



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



BRUNO INÁCIO PEREIRA

**SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CARREGAMENTO VIA
SIMULAÇÃO ESTUDO DE CASO MINA FERRO + MINERAÇÃO**

OURO PRETO

2019

BRUNO INÁCIO PEREIRA

**SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CARREGAMENTO VIA
SIMULAÇÃO ESTUDO DE CASO MINA FERRO + MINERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Operação de mina
Orientador: Prof. Dr. Carlos E. Arroyo Ortiz

OURO PRETO

2019

P436s

Pereira , Bruno Inácio.

Seleção e dimensionamento da frota de carregamento via simulação
[manuscrito]: estudo de caso Mina Ferro+ Mineração / Bruno Inácio Pereira .
2019.

82f.:

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 2. Métodos de
simulação. I. Arroyo Ortiz, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU: 622.6



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

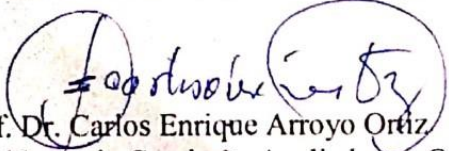
Aos 19 dias do mês de julho de 2019, às 16h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE CARREGAMENTO VIA SIMULAÇÃO ESTUDO DE CASO MINA FERRO+ MINERAÇÃO”**, pelo aluno **Bruno Inácio Pereira**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (orientador)**, **M.Sc. Heitor Lobo Coutinho** e **Engº de Minas Alexandre do Carmo Flausino**.

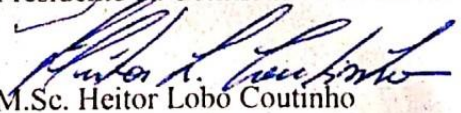
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **Aprovado** do candidato, com a nota **9,9** concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

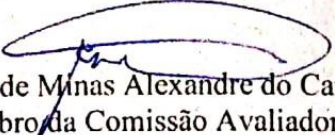
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

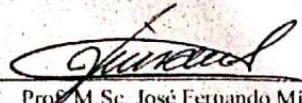
Ouro Preto, 19 de julho de 2019.


Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador


M.Sc. Heitor Lobo Coutinho
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Alexandre do Carmo Flausino
Membro da Comissão Avaliadora


Bruno Inácio Pereira


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

RESUMO

A mineração tem se modernizado com o tempo, embora muitas decisões referentes a operação e mais especificamente a frota, são tomadas com base no empirismo, levando em conta a experiência do engenheiro. Visto que as ferramentas se aprimoraram, é possível a utilização de simuladores para auxiliar na tomada de decisão. O objetivo do presente trabalho é realizar a comparação de duas escavadeiras hidráulicas, a VOLVO EC 480D e a LIBHERR R 954 SME, com intuito de justificar a substituição de uma escavadeira de maior porte para uma de menor porte. Tal estudo foi realizado pela Ferro+ Mineração, analisando apenas aspectos relacionados ao custo de operação, sendo assim o trabalho visa justificar tal substituição também no cenário operacional. Os dados utilizados para criação dos cenários foram obtidos através do sistema de despacho SmartMine, sendo imputados no simulador DSIM, a simulação ocorre no período de 24 horas em uma mineração de ferro a céu aberto.

Palavras-Chave: Simulação, Equipamentos de carga, Seleção de equipamentos.

ABSTRACT

Mining has been modernized over time, although many decisions regarding operation and more specifically fleet, are made based on empiricism, taking the engineer's experience into account. With tools improvement, it is possible to use simulators to aid in decision making. The present work objective is to compare two hydraulic excavators, VOLVO EC 480D and LIBHERR R 954 SME, in order to justify the replacement of a larger excavator for a smaller one. This study was carried out by Ferro + Mineração, analyzing only aspects related to operacional cost, thus, this work aims to justify such replacement also in operational scenario. The data used to create the scenarios was obtained through SmartMine dispatch system and inputed on DSIM simulator, he simulation occurs during a 24 hour period in an open pit iron mining.

Keywords: Simulation, Load equipment, Equipment selection.

LISTA DE FIGURAS

Figure 1 - Lavra de minério de ferro pelo método de bancadas.....	10
Figure 2 - Principais elementos da lavra por bancadas.....	11
Figure 3 - Sequência do desenvolvimento da lavra por bancadas.....	12
Figure 4 - Trator Caterpillar Grande D8T.....	13
Figure 5 - Trator Caterpillar de Rodas Médio 824K.....	14
Figure 6 - Scraper Caterpillar 657G.....	14
Figure 7 - Motoniveladora John Deere 670G.....	15
Figure 8 - Carregadeira sobre pneus Caterpillar 980L.....	16
Figure 9 - Pá-carregadeira de Esteira 973K.....	17
Figure 10 - Dispositivo de giro de uma escavadeira.....	18
Figure 11 - Bucket Wheel TAKRAF.....	19
Figure 12 - Escavadeira Hidráulica Shovel Caterpillar 6060B.....	19
Figure 13 - Dragline Caterpillar 8750.....	20
Figure 14 - Retroescavadeira Caterpillar 420F.....	20
Figure 15 - Escavadeira a cabo Caterpillar 7495.....	21
Figure 16 - Caminhão Articulado Volvo A30G.....	22
Figure 17 - Caminhão rodoviário Scania G480.....	22
Figure 18 - Dados técnicos do motor Liebherr R 954 C SME.....	24
Figure 19 - Informações técnicas sobre o motor da Escavadeira Volvo EC48D.....	25
Figure 20 - Informações técnicas a respeito do sistema elétrico da Escavadeira Volvo EC48D.....	26
Figure 21 - Informações técnicas a respeito do sistema hidráulico da Escavadeira Volvo EC48D.....	26
Figure 22 - Diferenciação do volume da caçamba rasa e coroada.....	27
Figure 23 - Fatores de enchimento para alguns materiais mais usuais.....	28
Figure 24 - Eficiência do trabalho comparada ao número de minutos de operação por hora..	32
Figure 25 - Esquema de tempo de ciclo para caminhões.....	33
Figure 26 - Efeitos causados aos pneus devido à resistência de rolamento.....	34
Figure 27 - Esquema simplificado do sistema de despacho.....	36
Figure 28 - Diferença entre uma operação normal e uma operação com despachos dinâmicos.....	36
Figure 29 - Tabela de exemplos de configurações para o método VPL.....	38
Figure 30 - layout DSIM.....	41
Figure 31 - Metodologia utilizada.....	43
Figure 32 - Sequência seguida para criação do modelo no DSIM.....	45
Figure 33 - Localização da Mina Ouro Preto- Ferro + Mineração.....	48
Figure 34 - Quadrilátero ferrífero.....	49

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I	60
ANEXO II	61
ANEXO III	62
ANEXO IV	63
ANEXO V	64
ANEXO VI	65
ANEXO VI	66
ANEXO VII	67
ANEXO VIII	68
ANEXO IX	69
ANEXO X	70
ANEXO XI	71
ANEXO XII	72
ANEXO XIII	73
ANEXO XIV	74
ANEXO XV	75
ANEXO XVI	76
ANEXO XVII	77
ANEXO XVIII	78
ANEXO XIX	79
ANEXO XX	80
ANEXO XXI	81
ANEXO XXII	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 OBJETIVOS.....	7
1.1.1 Geral.....	7
1.1.2 Específicos	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 LAVRA A CÉU ABERTO.....	9
2.2 OPERAÇÕES NA LAVRA POR BANCADAS.....	11
2.3 EQUIPAMENTOS NA LAVRA POR BANCADAS.....	12
2.3.1 Trator	13
2.3.2 Scraper e Motoscraper	14
2.3.3 Motoniveladora	15
2.3.4 Rolo Compactador	15
2.3.5 Carregadeiras	16
2.3.6 Escavadeira	17
2.3.7 Equipamentos De Transporte	21
2.4 ESCAVADEIRA LIEBHERR R 954 SME.....	23
2.5 ESCAVADEIRA VOLVO EC480D	25
2.6 CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE.....	26
2.6.1 Volume da Caçamba	27
2.6.2 Fator de Enchimento (Fill Factor)	27
2.6.3 Empolamento	28
2.6.4 Carga de Tombamento (Tipping-Load)	29
2.6.5 Carga Útil (Pay-Load)	29
2.6.6 Fator de Disponibilidade.....	29
2.6.7 Fator de Utilização.....	30
2.6.8 Rendimento.....	31
2.6.9 Eficiência de Operação	31
2.6.10 Tempo de Ciclo	32
2.6.11 Oee – Overall Equipment Efficiency – Eficiência Geral Do Equipamento	33
2.6.12 Operação Conjugada	33
2.6.13 Resistência e Coeficiente de Rolamento.....	34
2.6.14 Resistência da Rampa	35
2.7 SISTEMA DE DESPACHO.....	35

2.8 SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS	37
2.9. SIMULAÇÃO.....	39
2.9.1 Aplicações	40
2.9.2. Delphos Open Pit Simulator®	41
2.10 Tempo Entre Manutenções e Tempo Médio de Reparo	42
3. METODOLOGIA	43
3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	44
3.2 TRATAMENTO DOS DADOS	44
3.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO	44
3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO.....	46
3.5. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS.....	47
4. ESTUDO DE CASO	48
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OPERAÇÃO.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1. CENÁRIOS DE ESTÉRIL.....	52
5.2. CENÁRIOS DE MINÉRIO.....	53
6. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

Com a grande variedade de maquinário, uma seleção consciente da frota a ser utilizada em operações de mina tem papel fundamental no sucesso e eficiência das operações, sendo assim é ideal que as empresas não tomem decisões baseadas apenas na experiência do ser humano, buscando formas que possam ser justificadas com números.

O estudo a seguir foi aplicado na Ferro + Mineração, que possui como atividade fim a exploração do minério de ferro. O trabalho possui como base a seleção de equipamentos, mostrando cenários para diferentes combinações de equipamentos de carga, justificando também a mudança de sua frota de escavadeiras. Para um mercado competitivo como o da mineração, a máxima produtividade da frota pode ser a diferença entre o sucesso e o fracasso do empreendimento.

As escavadeiras comparadas são a Liebherr R 954 SME e a Volvo EC480D, utilizando o DELPHOS Open Pit Simulador (DSIM). O DSIM é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, que serve para o planejamento de lavra, permitindo estimar a produção de um plano de mineração a partir dos três seguintes elementos básicos: o layout da mina (frentes de operações de carga e descarga, rotas), a frota de equipamentos de carga e transporte e um plano de produção, que estabelece a quantidade de massa a ser enviada para cada frente de despejo. (DELPHOS, 2018)

A principal finalidade é justificar transição de um equipamento de carga de maior porte para um de menor porte, levando em conta outros fatores, além do consumo de combustível e custo de manutenção, considerando as aspectos operacionais, confirmando o estudo feito pelo Ferro+ Mineração, utilizando o simulador.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo do presente estudo é avaliar, via simulação por eventos discretos, as operações de carregamento e transporte assim como a variação de cenários e consequentemente análises para a tomada decisões em uma mina de minério de ferro a céu aberto.

1.1.2 Específicos

- Gerar modelos que possibilitem a comparação entre duas escavadeiras hidráulicas, Volvo EC 480 D e Libherr R 954SME, operando em duas frentes com minério e estéril;
- Confirmar o estudo realizado pela Ferro+ Mineração, ao substituir uma escavadeira de maior porte por uma de menor porte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LAVRA A CÉU ABERTO

A mineração é uma atividade complexa, que envolve não só conhecimentos técnicos, mas também estratégicos, uma vez que se apresenta muito suscetível ao mercado. Pode se dizer que as atividades da mineração possuem quatro pilares principais: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra. A depender de alguns fatores, as etapas citadas podem ocorrer concomitantemente. A lavra engloba todo o conjunto de operações unitárias de aproveitamento da jazida (CURI,2017). Ainda segundo Omachi a lavra ou exploração é a etapa da mineração que possibilita que o minério seja comercializável, de forma a prepara-lo previamente para a planta de beneficiamento.

Os métodos de lavra podem ser divididos em dois grandes grupos, subterrânea e céu aberto. De forma geral segundo Curi, podemos estabelecer três principais fatores para seleção do método mais adequado:

- A jazida e o meio físico circundante;
- Condições humanas, sociais e legais vigentes;
- Conjuntura financeira e econômica.

Existem cerca de dez diferentes métodos de lavra, que podem variar conforme a necessidade de operação, Silva adota como métodos de lavra a céu aberto três principais métodos: Lavra Aluvionar (“Placer Mining”), Lavra por Tiras (“Strip Mining”) e Lavra por bancadas (“Open Pit Mining”), sendo este último o mais comum para minerações de ferro.

Curi nos diz que o método de open pit, em geral é utilizado para corpos que se encontrem sob capeamento espesso, onde as bancadas são planejadas de cima para baixo coincidindo com as porções lavráveis do minério, depositando o estéril em pilhas ou mesmo na própria cava. Quando comparado com os demais, é um método com custo considerável de operação, pois necessita de alto investimento de equipamentos, sendo que um mal dimensionamento, pode afetar a viabilidade do empreendimento.

O método por bancadas, pode ser visto na figura 1, e possui algumas vantagens que foram listadas por Silva, como alta produtividade, baixa relação estéril minério, além de um desenvolvimento simplificado. Algumas das desvantagens são o alto investimento inicial, bem como a necessidade de extensas áreas para operação, ampliando assim áreas de recuperação e reabilitação ambiental.

Figure 1 - Lavra de minério de ferro pelo método de bancadas em encosta



Fonte: acervo do autor

A lavra por bancadas possui alguns elementos chave, como altura da bancada e os ângulos dos taludes, podendo ser aplicada em cava ou em encosta.

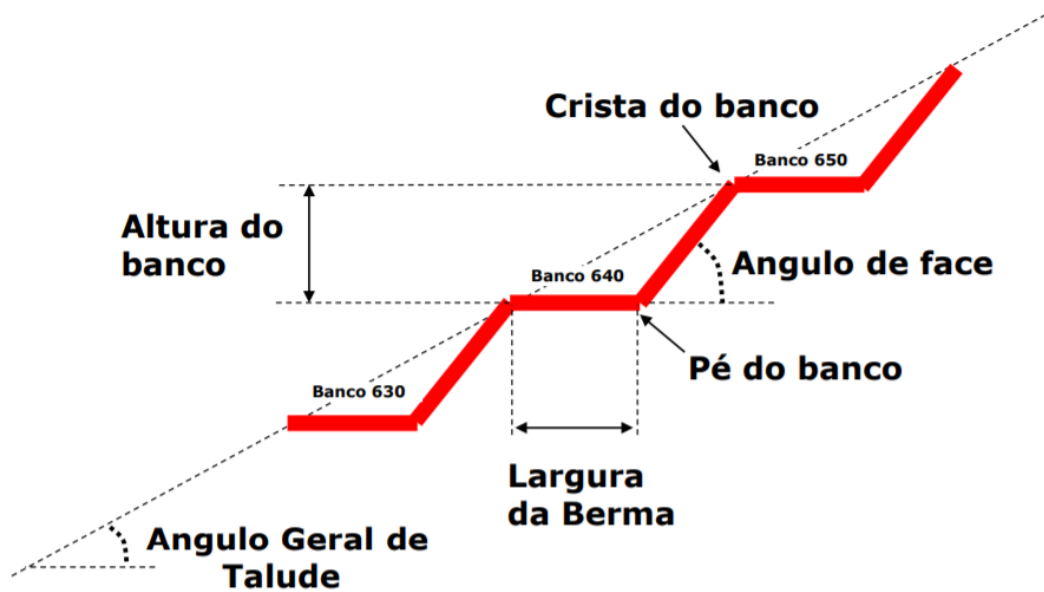
A altura da bancada pode ser entendida como a distância entre as cotas da cava, ela pode variar conforme a necessidade de operação, levando em conta fatores como as dimensões do corpo, demanda por produção e tipos de equipamento.

O ângulo do talude será responsável pela geometria final da cava, afetando diretamente a relação estéril minério, medido a partir do plano horizontal, sendo diretamente afetado pelo conjunto de acessos da mina.

A largura mínima, a altura e ângulo máximos das bancadas devem ser projetados em função das condições geotécnicas, dos serviços a serem executados, máquinas e equipamentos a serem utilizados, de forma a conduzir os trabalhos com segurança. (DNPM 2.2.1.1.)

