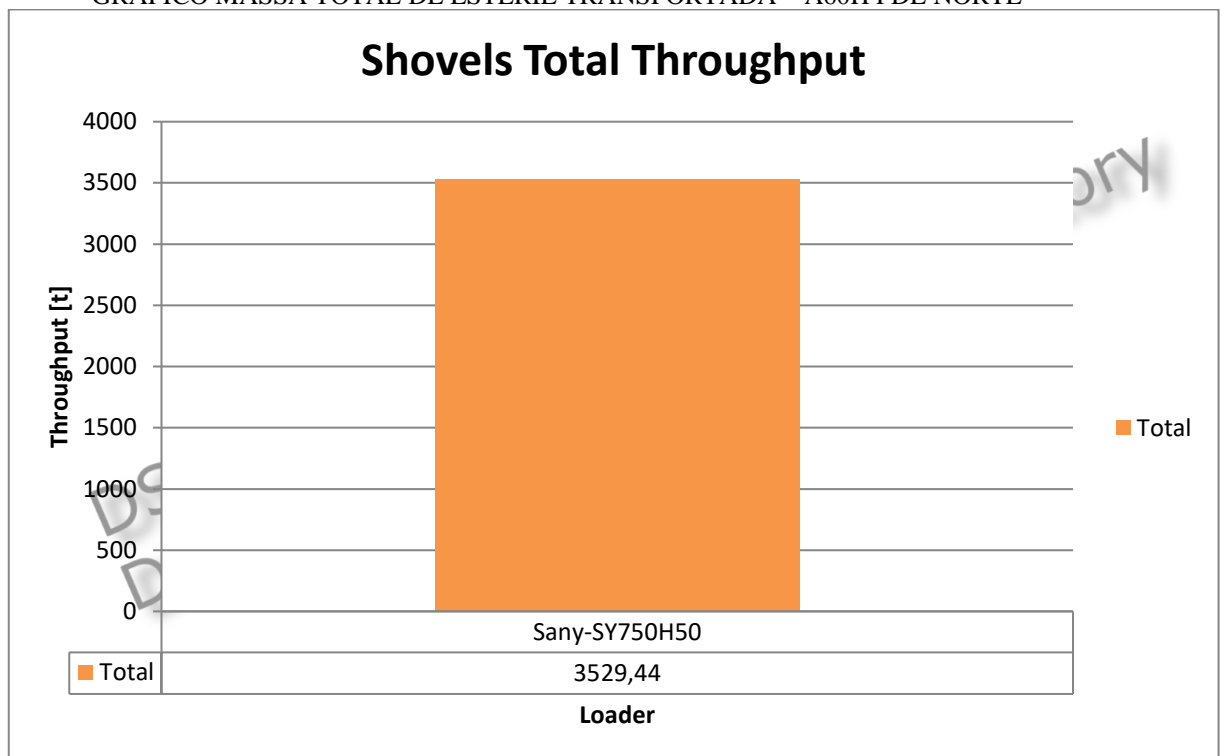
**GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA
CARREGAR O CAMINHÃO A45F – PDE NORTE**



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO III

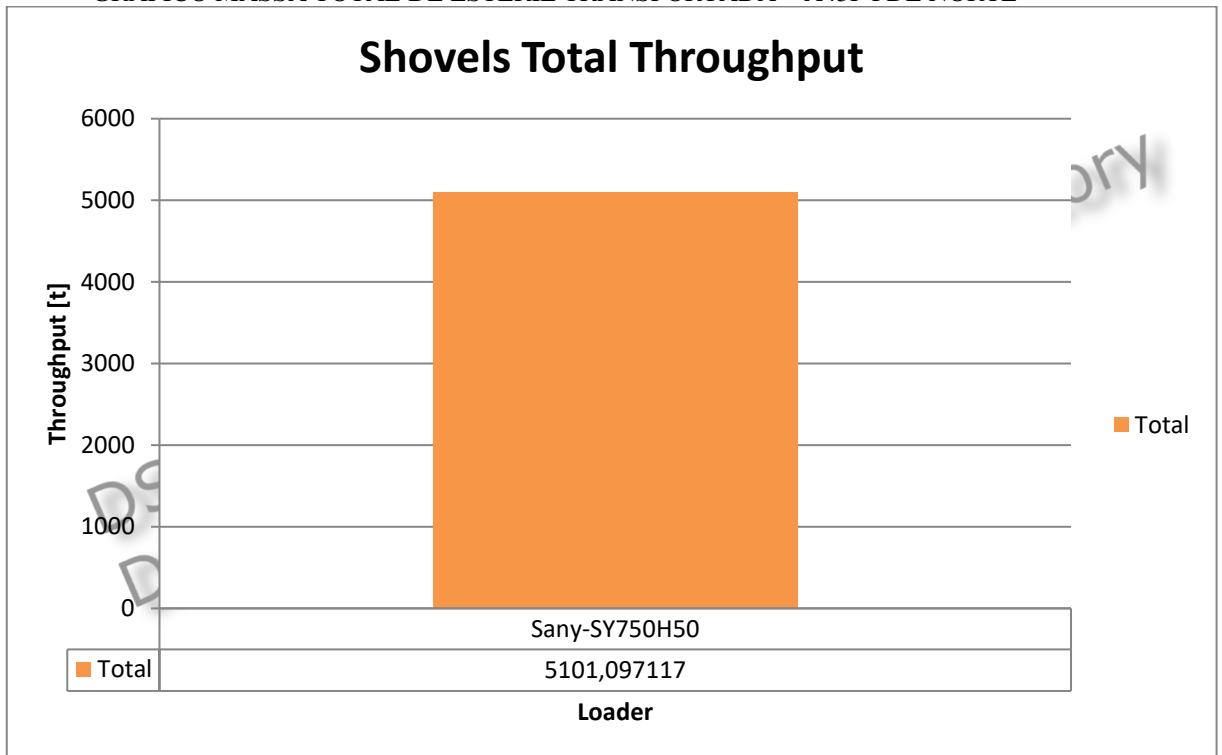
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A60H PDE NORTE