Como observado na figura 2 temos os principais elementos da lavra por bancadas, as bermas podem ser consideradas como a distância horizontal entre a crista e o pé do banco, servindo de acesso entre os níveis, vale ressaltar que segundo a NR-22, qualquer acesso que possua trânsito de equipamentos, deve estar protegido com leiras de segurança, com altura de pelo menos o raio do pneu do maior equipamento que trafegue por ele, bem como duas vezes a largura também da máquina de maior dimensão.

Figure 2 - Principais elementos da lavra por bancadas



Fonte: Adaptado de notas de aula Professor Giorgio de Tomi

2.2 OPERAÇÕES NA LAVRA POR BANCADAS

As operações a serem praticadas independentemente do tipo de método, pode variar conforme as características do material. A perfuração pode ser executada com mais de uma finalidade, mas para trabalhos em superfície é comum que seja destinada a produção, afim de criar a malha para detonação, existem três tipos principais de perfuração com a finalidade do desmonte segundo Silva:

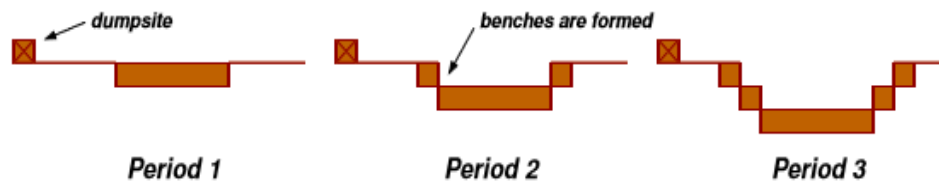
- Perfuração rotativa com brocas tricônicas (Holler Bit);
- Martelo de superfície (Top-Hammer, método roto-percussivo);
- Martelo de fundo de furo ou furo abaixo (Down the Hole, método roto-percussivo).

O desmonte é a atividade fim da perfuração, onde a fragmentação da rocha depende da malha selecionada, bem como do tipo de explosivo selecionado para a função e diâmetro dos furos. As malhas podem ser estagiadas, triangulares, quadradas ou alongadas. A detonação apresenta três principais aspectos teóricos, que segundo Silva podem ocorrer com qualquer matéria excitada por calor, impacto ou onda de choque, sendo eles: combustão, deflagração e detonação.

As etapas subsequentes de carregamento e transporte representam mais da metade do custo de operação, segundo Silva. A operação de carregamento segundo Burt e Caccetta (2013)

consiste na remoção de camadas verticais ou bancadas do material, que com o passar do tempo vão sendo submetidos a perfuração e desmonte, e posteriormente escavados e removidos, ampliando assim a cava, como visto na figura 3. Dependendo da característica física do material as etapas citadas acima são dispensadas, caso o material seja friável a desagregação fica a cargo dos equipamentos de carga.

Figure 3 - Sequência do desenvolvimento da lavra por bancadas



Fonte: Burt e Caccetta, 2013

A etapa de transporte pode ser realizada por caminhões ou correias transportadoras, transportando o material para pilhas, podendo ser de estéril ou minério. Os caminhões podem ser classificados como fora de estrada ou rodoviários, Burt e Caccetta (2013) nos dizem que a capacidade de carga pode variar de 36 a 315 toneladas, sendo diretamente proporcional à dimensão e custo de operação. Já a velocidade de traslado do caminhão é inversamente proporcional à sua carga máxima.

A lavra utilizando o sistema convencional de equipamentos de carga e transporte possui certas vantagens, segundo Lopes para ocasiões onde a lavra deve ser seletiva, o maquinário é de fácil realocação, bem como a possibilidade das operações ocorrerem em mais de um nível simultaneamente, possibilitando a blindagem do material, além de toda operação de infraestrutura na construção de acessos por exemplo pode ser feita pela própria frota.

2.3 EQUIPAMENTOS NA LAVRA POR BANCADAS

A seleção dos equipamentos de carregamento e transporte deve ser feita de maneira conjunta, de forma que a frota possa atingir a eficiência de operação desejada. Particularmente no caso dos equipamentos de lavra que trabalham em operações conjugadas, o problema de um mal dimensionamento pode comprometer toda o empreendimento.

Existem variadas opções de equipamentos, de carga ou transporte a serem utilizados na mineração. Segundo Borges, podemos destacar os seguintes tipos de máquina utilizadas nas

operações de carregamento e escavação: escavadeiras a cabo, escavadeiras hidráulicas, retroescavadeiras hidráulicas, carregadeiras sobre pneus ou esteira, moto scrapers, dragas e monitores hidráulicos.

Ricardo e Catalani (2007) ainda apresentam outro tipo de classificação, conforme as suas formas de operação: Unidades de escavo: empurradora (ex: trator de esteira), transportadoras (ex: scraper e moto scrapers) e carregadoras (ex: carregadeiras e escavadeiras), unidades aplainadoras: (ex: moto niveladora), unidades de transporte: (ex: caminhões), unidades compactadoras: (ex: rolo vibratório), unidades de perfuração: (ex: perfuratriz).

2.3.1 Trator

Chama-se trator a uma unidade autônoma que executa a tração ou empurra outras máquinas e pode receber diversos implementos destinados a diferentes tarefas (RICARDO E CATALANI, 2007). Podemos encontrar dois tipos de tratores, como visto nas figuras 4 e 5 abaixo, sobre esteiras ou sobre rodas respectivamente, ainda segundo Ricardo e Catalani essas máquinas possuem algumas características marcantes, como:

- Esforço: força presente na barra de tração ou na unidade motriz
- Velocidade: velocidade de deslocamento
- Aderência: diz respeito a versatilidade de deslocamento em diversos terrenos
- Flutuação: capacidade de deslocar-se sem atolamento
- Balanceamento: boa distribuição de massa do equipamento.

Figure 4 - Trator Caterpillar Grande D8T



Fonte: Caterpillar, 2019

Figure 5 - Trator Caterpillar de Rodas Médio 824K



Fonte: Caterpillar, 2019

2.3.2 Scraper e Motoscraper

A principal diferença entre o Scraper e Moto scraper ou Scraper automotriz, é que o primeiro é rebocado, como visto na figura 6, consistindo de uma caçamba sobre dois eixos pneumáticos, normalmente tracionados por trator de esteiras. (RICARDO E CATALANI, 2007). O moto scraper nada mais é do que um scraper que possui apenas um eixo, utilizando um rebocador, que coleta parte do material ao invés de apenas espalhá-lo.

Figure 6 - Scraper Caterpillar 657G



Fonte: Caterpillar, 2019

2.3.3 Motoniveladora

A Motoniveladora pode ser considerada um equipamento de acabamento, como é apresentado na figura 7, utilizado na retirada de ondulações do terreno, bem como na adequação de “grades” dos acessos. Como principais características apresenta grande mobilidade da lâmina de corte e precisão dos movimentos, o que possibilita seu posicionamento nas situações mais diversas. (RICARDO E CATALANI, 2007). Para períodos chuvosos, os acessos em geral ficam danificados pelo carreamento de material, sendo assim há demanda da Motoniveladora na conformação do terreno.

Figure 7 - Motoniveladora John Deere 670G



Fonte: John Deere, 2019

2.3.4 Rolo Compactador

O rolo compactador é utilizado na diminuição, compactação e compressão de superfícies, pode ser utilizado na construção de pilhas, afim de reduzir o volume ocupado pelo material, ou seja, reduzindo o índice de vazios. Segundo Ricardo e Catalani, podemos encontrar cinco tipos diferentes de rolos: rolo vibratório, rolo pé-de-carneiro, rolo pneumático, rolos combinados, rolos especiais.

2.3.5 Carregadeiras

Segundo Rodrigues, as carregadeiras em geral executam serviços de pequenos cortes em materiais friáveis, carregamento de materiais soltos, execução de serviços de infraestrutura como construção de leiras e limpezas de praça, bem como pequenos nivelamentos, e são equipamentos que possuem, caçamba frontal à qual é acionada através de um sistema de braços articulados.

Quando executa de fato o trabalho de carregamento em caminhões, é realizada a manobra entre o caminhão e o talude ou pilha, dependendo do local de operação. Podem ser principalmente de dois tipos: sobre pneus (figura 8) e sobre esteiras (figura 9), sendo que a carregadeira sobre pneus não é muito indicada para terrenos acidentados, devido ao risco de operação.

Figure 8 - Carregadeira sobre pneus Caterpillar 980L



Fonte: Caterpillar, 2019

Figure 9 - Pá-carregadeira de Esteira 973K



Fonte: Caterpillar, 2019

2.3.6 Escavadeira

Segundo Hardy, as escavadeiras hidráulicas foram inicialmente desenvolvidas para construção civil, mas conforme a possibilidade de aplicação para mineração, foram melhoradas, saindo dos anos 70 com capacidades de caçamba de 4 a 5 m³, com cerca de 80 a 90 toneladas de peso operacional, para capacidades de 85 toneladas com peso operacional chegando a 1000 toneladas.

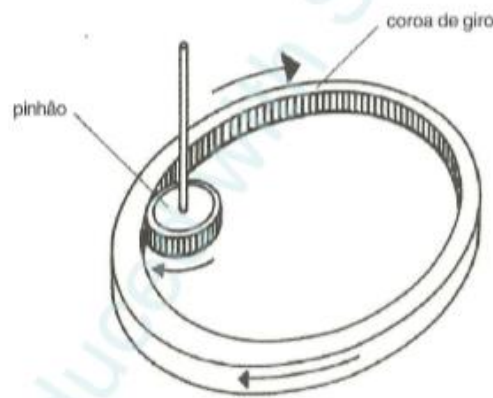
Nas operações de mina as escavadeiras, também chamadas de pás-mecânicas, possuem um papel fundamental, uma vez que em boa parte dos casos é utilizada no carregamento do minério das frentes de lavra, ou do estéril, podendo ser utilizada em materiais desmontados pela detonação ou ainda para rochas friáveis, executa a operação de corte e carregamento. Segundo Ricardo e Catalani, a escavadeira pode ser considerada um equipamento que trabalha parado, sendo que seu deslocamento não participa efetivamente do ciclo de trabalho, possuindo duas estruturas bem definidas, a infraestrutura e a superestrutura.

A infraestrutura pode ser entendida como a composição do chassi apoiado sobre a estrutura motriz, podendo ser esteiras, pneumática ou trilhos. A superestrutura compreende a cabine de comando, o elemento motriz (motor a diesel) e as transmissões necessárias para acionar os diversos elementos móveis. (RICARDO E CATALANI, 2007).

A escavadeira possui um movimento de 360°, que segundo Ricardo e Catalani é composta por uma coroa de giro, que pode ser dentada externa ou internamente, que é acionada

por uma engrenagem chamada comumente de “pinhão”, ligada ao eixo motriz através de transmissão, como na figura 10.

Figure 10 - Dispositivo de giro de uma escavadeira



Fonte: Adaptado de Ricardo e Catalani (2007)

A operação com escavadeiras pode ser de duas formas, contínuas ou cíclicas:

. Os sistemas de escavação contínua usados na mineração a céu aberto incluem *bucket wheel* (figura 11) e *bucket chain*, ou dragas aplicadas na mineração de carvão marrom para geração de energia, em geral aplicadas para mineração de grande porte.

Os sistemas de escavação cíclicos incluem escavadeira shovel (figura 12), draglines (figura 13), pás carregadeiras e scrapers com tratores de ripagem que são específicos ou aplicados de forma separada para uma ampla faixa de escalas operacionais, commodities e configurações de lavra a céu aberto. (HARDY, 2007)

Figure 11 - Bucket Wheel TAKRAF



Fonte: TAKRAF, 2019

Figure 12 - Escavadeira Hidráulica Shovel Caterpillar 6060B



Fonte: Caterpillar 2019

Figure 13 - Dragline Caterpillar 8750



Fonte: Caterpillar 2019

Dentro do regime de operação cíclica ainda podemos citar a retroescavadeira (figura 14), comumente aplicada a serviços de infraestrutura, e a escavadeira a cabo (figura 15), que em geral é uma escavadeira de maior porte.

Figure 14 - Retroescavadeira Caterpillar 420F



Fonte: Caterpillar 2019

Figure 15 - Escavadeira a cabo Caterpillar 7495



Fonte: Caterpillar 2018

2.3.7 Equipamentos De Transporte

Na mineração é possível a utilização de dois principais tipos de sistema de transporte de material, um deles é a utilização de correias transportadoras. Correias transportadoras são um conjunto de equipamentos e componentes, tais como roletes de carga e retorno, tapetes, polias, dispositivo de acionamento, chutes para carregamento e descarregamento do material, estrutura de suporte, entre outros. As correias são usadas para manipulação e transporte de materiais, providenciando um fluxo contínuo entre diversas operações. (COUTINHO, 2017)

Atualmente o sistema mais utilizado atualmente para lavra a céu aberto é o transporte feito por caminhões. Podem ser utilizados caminhões fora de estrada, que segundo SOUZA (2001) oferecem maior grau de flexibilidade num sistema de transporte e são especialmente indicados quando estão disponíveis vários minérios e fontes de minério (frentes de lavra), ou ainda caminhões rodoviários.

Dentro do grupo dos caminhões fora de estrada temos os caminhões articulados, como pode ser visto na figura 16, são veículos que possuem em sua parte traseira articulações para auxiliar o transporte de cargas ou movimentações de terra, geralmente este equipamento é utilizado em obras de engenharia civil, mas possibilitam aplicação também na mineração, em especial para locais de difícil acesso. As principais características destes caminhões se

apresentam em terrenos e condições mais exigentes, ou seja, que possuem deformidades no perímetro percorrido. (ALMEIDA, 2016).

Os caminhões rodoviários como visto na figura 17, são considerados de menor porte, utilizado em minerações com acessos mais estreitos que não permitem a utilização de foras de estrada, chegando a transportar até 48 toneladas.

Figure 16 - Caminhão Articulado Volvo A30G



Fonte: Volvo, 2019.

Figure 17 - Caminhão rodoviário Scania G480



Fonte: Acervo do autor

2.4 ESCAVADEIRA LIEBHERR R 954 SME


A linha de produtos de mineração da Liebherr inclui oito modelos diferentes, movidos por motores a diesel ou motores elétricos, com capacidades de caçamba de 7 a 47,5 m³ (peso de material de 13 a 80 toneladas) e potência do motor até 4.000 HP. (LIEBHERR, 2016)

A R954SME (“Super Mass Excavation”), de 60 toneladas foi lançada em junho de 2015 pela Liebherr Ltda., coma proposta de melhorar a relação custo/produção na operação. A máquina é equipada com um motor diesel de seis cilindros fabricados pela própria Liebherr.

O equipamento de escavação está configurado para atingir a produção mais elevada possível, para escavação direta: o braço SME de 6,70 metros e o braço SME de 2,35 metros permitem uma conchada de 3,7m³ (LIEBHERR, 2016). Ainda segundo a Liebherr o contrapeso mais pesado permite a utilização de caçambas de maior porte sem que a máquina perca estabilidade durante as operações

O modelo em questão possui ainda outras duas opções da R 954 C, a versão padrão com um peso operacional de aproximadamente 50 toneladas e a R 954 C SME com um peso operacional de aproximadamente 60 toneladas. A figura 18 traz algumas informações técnicas referentes ao equipamento.