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO IV

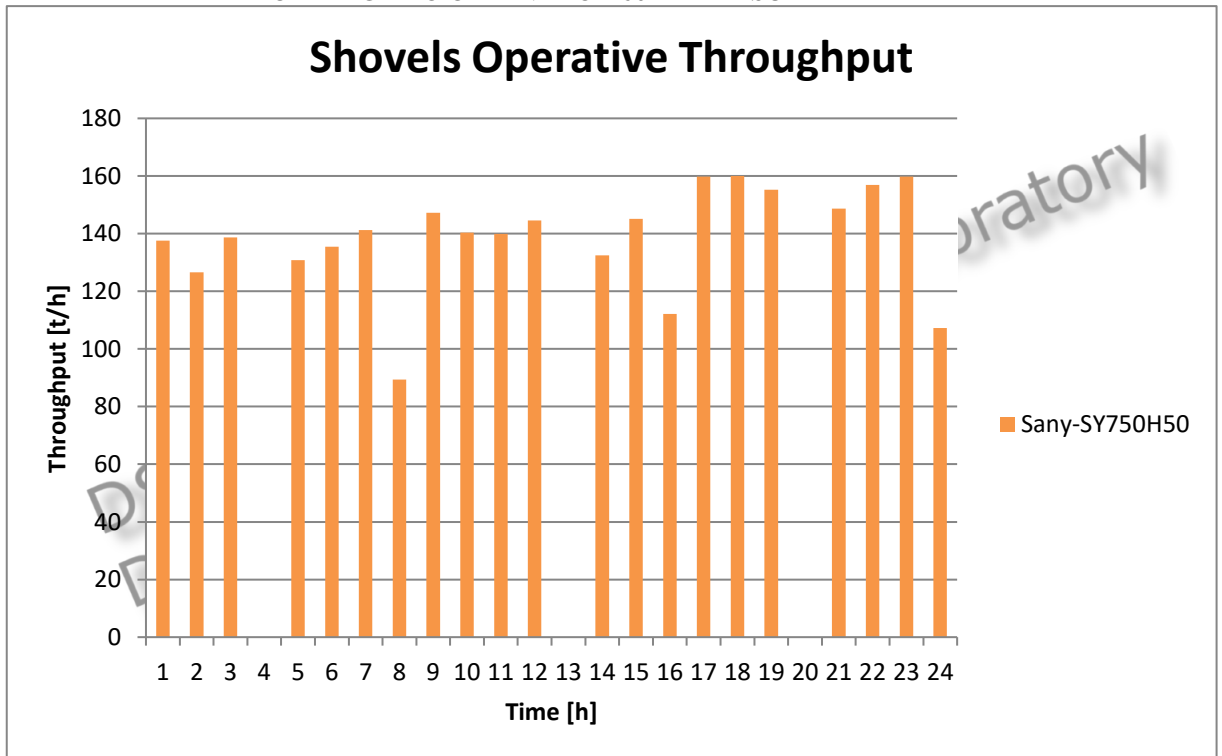
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F PDE NORTE