Figure 18 - Dados técnicos do motor Liebherr R 954 C SME

 Motor	
Potência conforme ISO 9249	240 kW (326 HP) a 1.800 RPM
Modelo	conforme padrão de emissões brasileiro Proconve MAR-I. Para operações com altitude superior a 3.000 m, contatar a Liebherr
Tipo	6 cilindros em linha
Diâmetro/Curso	122/150 mm
Deslocamento	10,5 l
Motor	diesel 4 tempos sistema com bomba injetora unitária turbo-alimentado e after cooler emissões reduzidas
Arrefecimento	resfriado a água, com refrigeração do combustível e do óleo do motor integrado
Filtro de ar	tipo seco com pré-filtro, elementos primário e de segurança, descarga automática de poeira
Tanque de combustível	700 l
Padrão	controle eletrônico de rotação do motor
Sistema elétrico	
Tensão	24 V
Baterias	2 x 170 Ah/12 V
Motor de arranque	24 V/7,8 kW
Alternador	trifásico 28 V/80 A
Bombas hidráulicas para o implemento e translação	
Vazão máxima	duas bombas Liebherr de vazão variável, e pistões axiais 2 x 350 l/min.
Pressão máxima	350 bar
Regulagem da bomba	eletro-hidráulica com regulagem eletrônica do motor Diesel, compensação de pressão, compensação de vazão, otimizador automático da vazão de óleo
Bomba hidráulica para o giro	
Vazão máxima	reversível, vazão variável, pistões axiais e circuito fechado 211 l/min.
Pressão máxima	384 bar
Tanque hidráulico	440 l
Sistema hidráulico	790 l
Filtro de óleo hidráulico	2 filtros de fluxo total na linha de retorno com filtro integrado de 5 µm
Radiador de óleo hidráulico	compacto, composto de radiador de água em paralelo com radiador hidráulico e after cooler e ventilador controlado hidrostáticamente
Modo de trabalho	ajuste do desempenho da máquina e da hidráulica através do seletor no display em função da aplicação
ECO	para aplicação econômica e baixa emissão de gases e de ruídos
POWER	para força máxima de escavação e serviços severos
LIFT	para levantamento de carga
FINE	para trabalhos de alta precisão e levantamento através de movimentos precisos
Ajuste da RPM	ajuste contínuo da potência do motor via rpm para cada modo selecionado
Tool Control	dez pré-ajustes de vazão e pressão para ferramentas extras

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018)

O modelo R 960 SME, foi criado para substituir o R 954 SMR, com um peso operacional de até 62,8 toneladas e capacidade de caçamba de até 3,7 m³, equipada com um motor regulável.

2.5 ESCAVADEIRA VOLVO EC480D

A escavadeira Volvo EC480D é considerada uma máquina de alta potência de escavação, segundo a Volvo podendo ser aplicada também a materiais compactos, permitindo um tempo de ciclo reduzido. A redução de 8-10% resulta das melhorias no sistema hidráulico, que fornece mais fluxo à caçamba usando ambas as bombas em confluência, assim como o fluxo total aumentado da bomba e a operação combinada uniforme. (VOLVO, 2017)

A Volvo EC480D ainda conta com alguns itens para aprimorar sua eficiência, como o modo ECO e o sistema de marcha lenta automático, que reduz a rotação do motor para períodos de tempo inativo (3 a 20 segundos), afim de reduzir o consumo de combustível e ainda sistema de desligamento automático após 5 minutos inativos.

O motor usa injetores precisos de alta pressão, turbo alimentador e Inter cooler, e controles do motor eletrônicos para otimizar o desempenho da máquina. (VOLVO, 2017). As imagens 19 a 21 trazem algumas informações a respeito do motor, sistemas elétrico e hidráulico da Volvo EC48D.

Figure 19 - Informações técnicas sobre o motor da Escavadeira Volvo EC48D

EQUIPAMENTO DE SÉRIE
Motor
Motor diesel de 4 tempos turboalimentado refrigerado a água, com injeção direta e refrigerador de ar de carga
Filtro de ar com indicador
Aquecedor do ar de admissão
Pré-filtro tipo ciclone
Desligamento elétrico do motor
Filtro de combustível e separador de água
Alternador, 80 A

Fonte: Volvo, 2019

Figure 20 - Informações técnicas a respeito do sistema elétrico da Escavadeira Volvo EC48D

Sistema de controle elétrico/eletrônico
Contronics
- Sistema de controle de modo avançado
- Sistema de autodiagnóstico
Indicação de condição da máquina
Controle de potência com detecção da rotação do motor
Sistema de marcha lenta automático
Reforço de potência com um toque
Função de parada/partida de segurança
Monitor colorido LCD ajustável
Chave geral elétrica
Circuito de prevenção de repartida do motor
Luzes halógenas de alta capacidade:
- Montadas no chassi 2
- Montadas na lança 2
Baterias, 2 x 12 V / 200 Ah
Motor de partida, 24 V / 7 kW

Fonte: Volvo, 2019

Figure 21 - Informações técnicas a respeito do sistema hidráulico da Escavadeira Volvo EC48D

Sistema hidráulico
Sistema hidráulico com detecção automática
- Sistema de soma
- Prioridade da lança
- Prioridade do braço
- Prioridade de giro
Tecnologia de economia de combustível com modo "ECO"
Válvulas de regeneração da lança e do braço
Válvulas anti-ricochete de giro
Válvulas de retenção da lança e do braço
Sistema de filtração de múltiplos estágios
Amortecimento dos cilindros
Vedações contra contaminação dos cilindros
Válvula hidráulica auxiliar
Motores de deslocamento automáticos de duas velocidades
Óleo hidráulico, ISO VG 68

Fonte: Volvo, 2019

2.6 CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE

A produtividade é uma informação valiosa para operações de mina, portando um papel fundamental na seleção de equipamentos no dimensionamento de frota. Segundo Ran a

produtividade é considerada uma medida de eficácia da retirada de bens físicos, sendo entendida como uma relação entre entradas e saídas. Silva nos apresenta alguns conceitos que devem ser levados em consideração no cálculo da produtividade, os mesmos estão apresentados nos subtítulos abaixo.

2.6.1 Volume da Caçamba

É dada em metros cúbicos, considerada como a capacidade operacional, podendo ser calculada para duas situações, rasa ou coroada como pode ser visto na figura 22, conforme a fórmula:

$$V_c = \frac{C_{max}}{P_{esp}}$$

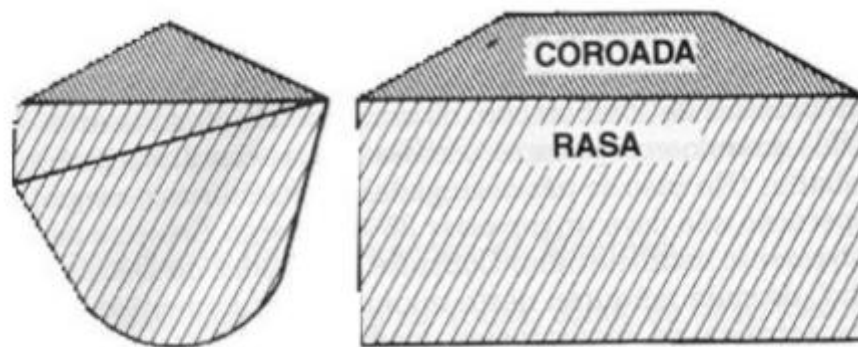
Onde:

V_c = volume da caçamba

C_{max} = carga máxima admissível na caçamba

P_{esp} = peso específico do material solto

Figure 22 - Diferenciação do volume da caçamba rasa e coroada



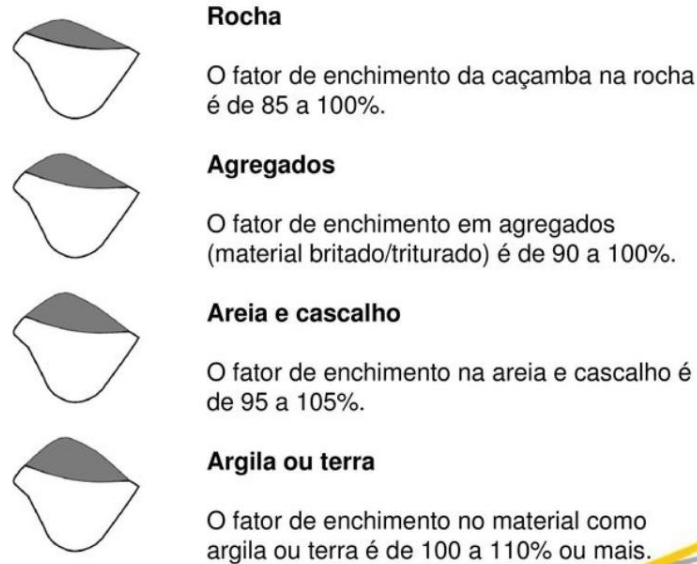
Fonte: Silva, 2011

2.6.2 Fator de Enchimento (Fill Factor)

Fator de enchimento pode ser entendido como um conjunto de fatores relacionados ao tipo de material, que apresentam indícios de como ocorrerá a aglomeração do material no interior na caçamba. Outras características podem influenciar o fator de enchimento como a

condição do desmonte, altura da bancada e da operação de escavo no material. A figura 23 apresenta alguns fatores de enchimento usuais.

Figure 23 - Fatores de enchimento para alguns materiais mais usuais



Fonte: SDLG Latin America, 201

2.6.3 Empolamento

Um material in situ, quando desagregado aumenta seu volume, esse aumento aparente é conhecido como empolamento. O entendimento desse fator é de suma importância, uma vez que diz respeito ao volume de material que será de fato transportado, podendo ser encontrado através das expressões abaixo:

$$\gamma = \gamma_c / \gamma_s$$

Onde:

γ = fator de empolamento;

γ_c = peso específico do material no corte;

γ_s = peso específico do material empolado ou solto;

$$e = (\gamma - 1) \times 100$$

Onde:

e = empolamento;

$$V_s = V_c \times \frac{\gamma_c}{\gamma_s} = V_c \times \gamma$$

Onde:

V_c = volume original do corpo, ou volume in situ;

V_s = volume do material após a fragmentação;

2.6.4 Carga de Tombamento (Tipping-Load)

Levando em consideração o porte da máquina é carga que faz com que a escavadeira tombe, ou seja a massa presente na caçamba exceda a massa do contrapeso, levando em conta condições de sustentação desfavoráveis.

2.6.5 Carga Útil (Pay-Load)

Carga suportada pela escavadeira com fator de segurança de 1,25, ou seja 80% da carga de tombamento. Por exemplo, se você tem uma carga de tombamento de 18,64t para o alcance máximo da lança, a carga útil será com o fator de segurança será $18,64/1,25$, que é igual a 14,91t.

2.6.6 Fator de Disponibilidade

Pode ser considerado como o tempo que o equipamento está disponível para uso, essencial para cálculos de rendimento de longo prazo, podendo ser afetado por fatores como má organização da mina, más condições de trabalhos, operações em muitos turnos, ou ainda por manutenções mal programadas, dividindo-se em disponibilidade física e mecânica. Seus valores são dados em porcentagem, e podem ser expressos pelas seguintes fórmulas:

Disponibilidade mecânica:

$$DM = \frac{(HT - MP + MC + MT)}{(HT \times 100)}$$

Onde:

DM = disponibilidade mecânica;

HT = corresponde às horas teóricas disponíveis por ano;

MP = manutenção preventiva;

MC = manutenção corretiva;

Disponibilidade física:

$$DF = \frac{(HP - HO)}{HP}$$

Onde:

DF = disponibilidade física, que representa a percentagem do tempo em que o equipamento fica à disposição do órgão operacional para a operação;

HP = horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica;

HO = horas de reparo na oficina ou no campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares;

2.6.7 Fator de Utilização

Fator também dado em porcentagem, entendido como o tempo em que o equipamento é utilizado dentro das horas disponíveis, ou seja, parcela que o equipamento está em operação.

A utilização é diretamente afetada por atrasos operacionais, mais comumente:

- Número de unidades ou porte maior/menor que o requerido;
- Paralisação de outros equipamentos;
- Falta de operador;
- Deficiência do operador;
- Condições climáticas que impeçam a operação dos equipamentos;
- Desmonte de rocha na mina;
- Preparação das frentes de lavra;

$$U = \frac{HT}{(HP - HO)}$$

Onde:

HT = total de horas efetivamente trabalhadas;

HP = horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica;

HO = horas de reparo na oficina ou no campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares.

2.6.8 Rendimento

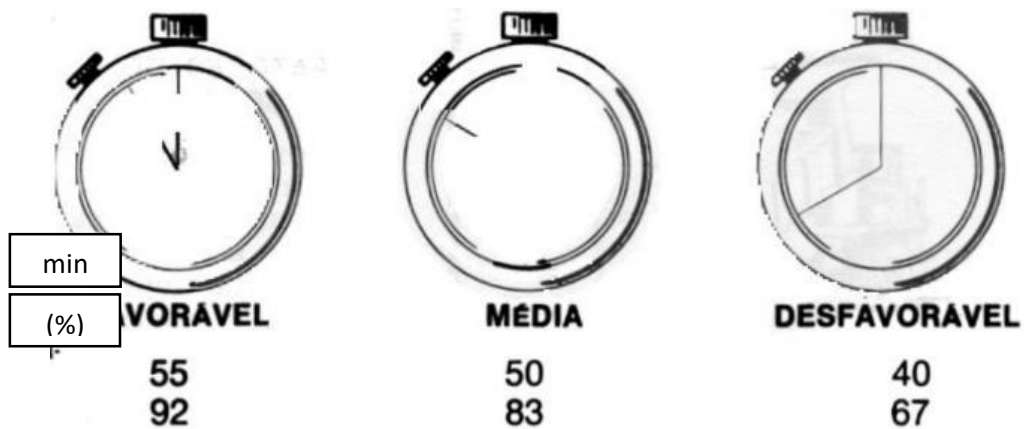
O rendimento pode ser obtido através da multiplicação da disponibilidade física pela utilização, relacionando as horas disponíveis com as horas efetivamente trabalhadas. Por exemplo, para uma empresa que trabalha em turnos de 8 horas, para um equipamento com disponibilidade de 85% e utilização de 80%, temos que o rendimento do turno é de 4,8h no turno.

2.6.9 Eficiência de Operação

Para uma máxima lucratividade das operações, é necessário que a produção seja mantida em ritmo estável, a figura 24 apresenta uma convenção encontrada no trabalho de Silva (2011) para eficiência de operação. Alguns fatores podem influenciar o máximo desempenho dos equipamentos, dentre outros, podemos listar:

- Características do material;
- Supervisão no trabalho;
- Falta de caminhão;
- Maior/menor habilidade do operador;
- Interrupções para a limpeza da frente de lavra;
- Desmonte de rochas;
- Capacidade da caçamba;
- Pequenas interrupções devido aos defeitos mecânicos, não computados na manutenção.

Figure 24 - Eficiência do trabalho comparada ao número de minutos de operação por hora



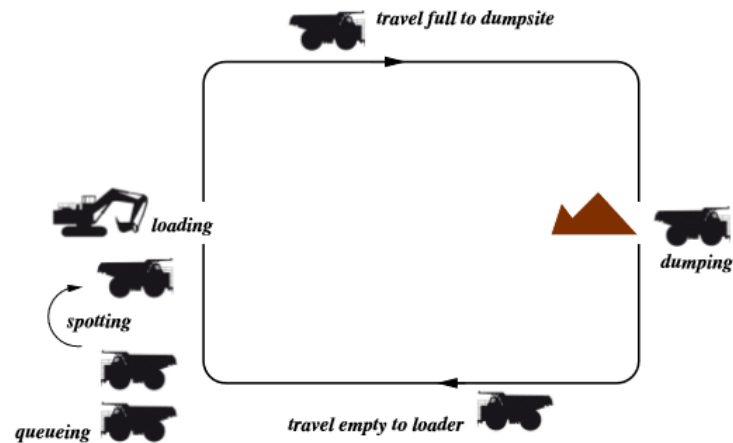
Fonte: Adaptado de Silva, 2011

2.6.10 Tempo de Ciclo

Um ciclo pode ser entendido segundo Silva, como o conjunto de operações realizadas por um equipamento até que o mesmo volte ao estado inicial, dentro de um período de tempo, por exemplo para escavadeiras um conjunto de ciclos comum seria: carga da caçamba, giro carregado, descarga e giro vazio.

O tempo de ciclo é considerado como o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens consecutivas do equipamento por qualquer ponto do ciclo. (Silva). Ainda segundo Silva, o ciclo produtivo pode ser dividido em seis componentes: carregamento, transporte, descarga, retorno, posicionamento e atraso. Na figura 25 podemos ver o exemplo de um tempo de ciclo de caminhão.

Figure 25 - Esquema de tempo de ciclo para caminhões



Fonte: Adaptado de Burt e Caccetta, 2013

2.6.11 Oee – Overall Equipment Efficiency – Eficiência Geral Do Equipamento

É o indicador utilizado para expressar a eficiência do equipamento, segundo Choudhary (2015) a OEE auxilia no entendimento das principais perdas de eficiência do equipamento, uma vez que pode ser obtida pelo produto da disponibilidade física, utilização e eficiência.

2.6.12 Operação Conjugada

A produção máxima da frota pode ser obtida analisando-se a disponibilidade, sendo que a distribuição binomial pode ser aplicada:

$$P_n = P_{ed} \times P_{ned} \times C_r$$

Onde:

P_n = probabilidade de ter exatamente n unidades disponíveis;

P_{ed} = probabilidade de uma unidade estar disponível;

P_{ned} = probabilidade de uma unidade não estar disponível;

C_r = combinação de itens tomados, sendo r em um certo tempo

2.6.13 Resistência e Coeficiente de Rolamento

A manutenção dos acessos utilizados pelos equipamentos é fundamental na redução de custos com pneus, além de garantir a velocidade de transporte. A resistência ao rolamento é dada em quilograma força por tonelada (Kgf/t) ou em porcentagem:

20 kgf de força necessária: 1 t de massa do veículo = 20 kgf/t = 2%

É a força necessária para superar o atrito interno dos rolamentos, para unidades sobre rodas pneumáticas, para superar o efeito de retardamento entre os pneus e o solo, incluindo a resistência gerada pela penetração dos pneus no solo, bem como do flexionamento do pneu devido a carga, como visto na figura 26.

Figure 26 - Efeitos causados aos pneus devido à resistência de rolamento



Fonte: Adaptado de Silva, 2011

Pode ser obtido através da fórmula:

$$Rr = K \times PBV$$

Onde:

Rr = resistência ao rolamento;

K = coeficiente de rolamento (kgf/t);

PBV = peso bruto do veículo (kgf).

2.6.14 Resistência da Rampa

É uma medida de força, devido à gravidade, que é preciso superar para movimentar a máquina em rampas desfavoráveis (aclives). A resistência da rampa é uma medida de força, devido à gravidade, que ajuda a movimentação da máquina em rampas favoráveis (declives).

As rampas, segundo Silva, são medidas em porcentagem de inclinação, sendo a relação entre a ascensão ou queda vertical e a distância horizontal em que ocorre essa ascensão ou queda. O fator de resistência da rampa (FRR) é medido em kgf/t, e é calculado pela multiplicação do kgf/t pela porcentagem de inclinação da rampa.

Resistência da rampa = FRR x PBV

Onde:

FRR= fator de resistência da rampa;

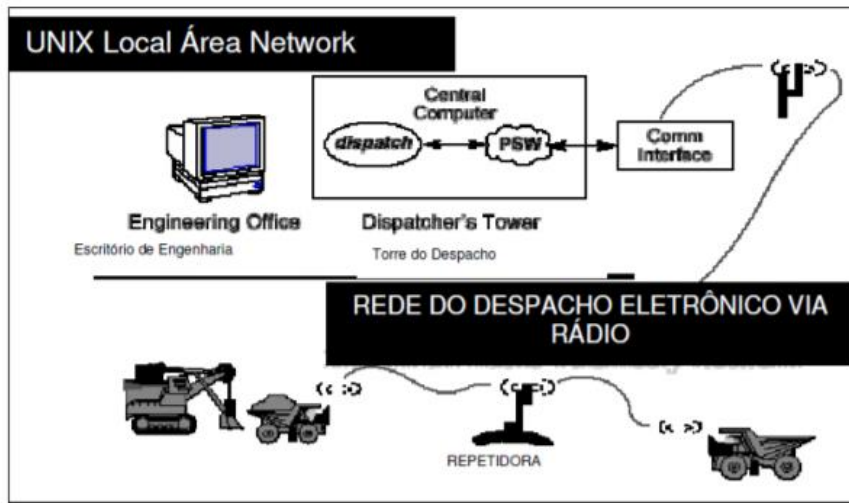
PBV= peso da máquina (t);

2.7 SISTEMA DE DESPACHO

O Sistema de despacho é utilizado para gestão de frotas, possibilitando que o controlador tenha uma visão macro das operações, criando fluxos de movimentação, alocando equipamentos de carregamento e transporte da melhor maneira possível. O Sistema de Despacho Eletrônico é uma ferramenta de monitoramento das atividades de manutenção e operação da Mina, pois o seu perfeito funcionamento garante informações confiáveis e seguras ao processo. (PEREIRA, 2016)

O funcionamento do despacho eletrônico funciona através do Sistema de Posicionamento Global (GPS), recebendo e enviando dados, podendo ser via rádio utilizando torres de comunicação ou ainda via wi-fi, como pode ser visto na figura 27. Segundo Pereira o despacho possibilita através de uma sala de controle, o monitoramento de parâmetros relevantes a operação, como velocidade, localização, nível de combustível, chegadas e saídas bem como quantidade e tipo de material transportado.

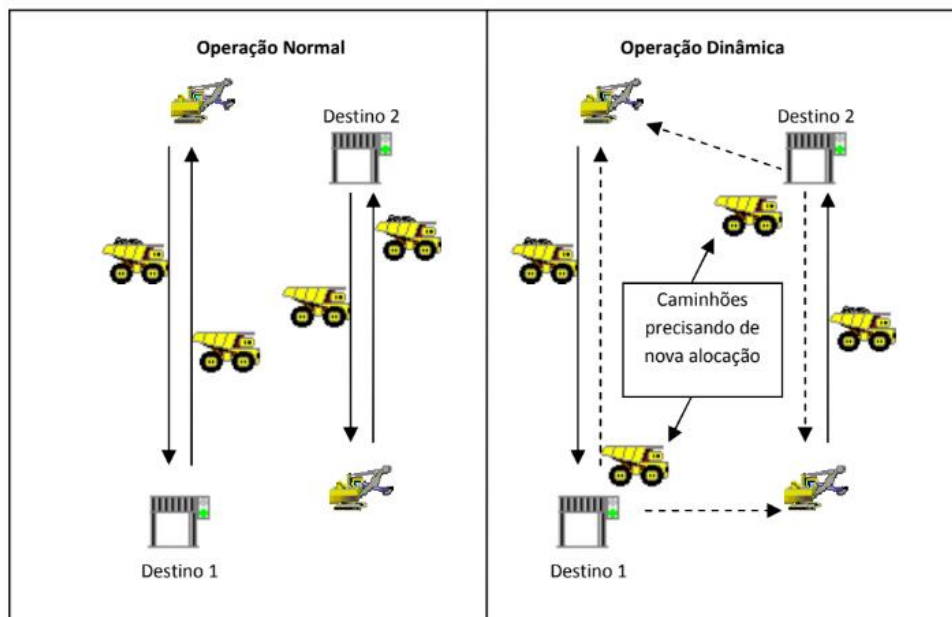
Figure 27 - Esquema simplificado do sistema de despacho



Fonte: Adaptado de Pereira, 2016

Existem duas maneiras principais para alocação de equipamentos, normal ou dinâmica como pode ser visto na figura 28, segundo Marinho quando há possibilidade de uma locação dinâmica, a implementação do ciclo conjugado possibilita uma redução no tempo de ciclo dos equipamentos de transporte, bem como o tempo de deslocamento vazio.

Figure 28 - Diferença entre uma operação normal e uma operação com despachos dinâmicos.



Fonte: Adaptado de Marinho, 2016

O SmartMine é desenvolvido pela Devex, desde 1997, e trata-se de um programa para controle do tráfego de equipamentos em operações mineiras, incluindo o despacho de caminhões para frentes de lavra, pilhas de estéril, britadores, etc., ponto ao qual se aplica o módulo de otimização. (DEVEX, 2019). Uma vez que o SmartMine possibilita uma alocação dinâmica, ainda segundo Marinho, tal ferramenta permite tomadas de decisão mais assertivas, avaliando produtividades dos equipamentos de carga, tempos de espera em filas, distâncias de transporte, dentre outras, aumentando assim a eficiência na utilização dos equipamentos.

2.8 SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

O problema de seleção de equipamentos, ou *Equipment Selection Problem* (ESP), em inglês, é muito comum na mineração, são levados em consideração vários critérios a respeito das características do empreendimento. Como principal função segundo Burt e Caccetta, selecionar uma frota que seja capaz de cumprir as demandas de movimentação de uma mineração, sem comprometer seu planejamento, mantendo a produtividade desejada, ainda para grandes distâncias médias de carregamento, prevendo também períodos de manutenção. Como o custo de aquisição e operação de equipamentos de mineração é elevado - geralmente entre 40-60% do custo total de movimentação da mina (Alarie e Gamache, 2002), o ESP pode ser entendido como uma política de mínimo custo possível.

Os principais insumos utilizados no ESP são geralmente segundo Burt e Caccetta, o cronograma de longo prazo, incluindo requisitos de carga e descarga, o conjunto de equipamentos de carga-transporte que podem ser comprados, informações a respeito dos rendimentos dos equipamentos e informações sobre os custos operacionais, bem como juros, manutenção, aquisição e depreciação do equipamento.

Cacceta e Burt apresentam duas maneiras que são comumente utilizadas no ESP, realizar a partição do mesmo e solucionar uma parte de cada vez, tornando-se difícil para longos períodos de tempo, e com o avanço da tecnologia tem sido comum a utilização de métodos holísticos computacionais, como será utilizado nesse trabalho. Utilizando a metodologia citada, as decisões a respeito da frota não são feitas de forma sequencial onde se escolhe primeiramente o tipo dos equipamentos de carga, depois o tipo dos equipamentos de transporte, realiza-se uma escolha conjunto.

Existe uma série de métodos que podem ser utilizados no auxílio da seleção de equipamentos, Trigueiros nos apresenta alguns métodos mais comuns, como o Valor Líquido

Presente (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e ainda faz uma análise mais aprofundada a respeito do Auxílio Multicritério à Decisão (AMD).

O VPL consiste de analisar conjuntos de equipamentos de carregamento e transporte, levando em conta custos de operação, manutenção e volume de material a ser transportado, optando pelo menor valor, como pode ser visto no exemplo da TABELA X, a grande falha do método segundo Trigueiros, é que não possui eficiência na previsão de mudanças que possam ocorrer ao longo dos anos. Sendo indicado quando os a vida útil, chamada por ele de horizonte, é o mesmo do projeto. Para horizontes diferentes ao do projeto, é indicado a utilização do VAE, uma vez que Machado nos diz que tal método equivale a repartir o VPL ao longo do horizonte do projeto, fazendo com que em uma série uniformemente equivalente possa de fato haver uma comparação legítima de diferentes cenários.

Figure 29 - Tabela de exemplos de configurações para o método VPL

Opção	CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS		Valor Presente Líquido (milhões de R\$)
	Carregamento	Transporte	
(1)	Pá carregadeira	Caminhão fora de estrada	206
(2)	Pá carregadeira	Transportador de correia	150
(3)	Escavadeira (hidráulica)	Caminhão fora de estrada	110
(4)	Escavadeira (hidráulica)	Transportador de correia	100
(5)	Escavadeira (elétrica)	Caminhão fora de estrada	120
(6)	Escavadeira (elétrica)	Transportador de correia	150
(7)	Retroescavadeira	Caminhão fora de estrada	170
(8)	Retroescavadeira	Transportador de correia	130

Fonte: Trigueiro

Após escolha do melhor método ainda são necessárias outras duas análises afim de aumentar a confiabilidade dos dados uma vez que para longos períodos de tempo fica difícil prever as variações das variáveis analisadas.

A primeira análise seria de Sensibilidade, que consiste em determinar quais são as variáveis críticas ou estratégicas de um projeto que influenciarão o retorno esperado. Após determinar quais são as variáveis mais importantes, limites são determinados para saber até quando uma variação em um parâmetro pode ou não inviabilizar um projeto do ponto de vista econômico. (TRIGUEIROS, 2012).

A segunda análise seria de Risco, que consiste em estabelecer variações para as variáveis críticas do processo, considerando uma gama de cenários, do pessimista ao otimista, empregando alguns métodos como:

Payback ajustado ao risco: consiste na diminuição do tempo de payback para situações em que se tenha um alto grau de risco. Essa técnica é muito criticada porque possui um alto grau de subjetividade;

Taxa interna de retorno (TIR) ajustada ao risco: consiste em se tentar aumentar a TIR dos fluxos de caixas futuros. Este método é criticado, pois assume que os riscos aumentam com o passar do tempo, fazendo com que as previsões dos fluxos de caixa futuros tenham muita incerteza e pouca influência na decisão;

Técnica das três estimativas: consiste na realização de intervalos de variação para as variáveis críticas gerando a hipótese pessimista, base e otimista. A crítica a esta metodologia recai sobre a probabilidade de todas as variáveis de uma hipótese serem iguais. Mas estes três casos extremos dificilmente acontecem na realidade;

Variáveis estratégicas ajustadas ao risco: consiste em determinada situação de risco considerar valores conservadores para uma ou mais variáveis críticas. Essa técnica possui a desvantagem de ao considerar valores muito baixos (conservadores) fazer com que a maioria dos projetos possam ser rejeitados, perdendo-se boas oportunidades de negócio. (TRIGUEIROS, 2012).

Ainda segundo Trigueiros, existem outros dois métodos mais robustos para parametrização das incertezas do projeto: o método analítico e o método de Monte Carlo, sendo o primeiro parecido ao método da Sensibilidade, porém adiciona probabilidade dentro das variações estabelecidas para o projeto, gerando todas as combinações possíveis para os intervalos selecionados, já o método de Monte Carlo consiste em levantamentos estatísticos dos conjuntos de amostra do projeto, de forma que sejam significativos. O procedimento é repetido uma série de vezes, sendo que a seleção das respostas é feita aleatoriamente, garantindo a independência entre as respostas. As inferências são feitas depois que os dados são tratados estatisticamente, obtendo assim respostas mais palpáveis ao projeto.

2.9. SIMULAÇÃO

Segundo Rachid (2019), a simulação é uma ferramenta flexível e intuitiva, que vem ganhando espaço devido ao desenvolvimento das capacidades de processamento de computadores, possibilitando maior complexidade de estudos, vista como uma vertente da Pesquisa Operacional.

2.9.1 Aplicações

Dentro do sistema de simulações, existe uma gama de possibilidades de aplicação, dependendo da natureza do problema a ser tratado, principalmente para fugir de decisões baseadas no empirismo.

Chwif e Medina (2015) fazem algumas considerações sobre a aplicação de simulação de eventos discretos:

- Se o problema for estático, isto é, se os estados do sistema não se alteram com o tempo, a Simulação de Eventos Discretos não tem qualquer utilidade prática.
- Se o problema for determinístico, isto é, não apresenta nenhum comportamento aleatório, a simulação apesar de poder ser utilizada, não é indicada, pois será subutilizada.
- Se o problema em questão for complexo, dinâmico e apresentar aleatoriedade, a melhor escolha é a simulação.

Segundo Freitas (2008) a simulação possui aplicações quando:

- O Sistema real ainda não existe: a simulação pode prever um cenário futuro;
- Experimentar com o sistema real é dispendioso: na mineração o custo de testar um equipamento na prática, após a compra, pode gerar uma série de problemas;
- Experimentar com o sistema real não é apropriado: um caso típico é o planejamento do atendimento de situações de emergência, por exemplo, um desastre aéreo em um aeroporto. Toda a logística para o acionamento e atuação de serviço prestados pela polícia, pelos bombeiros, por ambulâncias, pela emergência hospitalar, etc., podem ser modelados e tratados no computador. Não se pode provocar um desastre deste tipo para testar planos de emergência.

A simulação não pode ser considerada como sendo um método de otimização, a real aplicação é no modelamento da realidade, onde se deseja estimar sua performance, visto isso podemos apresentar dois tipos de modelos: contínuos e discretos.

O modelo poder ser considerado contínuo segundo Nogueira (2009), quando o estado do sistema muda continuamente em função do tempo, sendo que as iterações entre os elementos do sistema são descritos através de equações diferenciais.

No modelo discreto, ainda segundo Nogueira, o estado do sistema só muda no instante de ocorrência do evento, sendo que para o restante do tempo não há mudança no sistema, para tal caso é aplicado o conceito de filas, sendo aplicado para eventos que podem ser modelados como fila de espera, que é o caso da operação na mineração.