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO V

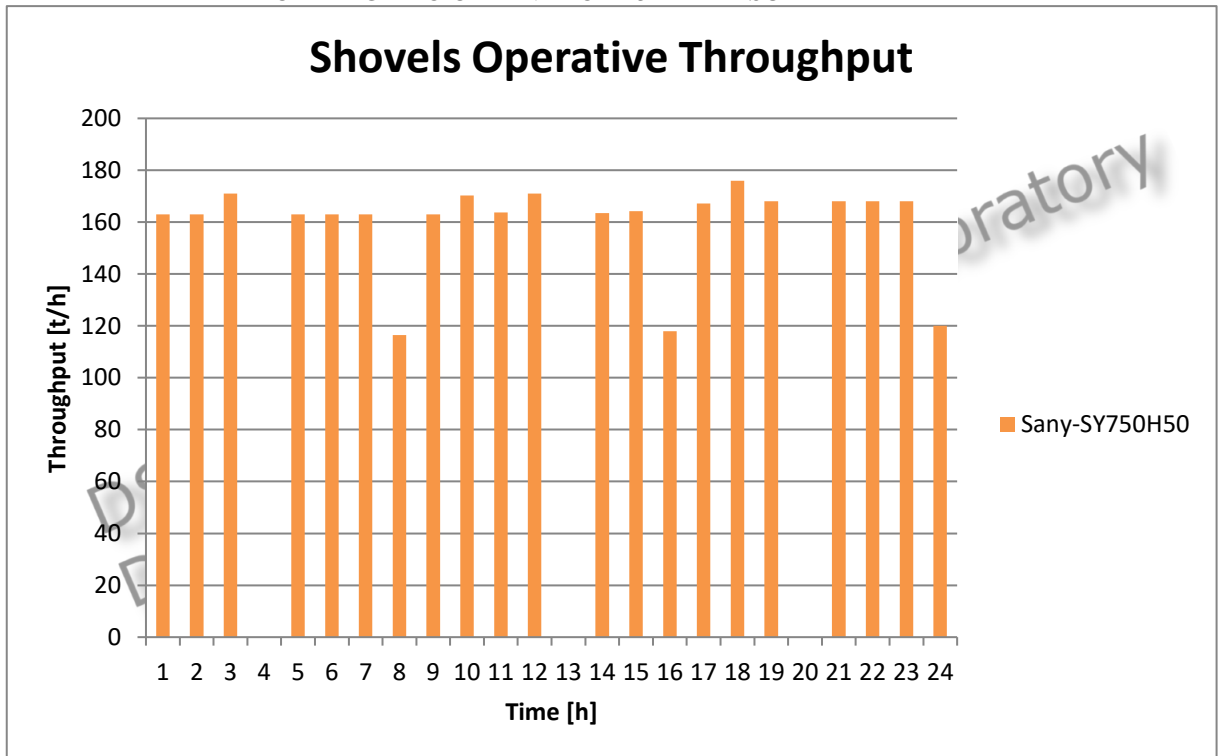
GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA
CARREGAR O CAMINHÃO A60H – PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO VI

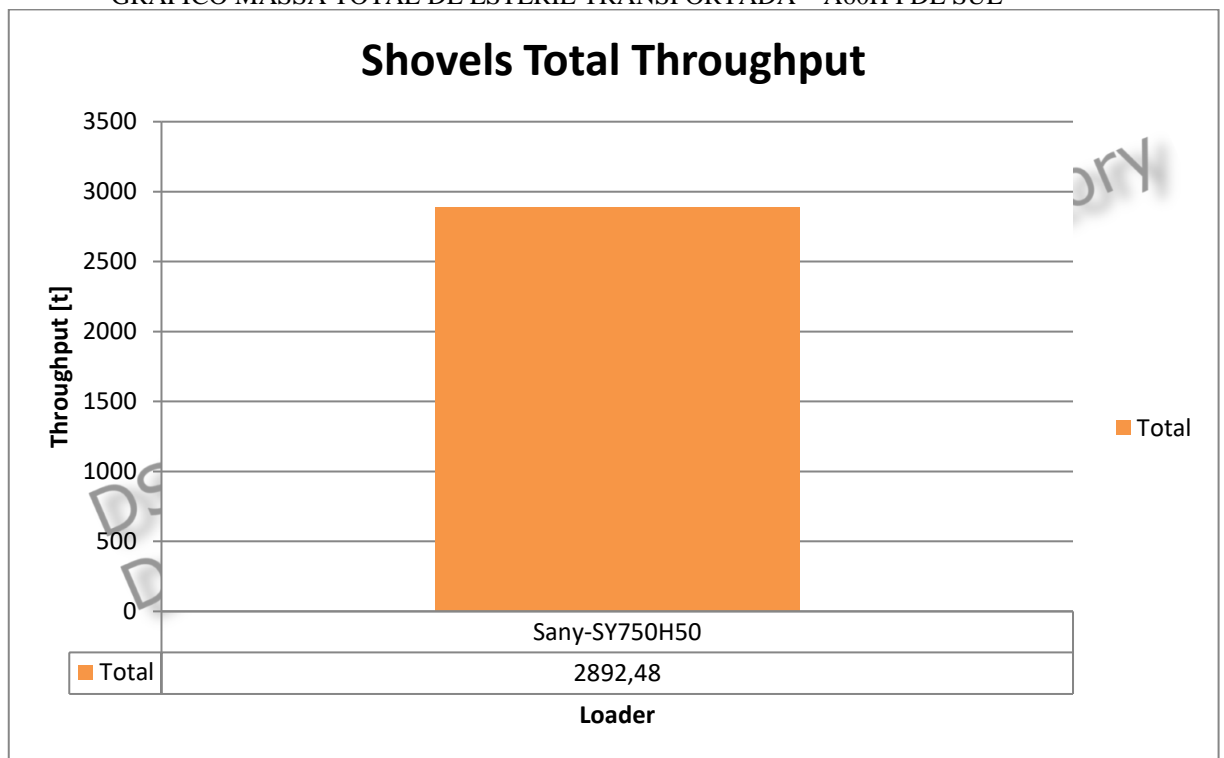
GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA
CARREGAR O CAMINHÃO A45F – PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO VI