A teoria das filas, segundo Sinay et.al., é um setor da Pesquisa Operacional, que utiliza dos conceitos básicos de processos estocásticos e de matemática aplicada para analisar o fenômeno de formação de filas e suas características. No âmbito da mineração a dinâmica de operação, com equipamentos de carga e transporte, pode ser modelada como contínuas formações de filas, sendo na carga ou descarga.

2.9.2. Delphos Open Pit Simulator®

O DSIM é um simulador é baseado em eventos discretos, utilizando de vários inputs para criação do modelo. No layout são definidos as potenciais rotas, bem como os locais de carga e descarga, como visto na figura 30.

Figure 30 - layout DSIM



Fonte: acervo do autor

Cada frente de lavra deve ser identificada, bem como pilhas e britadores, e nelas são alocados as frotas de equipamento de carga e transporte, que podem ser especificadas pelo usuário, uma vez que a simulação pode ser feita para uma mina já em operação e com a frota já completa, como é o caso do presente estudo. Ainda é possível inserir o plano de produção desejado e outras interferências, como turno, refeição e manutenções preventivas.

2.10 Tempo Entre Manutenções e Tempo Médio de Reparo

Dentre os índices que normalmente são controlados pela equipe de manutenção temos o MTBF (mean time between failures ou tempo médio entre falhas) e MTTR (mean time to repair ou tempo médio para reparo).

O MTBF é a métrica que se refere à média de tempo transcorrido entre uma irregularidade e o próximo lapso. Essas falhas de tempo podem ser prognosticadas por meio de uma fórmula. Já o indicador de MTTR refere-se ao prazo médio que demora para realizar uma correção depois da eventualidade, o erro. Ou seja, é o tempo gasto durante a intervenção em um determinado processo. (GOMES, 2015)

3. METODOLOGIA

A Ferro+ Mineração realizou o estudo para a troca dos equipamentos de carga, levando em consideração os custos, em especial o consumo de combustível e de manutenção, chegando à conclusão que a substituição da escavadeira Liebherr 954 SME pela Volvo EC480D seria vantajosa, em contrapartida a metodologia adotada no presente trabalho é justificar também operacionalmente.

A metodologia adotada para o presente trabalho pode ser vista na figura 31.

Figure 31 - Metodologia utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Para os inputs do DSIM foram utilizadas informações fornecidas pela Ferro+, através do sistema de despacho Smart Mine e pelo setor de planejamento. Inicialmente foi definida a topografia, no formato de arquivo DXF, sendo necessária a criação das rotas.

As rotas foram feitas manualmente, levando em consideração os acessos disponíveis na topografia, para simular a comparação entre os equipamentos de carga foram escolhidas pelo autor duas frentes de trabalho, definidas como 1207 e 1267, que tem relação com o posicionamento dos bancos.

3.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Foram estabelecidos como limite de massa 13.000 toneladas por frente, para minério e estéril, que seria a base de comparação entre as escavadeiras.

Os dados passaram por uma etapa de verificação. O intuito foi analisar a consistência dos mesmos a fim de detectar a existência de dados discrepantes ou duplicados que possam ter sido originados de uma falha durante o processamento dos mesmos. O DSIM, permite a utilização de distribuições de probabilidade ou por meio determinístico, para os tempos de MTTR e MTBF, além dos atrasos operacionais e carga média.

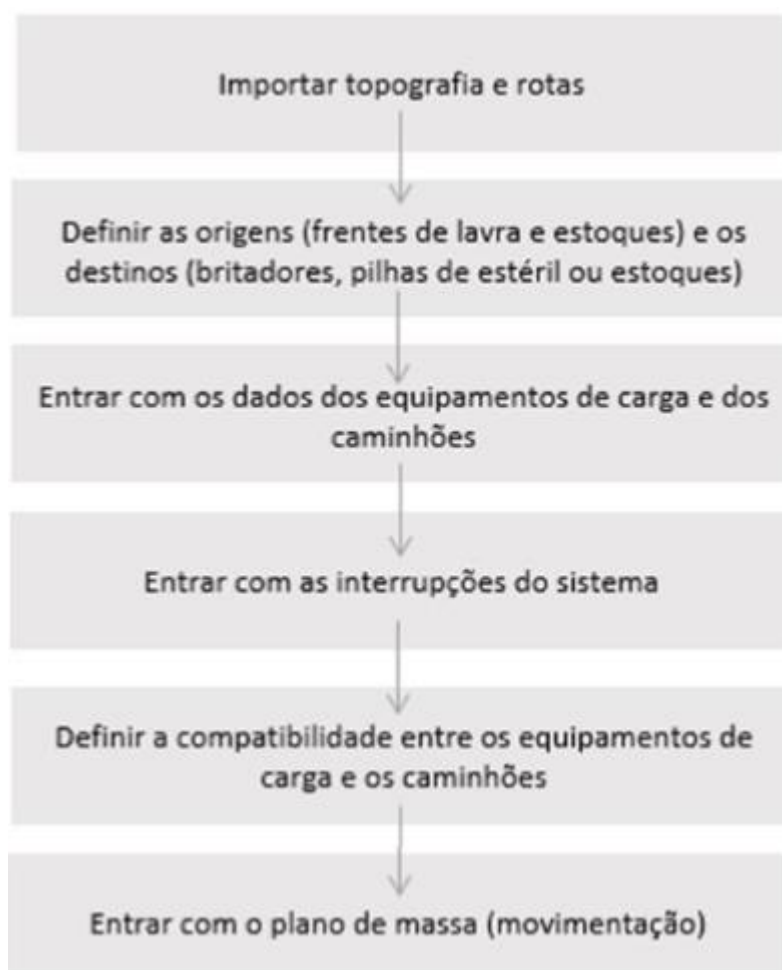
Para o presente trabalho foram utilizados valores médios, para os seguintes parâmetros:

- Índices de manutenção (MTBF e MTTR);
- Velocidades;
- Tempos de carregamento, manobra e basculamento;
- Consumo de combustível;
- Paradas: troca de turno, refeição e abastecimento.

3.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo computacional foi desenvolvido no software de simulação DSIM. Sendo assim, o ciclo de construção do modelo foi desenvolvido de acordo com o que o programa especifica, visto na figura 32.

Figure 32 - Sequência seguida para criação do modelo no DSIM



Fonte: Adaptado de DSSIM, 2016

Com a topografia importada e a criação das rotas, foram definidas as frentes de trabalho e os pontos de descarga, sendo eles a pilha de estéril sul, pilha de estéril norte, britador e o estoque de minério, utilizado quando o britador se encontrasse em manutenção. Para o britador foi definido uma capacidade de toneladas por hora de 800 toneladas.

Na criação da frota de caminhões que realizariam a movimentação, foram imputados caminhões Scania G480, com capacidade de carga de 48t, e para os equipamentos de carga foram criadas as duas escavadeiras, LIEBHERR R 954 SME e a VOLVO EC480D e foram definidos os tempos médios entre manutenções e tempo médio de reparo, que podem ser observado na TABELA X.

TEMPOS DE MANUTENÇÃO	MTBF	MTTR
ESC VOLVO 480	112:00:00	2:25:00
ESC LIB 954	80:00:00	4:25:00
SCANIA G480	169:17:00	4:19:00

Definida a frota de caminhões, os tempos de carregamento das duas escavadeiras foram definidos em campo, como visto na TABELA X. Esses tempos foram utilizados para elaboração da compatibilidade necessária do simulador, criando a correlação entre equipamento de carga e transporte definindo por fim o plano de movimentação de massa.

Tempo de Carregamento	SCANIA	
	ESTÉRIL	MINÉRIO
ESC VOLVO 480	02:48	02:42
ESC LIB 954	02:35	01:57

Com todos os equipamentos criados foram definidas as velocidades máximas de transporte, sendo 30km/h com caminhão carregado e 35km/h para o caminhão vazio, além do consumo de combustível de 25 l/h para as Scania G480, informações fornecidas pela Ferro + Mineração. Finalmente o último input foi definido também em campo, os tempos de manobra, sendo adotados, 50 segundos para o carregamento e para o despejo, sendo um tempo médio.

3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo computacional real foi validado através da comparação dos resultados da simulação com a real situação de operação. Inicialmente foram feitas 50 réplicas, mas para obtenção de melhores resultados, foram feitas 100 réplicas para os resultados finais.

Levando em consideração a realidade, foram alocados 3 caminhões por frente, para estéril e minério, além dos atrasos operacionais: troca de turno, refeição e abastecimento, foi criado um evento de manutenção para dois caminhões, em de cada frente, afim de simular uma manutenção do dia a dia.

3.5. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Foram simulados quatro cenários distintos, sendo eles:

- I) Duas escavadeiras VOLVO EC 480 D operando com estéril, sendo que a frente 1207 envia material para pilha norte, e a 1267 para a pilha sul, operados com a Scania G480.
- II) Duas escavadeiras VOLVO EC 480 D operando com minério, sendo enviado para o britador e estoque de minério, utilizando Scania G480 para as frente;
- III) Duas escavadeiras R 954 SME operando com estéril, sendo que a frente 1207 envia material para pilha norte, e a 1267 para a pilha sul, operados com a Scania G480.
- IV) Duas escavadeiras R 954 SME operando com minério, sendo enviado para o britador e estoque de minério, utilizando Scania G480 para as frente.

4. ESTUDO DE CASO

O Grupo J.Mendes possui mais de 50 anos, possuindo vários empreendimentos, e dentre eles a Ferro+ Mineração, que existe desde 2007 com localização nos municípios de Ouro Preto e Congonhas, com cerca de 400 colaboradores. As principais atividades são a extração, beneficiamento e comercialização do minério de ferro, sendo que a mina possui capacidade de produção de cerca de 2,5Mta. Como observado na figura 33, a Ferro+ se encontra a cerca de 68km de Belo Horizonte.

Figure 33 - Localização da Mina Ouro Preto- Ferro + Mineração



Fonte: site da Ferro+ Mineração

A mineração Ferro+ tem sua área de operação dentro do Quadrilátero Ferrífero, que pode ser vista como uma estrutura geológica quadrada, com quase 7000 Km² de extensão, segundo Roeser e Roeser (2010). Geologicamente o Quadrilátero Ferrífero possui grande diversidade de rochas e minerais, apresentando depósitos de ferro e ouro de boa qualidade, se encontra na porção sul do Cráton São Francisco, como visto na figura 34, formado por três unidades de rocha metassedimentar, segundo Roeser e Roeser (2010), supergrupo arqueano Rio das Velhas, supergrupo proterozóico Minas e o grupo proterozóico Itacolomy.

Figure 34 - Quadrilátero ferrífero



Fonte: Roeser e Roeser

Segundo Silva e Carneiro(2009) o Supergrupo Rio das Velhas pode ser considerado uma sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares de idade Arqueana do tipo *greenstone belt*. Com ampla distribuição por todo o Quadrilátero Ferrífero, é composto pelos Grupos Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné.

O Grupo Itacolomy é o topo da sequência litoestratigráfica e segundo Silva e Carneiro (2009) é constituído predominantemente por quartzitos e metaconglomerados de origem continental, e o supergrupo minas segundo Roeser e Roeser é composto principalmente por metassedimentos pelíticos e quartzosos, sendo discordante acima do *greenstone belt* Rio das Velhas. O minério de fato é o itabirito friável, conhecidos como *banded Iron Formations* (BIFs).

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OPERAÇÃO

A mina Fero+ é dividida em quatro cavas, central, sul, norte e leste, sendo que no momento estão em operação apenas central e sul, que devido ao avanço se tornaram praticamente uma única cava.

A cava norte vem sendo utilizada para disposição de rejeito seco, como não há operação com barragem de rejeitos, os resíduos vindos da instalação de tratamentos e depositado nas baias, onde o material é assoreado e posteriormente carregado para baias de rejeito para secagem, quando a umidade necessária é atingida o material é empilhado.

A lavra de minério é feita mais comumente com duas ou três frentes, sendo levados para o ROM, e para as plantas móveis, onde o material é separado em pilhas, atualmente o material alimentado na usina é oriundo de quatro pilhas, sendo:

Pilha 1: minério rico

Pilha 2: minério intermediário ou canga

Pilha 3: minério intermediário e/ou silicioso

Pilha 4: Assoreado

A composição das pilhas pode variar conforme a necessidade, na usina o material é fragmentado em um britador primário e classificado por peneiras em 4 produtos: Granulado, Lump Ore, Hematitinha e Sínter (em ordem de classificação mais grossa para a mais fina). O passante fino destas peneiras alimenta a concentração magnética que é a responsável pela produção do Pellet Feed.

Os materiais com granulometria acima do Pellet Feed são dispostos em silos, de onde são transportados por caminhões para o pátio de vendas. As pilhas formadas no pátio são divididas por produtos, qualidade e granulometria, sendo destinados aos clientes através de vias rodoviárias, o transporte é feito parte por terceiros e parte por frota própria.

Como citado acima o material de prevalência é friável, não havendo operação de perfuração e detonação, somente para regularização de eventuais blocos, para materiais compactos como a canga o desmonte é feito por rompedor.

A frota utilizada na lavra, vem passando por modificações que motivaram o estudo, além da troca da escavadeira hidráulica Liebherr R 954 SME pela Volvo EC480D, há também a alteração do caminhão Mercedes Actros 8x4 para Scania 480G, além do uso de caminhões articulados para remoção de estéril, na TABELA X segue a frota em operação.

Tipo de Equipamento: Transporte		
Grupo de Equipamentos: Mercedes Actros 8x4		
Modelo		Quantidade
Caminhão	MB Actros 8x4	3
Grupo de Equipamentos: SCANIA G480		
Modelo		Quantidade
Caminhão	Scania G440	27
Grupo de Equipamentos: Volvo A40F		
Modelo		Quantidade
Caminhão	Volvo A40	3
Tipo de Equipamento: Carga		
Grupo de Equipamentos: CaterPillar 972L		
Modelo		Quantidade
Carregadeira	CAT 966	12
Grupo de Equipamentos: CR Volvo L250G		
Modelo		Quantidade
Carregadeira	Volvo L250	1
Grupo de Equipamentos: ESC LIEBHERR R954SME		
Modelo		Quantidade
Escavadeira	Liebherr R954C	1
Grupo de Equipamentos: ESC Volvo EC480D		
Modelo		Quantidade
Escavadeira	Volvo EC480D	9
Grupo de Equipamentos: Escavadeira Hitachi		
Modelo		Quantidade
Escavadeira	Hitachi 350CL	2
Tipo de Equipamento: Auxiliar		
Grupo de Equipamentos: Caminhão Comboio		
Modelo		Quantidade
Trator Esteira	Caminhão Comboio	1
Grupo de Equipamentos: Caminhão Pipa		
Modelo		Quantidade
Pipa	Pipa Axor 6x4	2
Grupo de Equipamentos: Motoniveladora		
Modelo		Quantidade
Patrol	Volvo G940	1
Grupo de Equipamentos: Rolo Compactador		
Modelo		Quantidade
Trator Pneu	Rolo Compactador	1
Grupo de Equipamentos: TR CaterPillar		
Modelo		Quantidade
Trator Esteira	CaterPillar D6	1
Grupo de Equipamentos: TR John Deere 850J		
Modelo		Quantidade
Trator Esteira	John Deere 850J	2
Grupo de Equipamentos: Trator Liebherr		
Modelo		Quantidade
Trator Esteira	Liebherr 754	1

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir são referentes aos resultados gerados pela simulação. Sendo que cada cenário foi replicado 100 vezes, com cada réplica representando 24 horas.

A primeira dificuldade encontrada na criação do modelo, foi a desenhos das rotas, uma vez que a Ferro+ Mineração estava passando por reformulação de frota, e nem todos os equipamentos possuíam GPS, sendo assim não era possível a obtenção dos trajetos reais realizados.

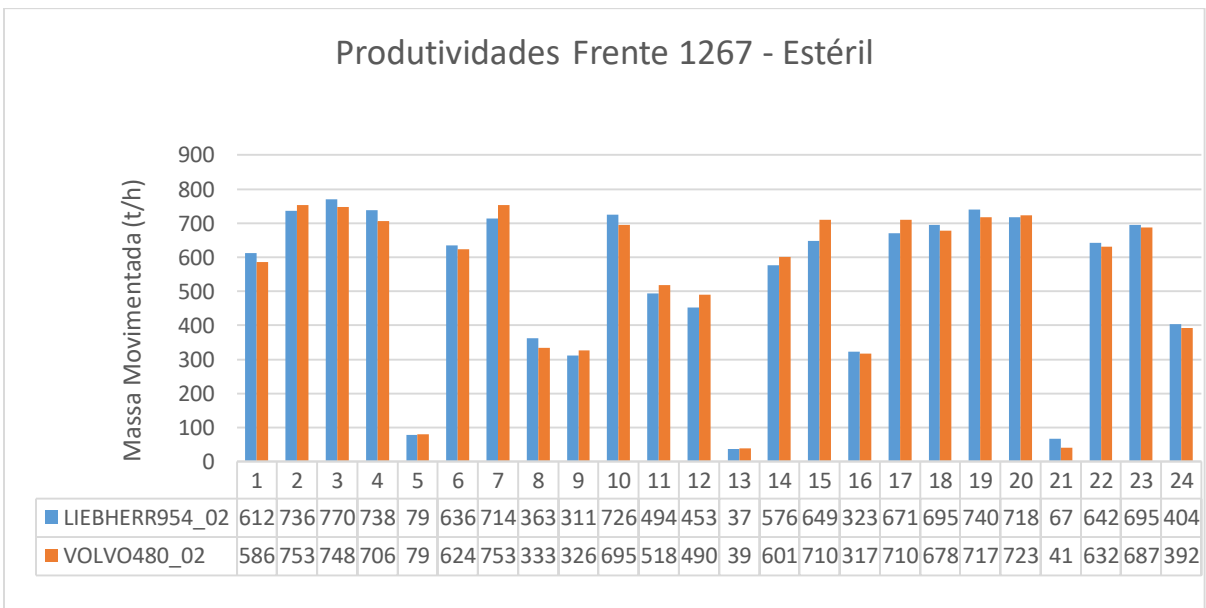
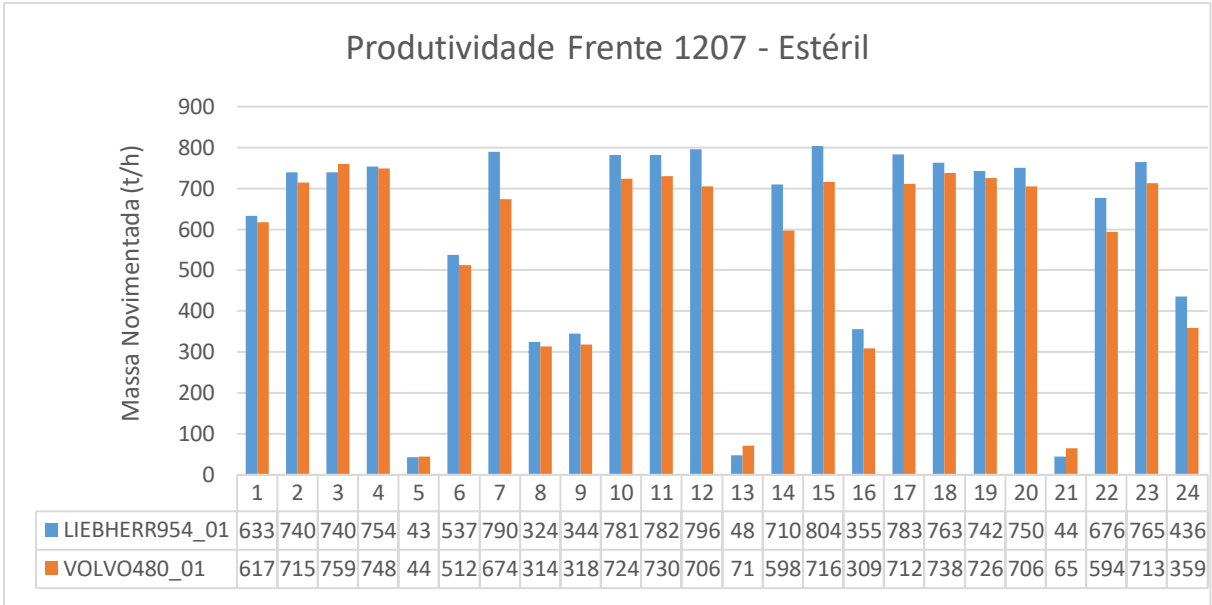
As rotas utilizadas na simulação foram feitas manualmente, procurando melhor aproximação possível do real. Na realidade de operação são utilizados 3 ou 4 caminhões por frente, sendo assim foi a premissa adotada para elaboração dos cenários iniciais. Com o objetivo de verificar se a mudança de uma escavadeira de maior porte para uma de menor porte, foram criados os 4 cenários, afim de analisar a massa movimentada, bem como a ociosidade da operação e velocidade de transporte.

Outra dificuldade encontrada na construção dos cenários, foi o input das perdas operacionais, na realidade existem uma série de atrasos operacionais, mas de modo a simplificar o modelo foram levados em conta apenas as trocas de turno, refeições e abastecimento, além de dois eventos de manutenção, afetando as frotas das duas frentes.

5.1. CENÁRIOS DE ESTÉRIL

Após validação do modelo, utilizando de 100 réplicas os resultados melhoraram, obteve-se uma massa para pilha de estéril sul de 12.849 toneladas, e para pilha norte de 14.142 toneladas, no caso da Liebherr, e uma massa para pilha de estéril sul de 12.813 toneladas, e para pilha norte de 13.106 toneladas, no caso da Volvo, a diferença de massa transportada foi de cerca de 4 %. As massas para a pilha sul são menores devido à maior distância média de transporte.

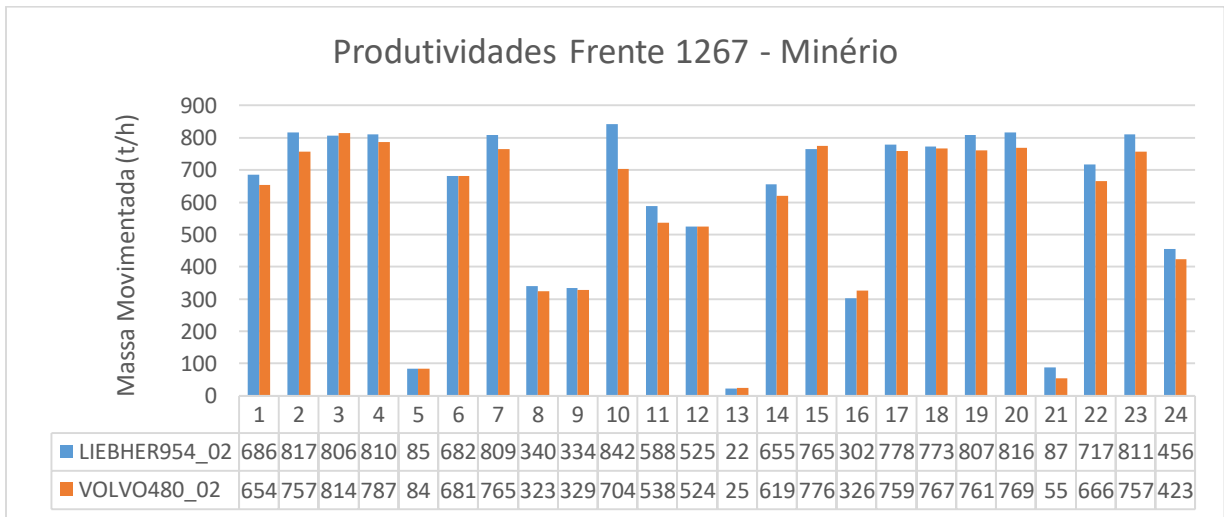
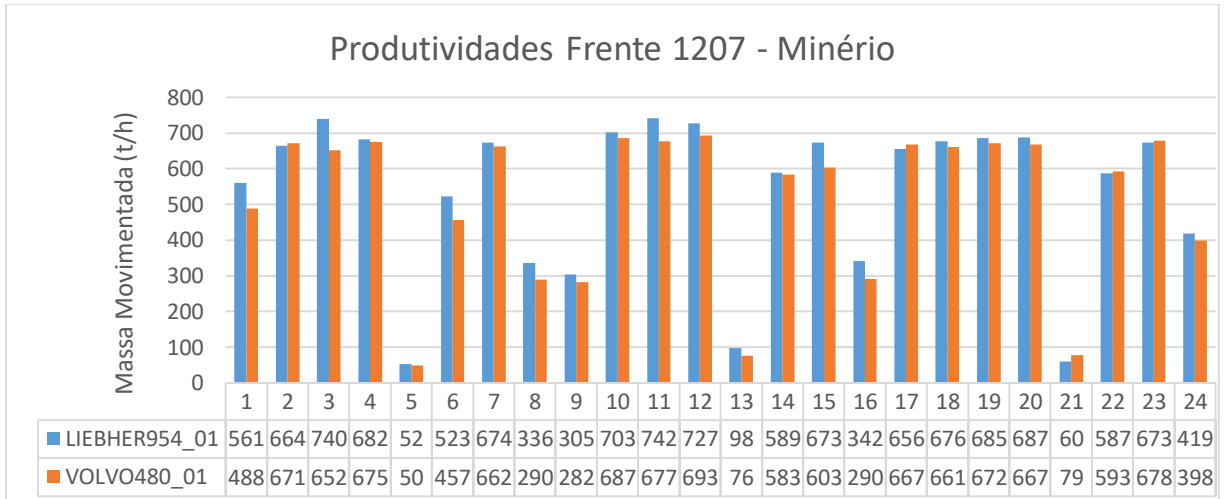
Nos apontamentos a Liebherr teve um tempo efetivo de trabalho na faixa de 53,5 a 58,8%, e uma perda operacional de 4 a 8%, já a Volvo obteve um tempo efetivo de trabalho de 61 a 63%, e uma perda de 4 a 6%. Obteve-se também uma velocidade global do sistema de 22 Km/h, aproximadamente para as duas máquinas, além de uma produtividade média de 540 t/h para Volvo e 562 t/h para a Liebherr. As informações de comparação entre as massas movimentadas entre as duas escavadeiras podem ser vistas nos Gráficos X e Y.



5.2. CENÁRIOS DE MINÉRIO

Os resultados para estéril e minério foram analisados a parte, devido as rotas utilizadas e os destinos diferentes, além dos tempo de carregamento devido ao tipo de material materiais distintos, uma vez que o empolamento do estéril é maior. No caso da Liebherr foram enviados ao britador primário e estoque uma massa de 27.166 toneladas, e a Volvo uma massa de 25.916 toneladas, uma massa 5% menor.

No cenário do minério as horas efetivas da Volvo foram de 48 a 54%, e 36 a 41 % para a Liebherr, sendo que a Volvo obteve uma perda operacional de até 16% menor em relação a Liebherr com até 25% de perda. Analisando as duas máquinas, obtemos uma produtividade de 566 t/h para a Liebherr e 540t/h para a Volvo. O gráfico de comparação entre as massas movimentadas pelas duas escavadeiras para os mesmos frentes por hora, pode ser visto abaixo (gráfico X e Y).



6. CONCLUSÃO

No momento da opção por um equipamento de carga de menor porte, a Ferro+ Mineração realizou estudo a respeito das máquinas, levando em consideração em especial o consumo de combustível por hora das máquinas, além do custo de peça.

Levando em consideração tal estudo obteve-se um custo de manutenção aproximado, para ambas as máquinas, já o consumo de combustível levantando informações chegaram a conclusão de que a LIEBHERR R 954SME, consumia 15 l/h a mais do que a VOLVO EC480D, cerca de 30% a mais, segundo dados Ferro+.

O presente trabalho tem como objetivo a validação da decisão por meio da simulação, e para tal foi utilizado o DSIM, que utilizada do conceito de eventos discretos para simular a realidade. Feito o estudo percebeu-se para estéril e minério uma diferença de massa movimentada 4 e 5% respectivamente menor para a VOLVO EC480D.

Embora a massa movimentada seja menor, a VOLVO EC480D, apresentou uma porcentagem maior de tempo efetivo de trabalho, ou seja, tempo maior carregando caminhões, e ainda com perdas operacionais reduzidas em relação à LIEBHERR R 954SME, para os cenários de minério é possível dizer que o aumento de um caminhão por frente poderia reduzir o tempo de espera por caminhão das duas escavadeiras.

Levando em conta todos os fatores citados acima, é possível concluir que além do empirismo na decisão de uma troca de equipamentos, pode ser substituído pela simulação computacional, como visto a massa menor movimentada se justifica com o consumo de combustível elevado por parte da LIEBHERR R 954SME, tornando a VOLVO EC480D, mais viável ao empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALARIE, S., M. Gamache. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**. 2002.

ALMEIDA, Tamires. **O que é rolo compressor?** IndústriaHoje. 2016. Disponível em: <<https://industriahoje.com.br/o-que-e-um-rolo-compactador>>. Acesso em: julho 2019.

ALMEIDA, Tamires. **O que é um caminhão articulado?** IndústriaHoje. 2016. Disponível em: <<https://industriahoje.com.br/o-que-e-um-caminhao-articulado>>. Acesso em: julho 2019.

ANDREATTA, Gorki Pomar et al. A suíte metatholeiítica da seqüência metavulcanossedimentar Rio Manso, Quadrilátero Ferrífero (MG). **REM: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 4, p. 423-430, 2009.

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. **Carregadeiras de Esteiras 973K**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/track-loaders/track-loaders/1000033102.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Draglines 8.750**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/draglines/draglines/18370146.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Escavadeira a cabo 79495 com fechado do cabo**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/electric-rope-shovels/electric-rope-shovels/18416406.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Escavadeiras Hidráulicas de mineração 6060/6060 FS**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/hydraulic-mining-shovels/hydraulic-mining-shovels/18313392.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Escrêperes-Tratores de Rodas**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-tractor-scraper/coal-bowl-scraper/17745920.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Pás-carregadeiras de rodas 980L**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/1000027523.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Retroescavadeira 420F/420F IT**. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/backhoe-loaders/center-pivot/18402450.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Tratores de Rodas 824K.** Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/wheel-dozers/wheel-dozers/18591262.html>. Acesso em: julho de 2019.

CATTERPILAR. **Bulldôzers D8T.** Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/dozers/large-dozers/1000031708.html>. Acesso em: julho de 2019.

CHOUDHARY, Ram Prasad. Optimization of Load-Haul-Dump Mining System by OEE and Match Factor for Surface Mining. **International Journal of Applied Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 96-102, 2015.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso Celso. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações.** Autores, 2007. 4ª Edição. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2015

COELHO, Guilherme Freitas et al. Modelo de simulação da atividade de lavra em minas a céu aberto: Um estudo de caso em uma mineradora no estado do Pará. **InterSciencePlace**, v. 11, n. 1, 2016.

CONEXÃO MINREAL. **Análise correta da caçamba mais adequada é importante ao adquirir uma escavadeira.** 2017. Disponível em: <<http://www.conexaomineral.com.br/noticia/750/analise-correta-da-cacamba-mais-adequada-e-importante-ao-adquirir-uma-escavadeira.html>>. Acesso em: julho de 2019.

COUTINHO, Heitor Lobo. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

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

DANIELS, Timothy Esmond. **SDLG Latin America: Sales Convencion.** Disponível em: <<https://slideplayer.com/slide/6205135/>>. Acesso em: julho 2019.

DE BRUNS, Rafael; SONCIM, Sérgio Pacífico; DE SINAY-PHD, Maria Cristina Fogliatti. **Pesquisa operacional: uma aplicação da teoria das filas a um sistema de atendimento.** 2001.

DEERE, John. **Motoniveladora 670G.** Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/motoniveladoras/670g/>>. Acesso em: julho de 2019.

DELPHOS. **Manual do DSIM Open Pit.** v1.2. 2016. Disponível em: <<http://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/99-dsim-open-pit>>. Acesso em: julho de 2019.

DNP PERNAMBUCO. **Normas Reguladoras de Mineração – Lavra a Céu Aberto.** Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_02.htm>. Acesso em: julho de 2019.