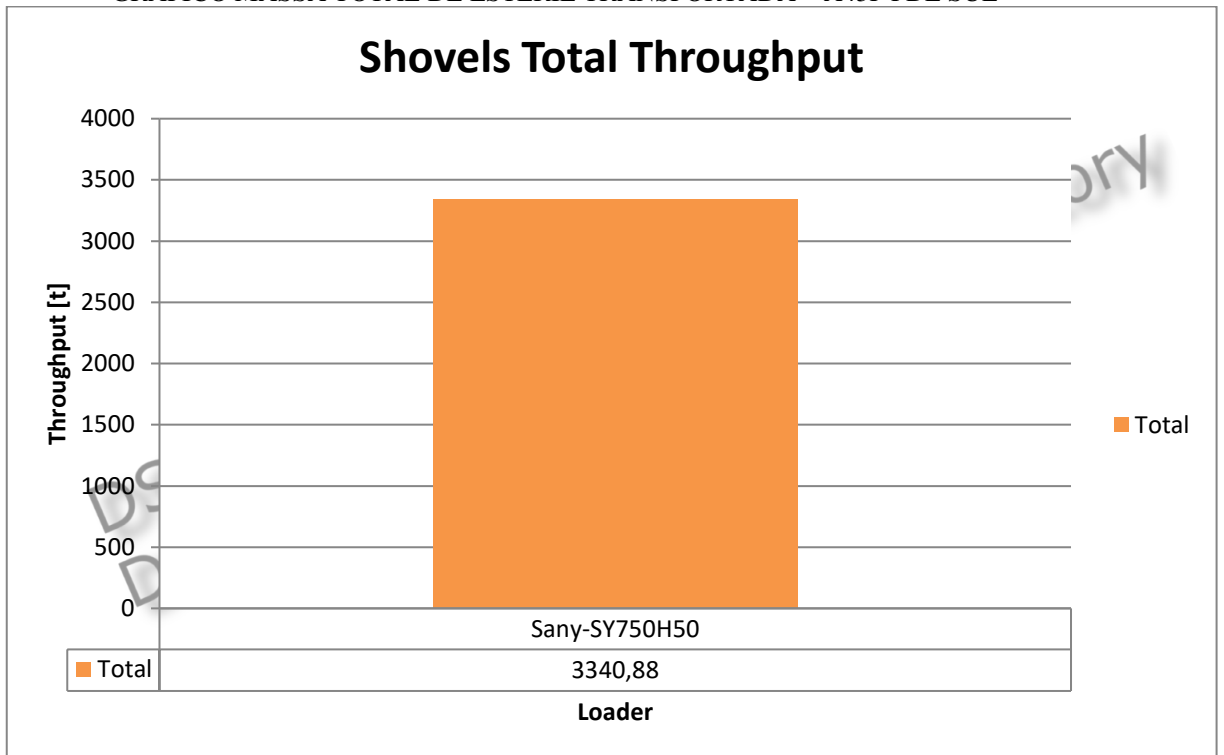
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A60H PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO VII

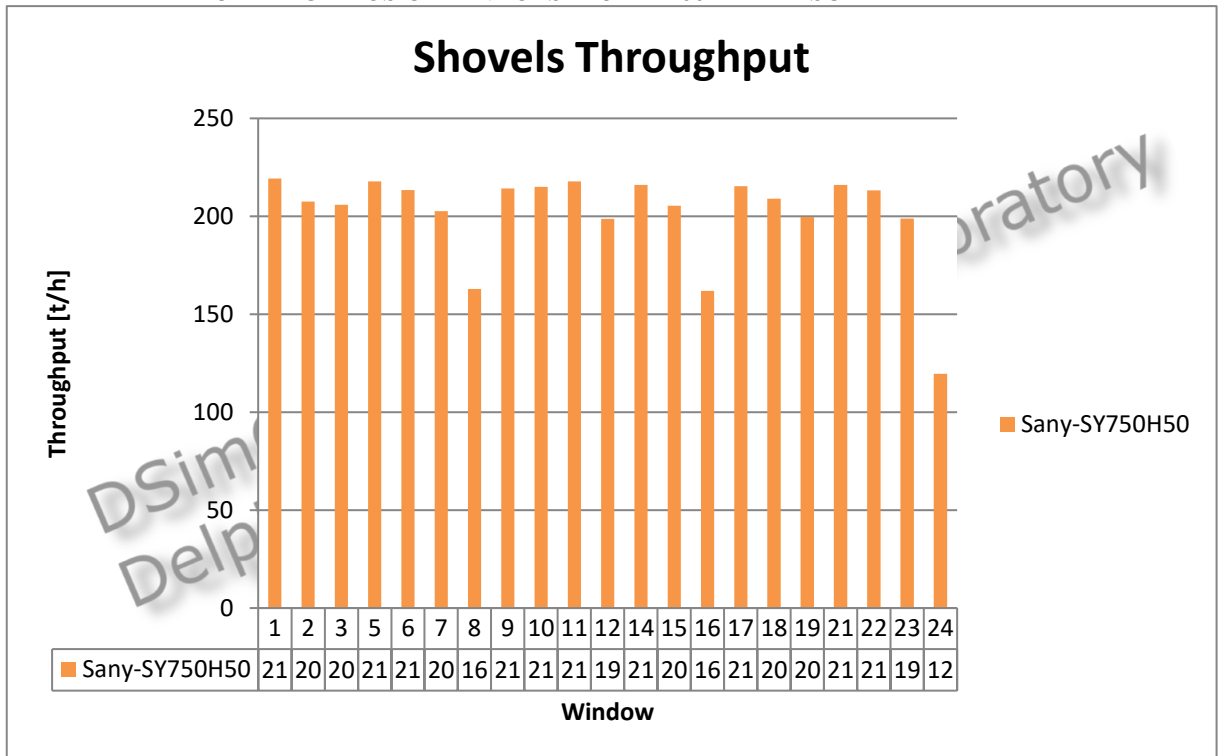
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