FREITAS, S. B. M. **Planejamento estocástico de lavra: metodologias de simulação, otimização e gestão de risco para a mina do futuro.** 2015. 181 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GOMES, Pedro César Tebaldi. **MTTR e MTBF: O que são e quais suas diferenças.** 2015. Disponível em: <<https://www.opservices.com.br/mttr-e-mtbf/>>. Acesso em: julho 2019.

HARDY, Raymond J. **Selection criteria for loading and hauling equipment-open pit mining applications**. 2007. Tese de Doutorado. Curtin University.

LIEBHERR. **New Liebherr R 954 SME Hydraulic Excavators operating successfully in Brazil**. 2016. Disponível: <<https://www.liebherr.com/en/gbr/latest-news/news-press-releases/detail/new-liebherr-r-954-sme-hydraulic-excavators-operating-successfully-in-brazil.html>>. Acesso em: julho de 2019.

LIEBHERR. **R 960 SME Litronic**. Disponível em: <<https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/maquinas-de-construcao/terraplanagem/escavadeiras-de-lagartas/details/298229.html>>. Acesso em: julho de 2019.

LOPES, José Raimundo. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit”**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

MACHADO, Isaac. Métodos e critérios de avaliação de investimentos Capitais. Disciplina Engenharia Econômica. Universidade Federal do Ceará.

MAURÍCIO PEREIRA DA SILVA, Adriana. **Sustentabilidade operacional no contexto da indústria Mineral: caso da lavra de caulim no município de Cabo de Santo Agostinho**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

NR-22. **Norma Regulamentadora 22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Disponível em: <<http://www.normaslegais.com.br/legislacao/trabalhista/nr/nr22.htm>>. Acesso em: julho 2019.

OMACHI, Geraldo Yasujiro. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

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.

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.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O quadrilátero ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre a sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. **Revista Geonomos Instituto de Geociências UFMG**, v. 18, n. 1, p. 33-37, 2010.

SILVA, Valdir Costa e. Curso min 112: operações Mineiras. Ouro Preto. 2011. (Apostila).

SOUSA JUNIOR, Wilson Trigueiro de. **Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão: estudo de caso: mineração de bauxita**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

SOUZA, Henrique Capper Alves de; PINTO, Mário Abrantes da Silva. **Minério de ferro: seus reflexos na economia nacional e internacional: CACEX**, 1994.

SOUZA, HR de; CATALANI, Guilherme. **Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha**. São Paulo: Pini, p. 653, 2007.

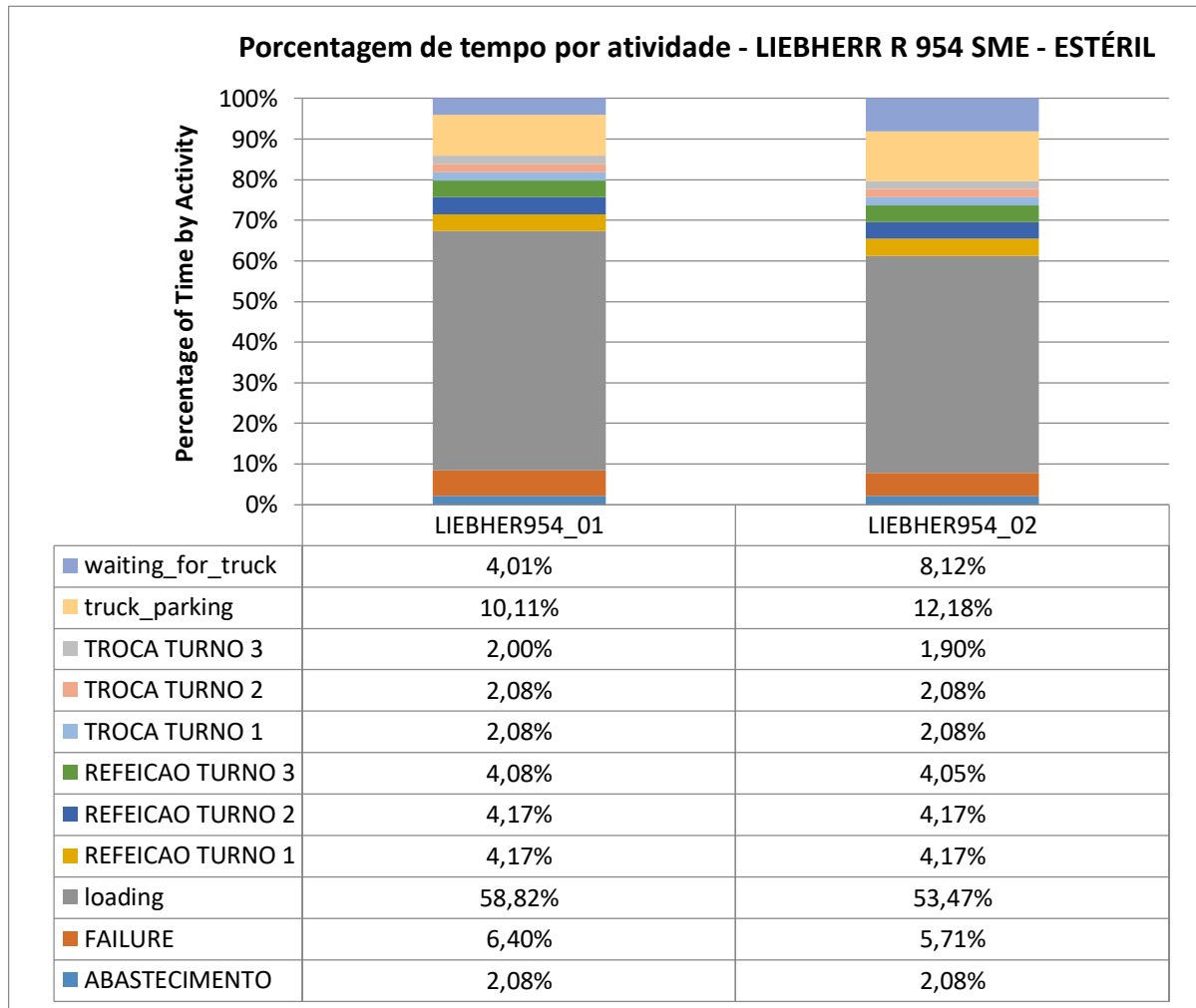
TAKRAF, Tenova. **Bucket-Wheel Excavators**. Disponível em: <<https://www.takraf.tenova.com/product/bucket-wheel-excavators/>>. Acesso em: julho de 2019.

TOMI, Giorgio. **Lavras em Bancada Aula 3: Lavra a Céu Aberto**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4096024/mod_resource/content/1/PMI3325-Aula%2003%20Lavra%20em%20Bancadas%20%282017%29.pdf>. Acesso em: julho 2019.

VOLVO. **Escavadeira Volvo EC380D, EC480D**. 2013. Disponível em: <https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/excavators/crawler-excavators/brochures/brochure_ec380d_ec480d_t3_pt_br_83_20031460_d.pdf?v=4p41Pw>. Acesso em: julho 2019.

ANEXO I

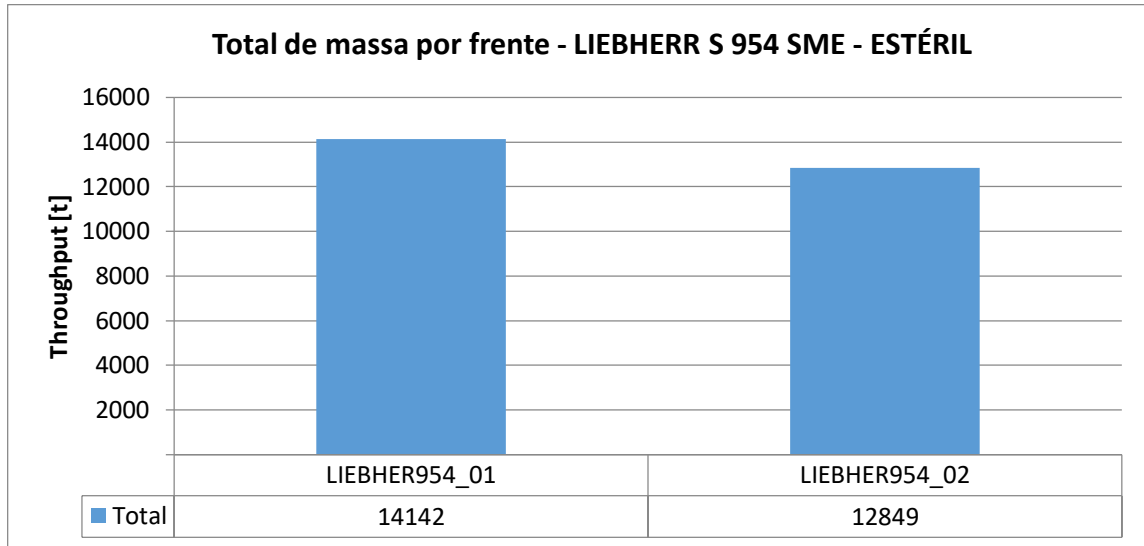
GRÁFICOS PORCENTAGEM DE TEMPO POR ATIVIDADE LIEBHERR R 954 SME NO ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO II

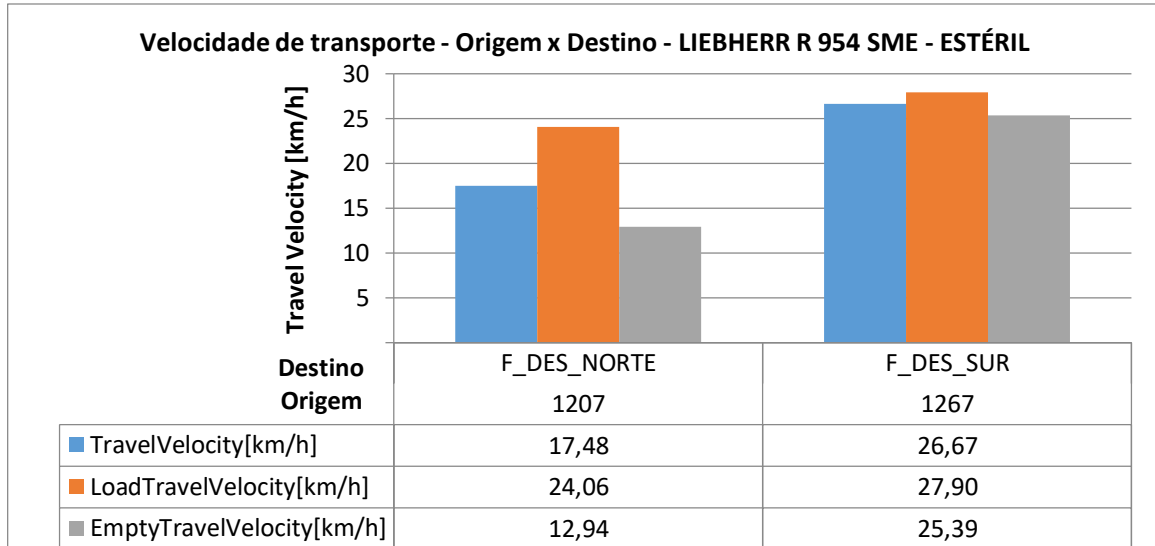
GRÁFICO TOTAL DE MASSA POR FRENTE LIEBHERR S954 SME - ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO III

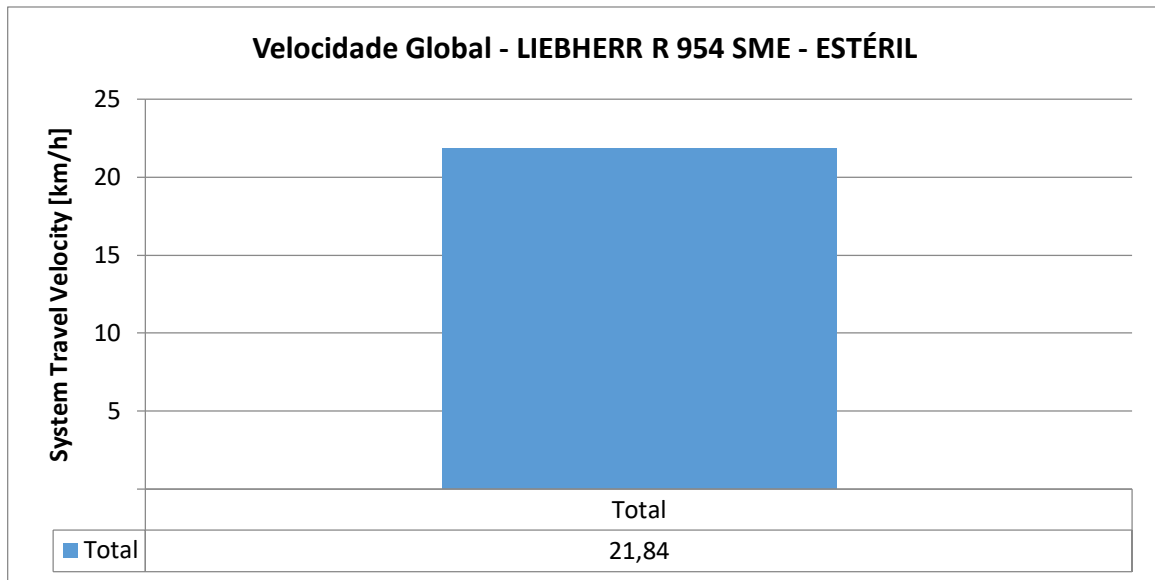
GRÁFICO VELOCIDADE DE TRANSPORTE LIEBHERR R 954 SME - ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO IV

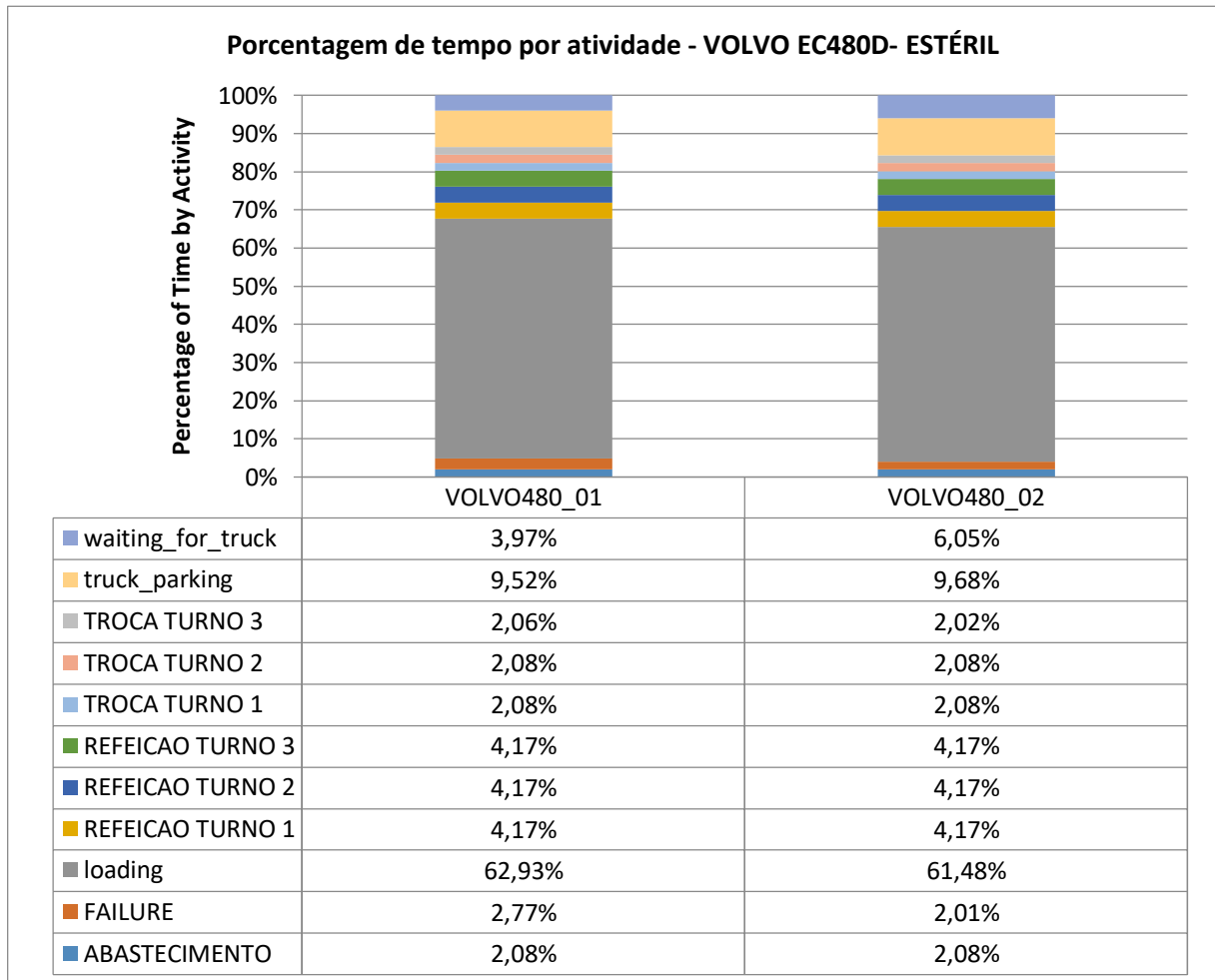
GRÁFICO VELOCIDADE GLOBAL LIEBHERR R 954 SME - ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO V