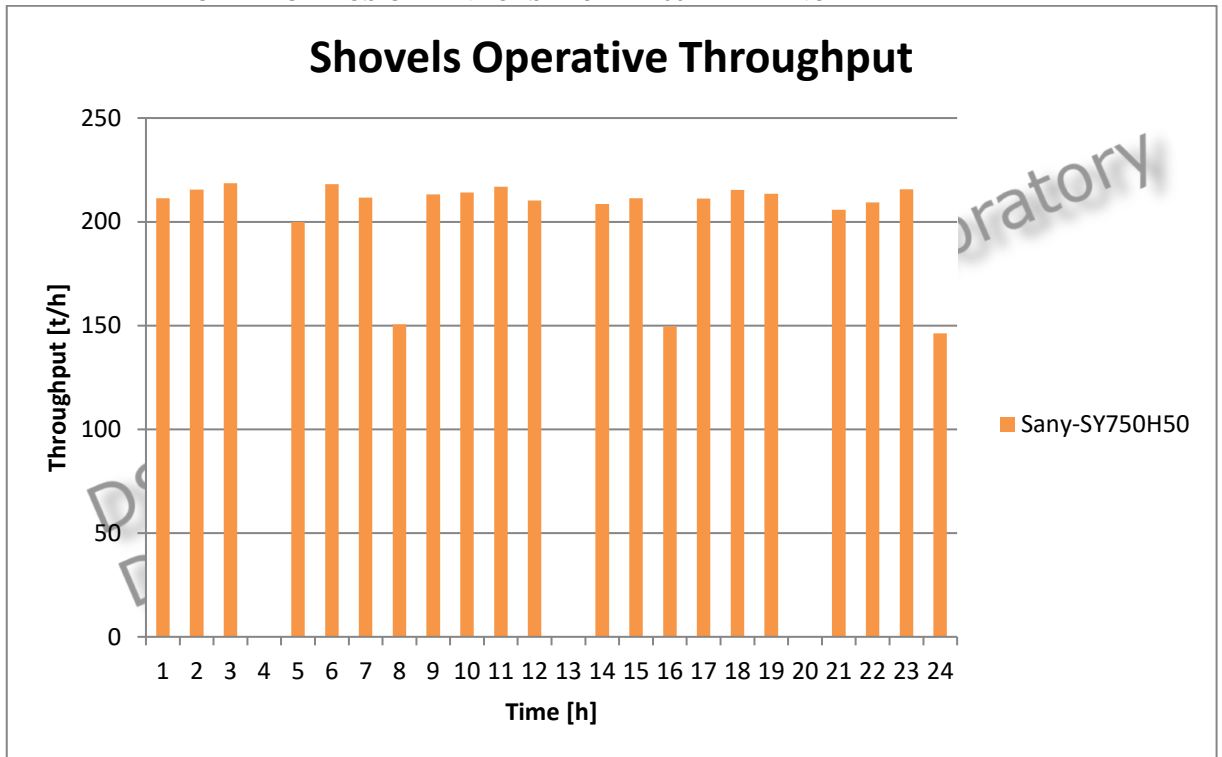
ANEXO VIII

GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA CARREGAR OS CAMINHÕES A45F E A60H – PDE SUL



ANEXO IX

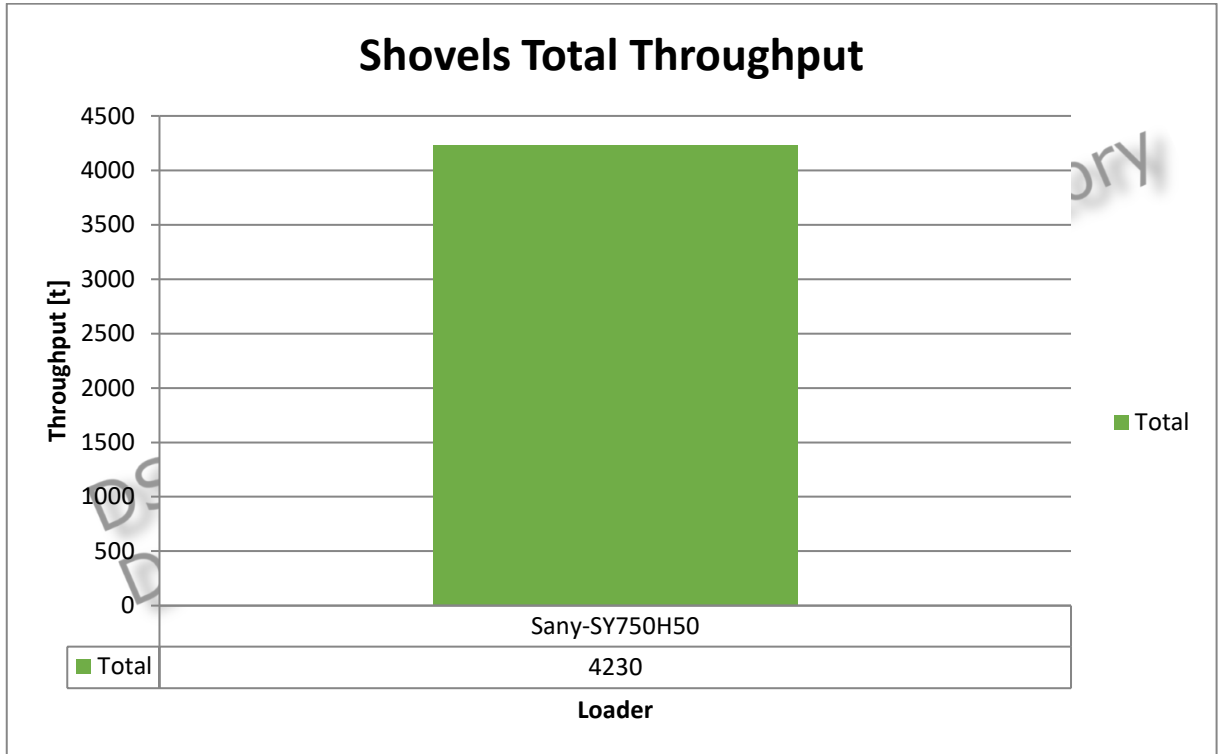
GRÁFICO TONELADAS CARREGADAS PELA ESCAVADEIRA POR HORA, PARA
CARREGAR OS CAMINHÕES A45F E A60H – PDE NORTE



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO X

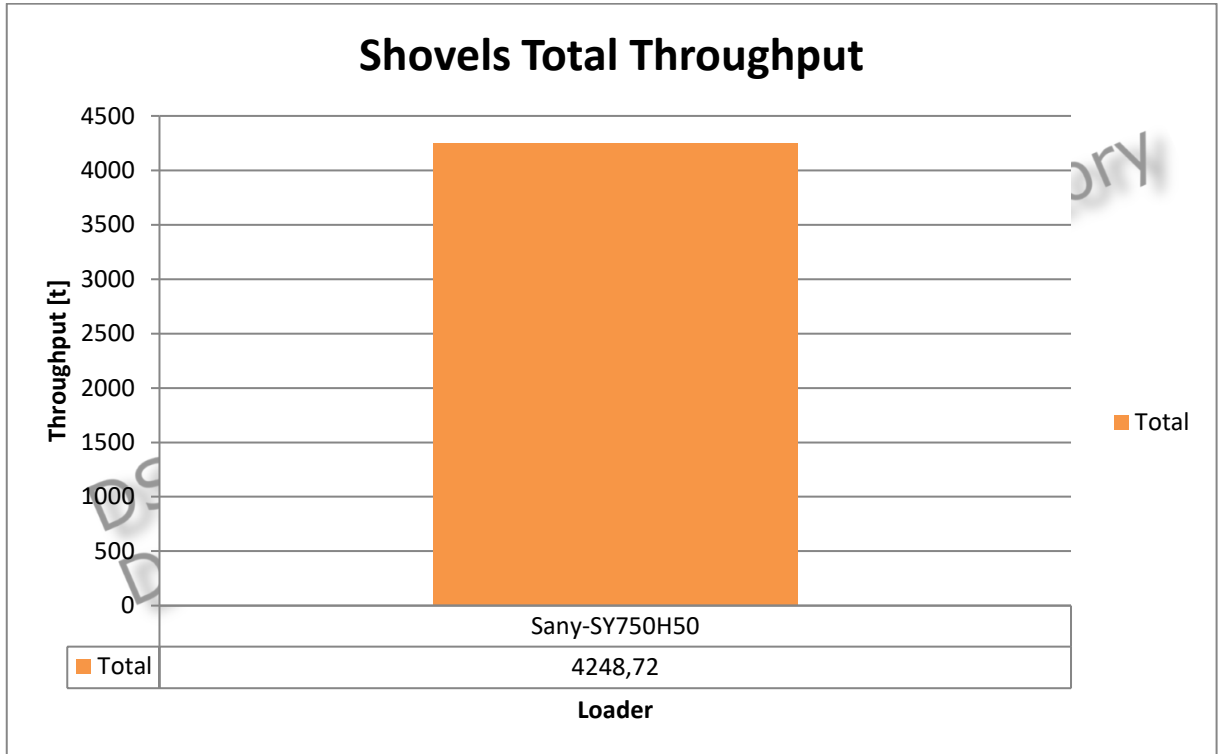
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F E A60H PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

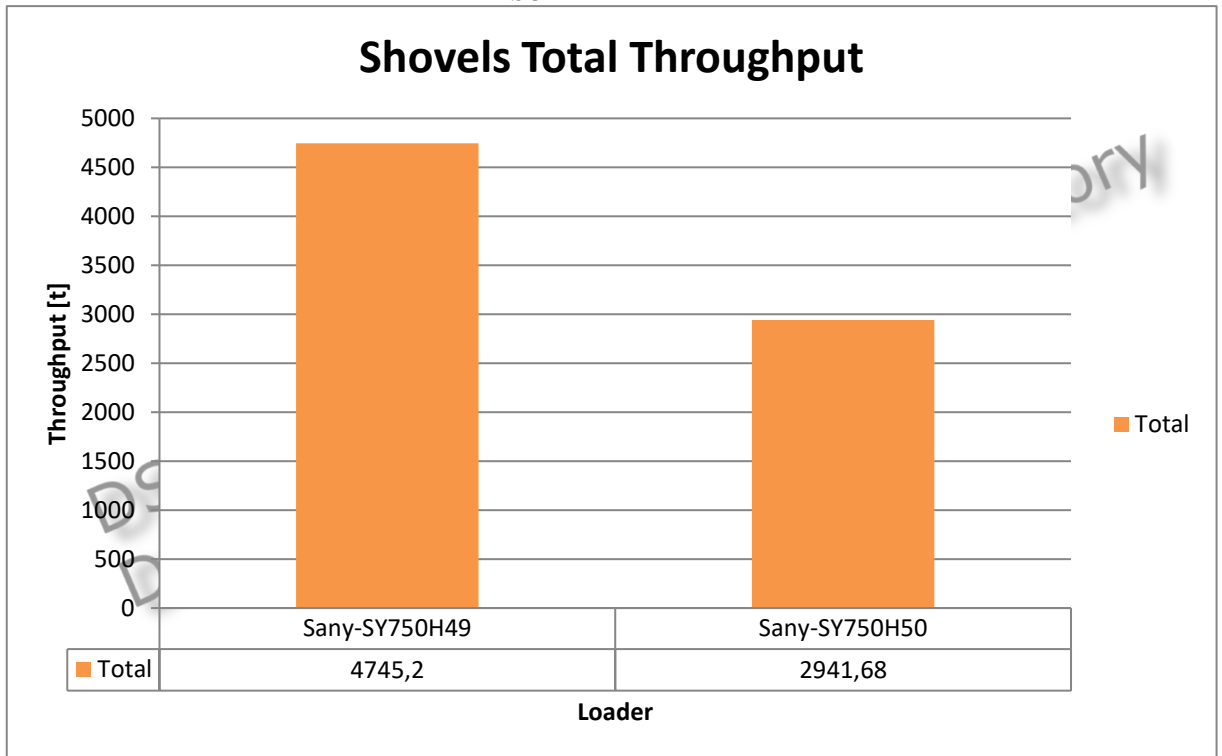
ANEXO XI

GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F E A60H PDE NORTE



ANEXO XII

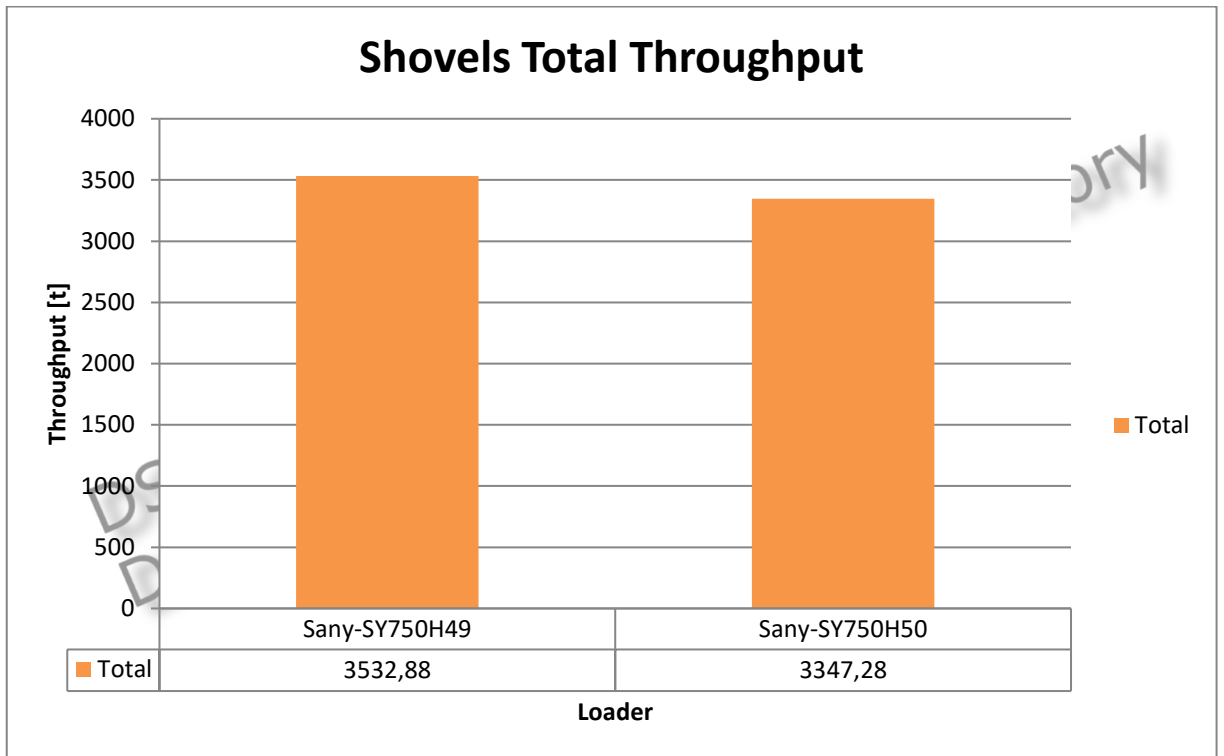
GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F PDE NORTE E A60H PDE SUL



Fonte: DSIM, 2021

ANEXO XIII

GRÁFICO MASSA TOTAL DE ESTÉRIL TRANSPORTADA – A45F PDE SUL E A60H PDE NORTE



Fonte: DSIM, 2021