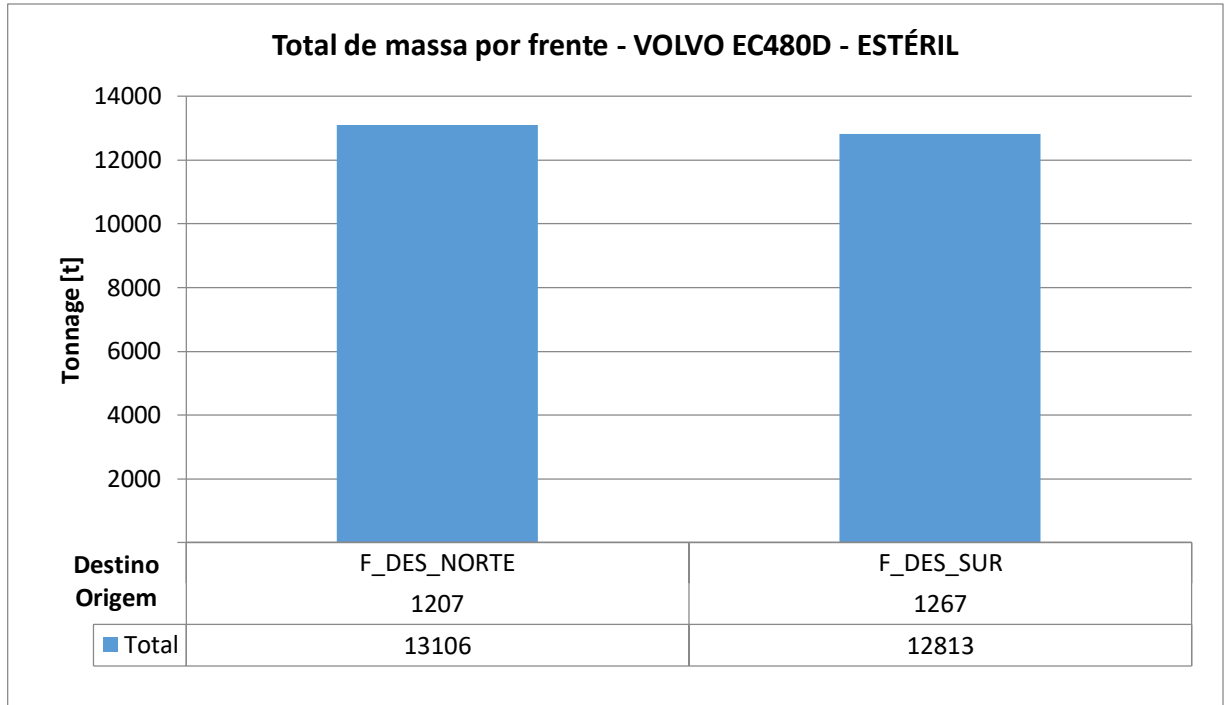
GRÁFICOS PORCENTAGEM DE TEMPO POR ATIVIDADE VOLVO EC480D NO ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO VI

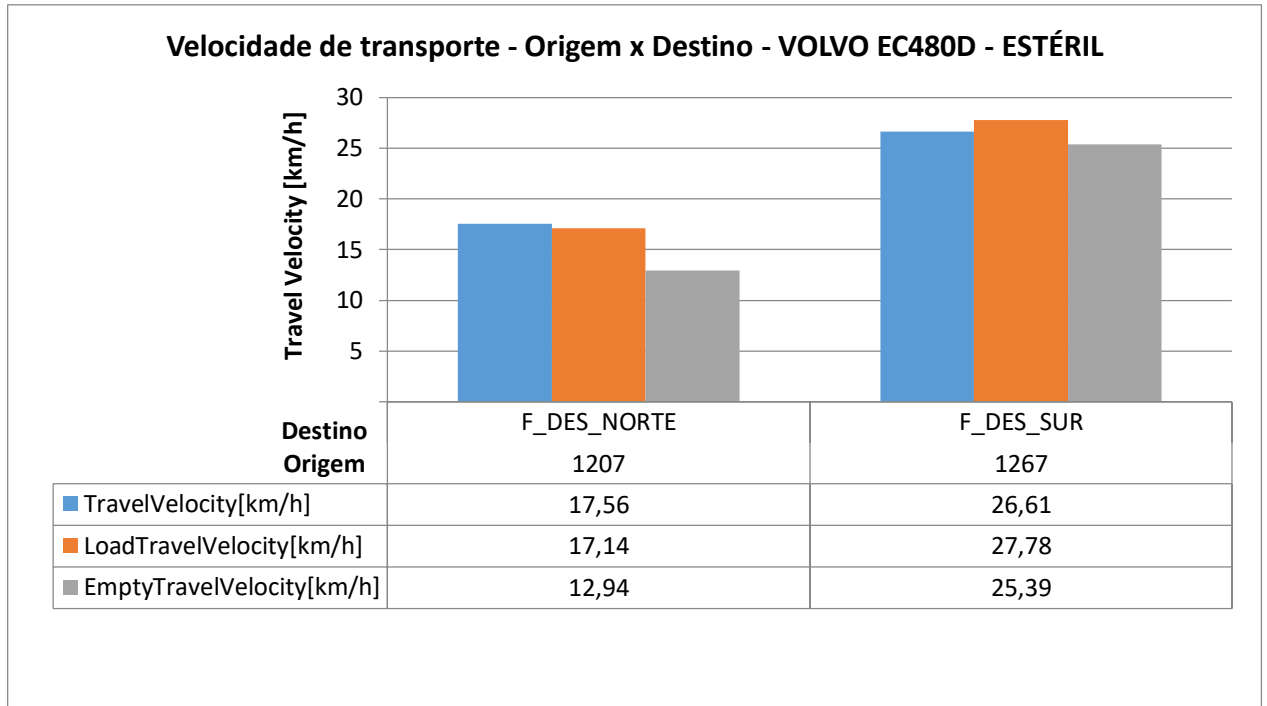
GRÁFICO TOTAL DE MASSA POR FRENTE VOLVO EC480D - ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO VI

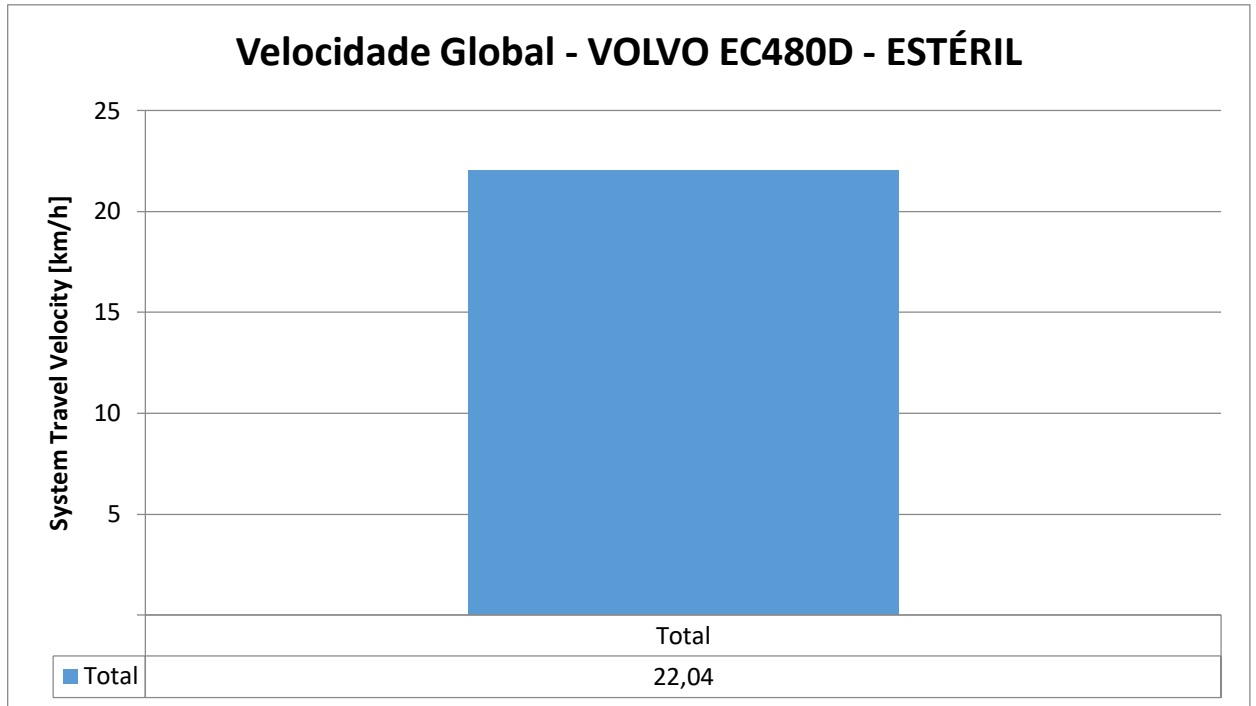
GRÁFICO VELOCIDADE DE TRANSPORTE VOLVO EC480D – ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

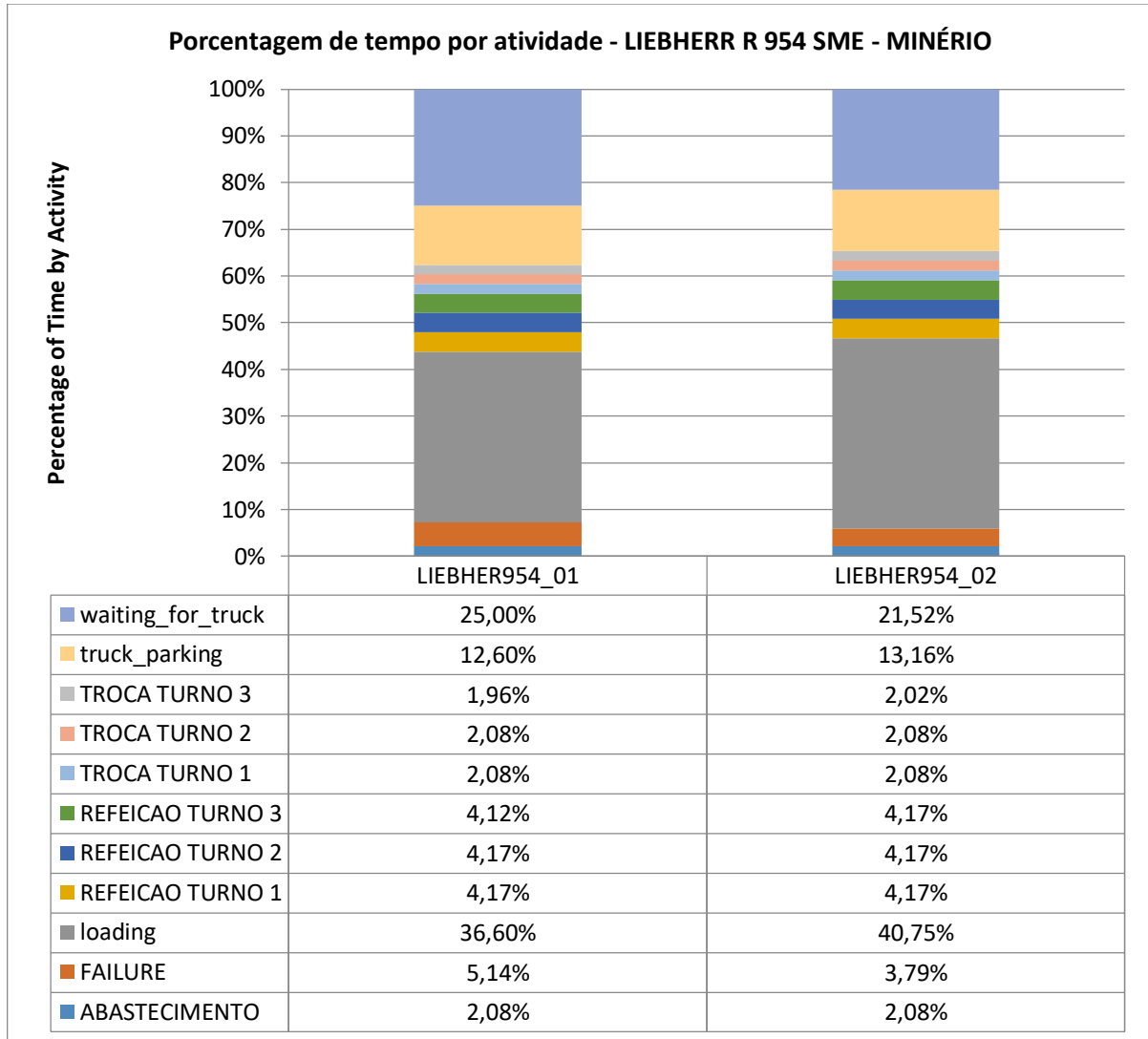
ANEXO VII

GRÁFICO VELOCIDADE GLOBAL VOLVO EC480 D – ESTÉRIL



Fonte: DSIM, 2019

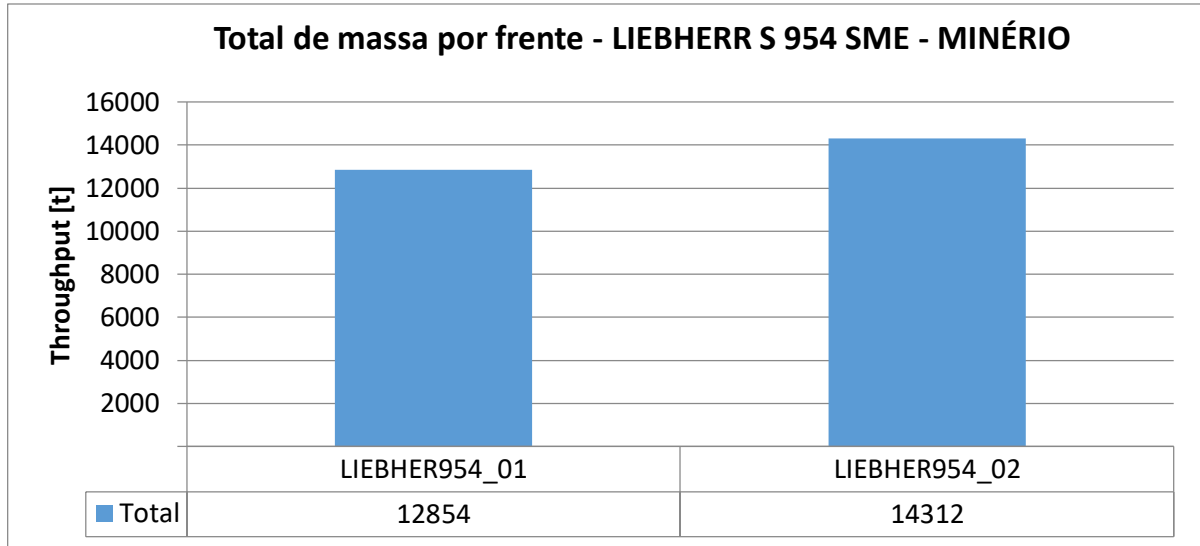
ANEXO VIII

GRÁFICOS PORCENTAGEM DE TEMPO POR ATIVIDADE LIEBHERR S954 SME -
MINÉRIO

Fonte: DSIM, 2019

ANEXO IX

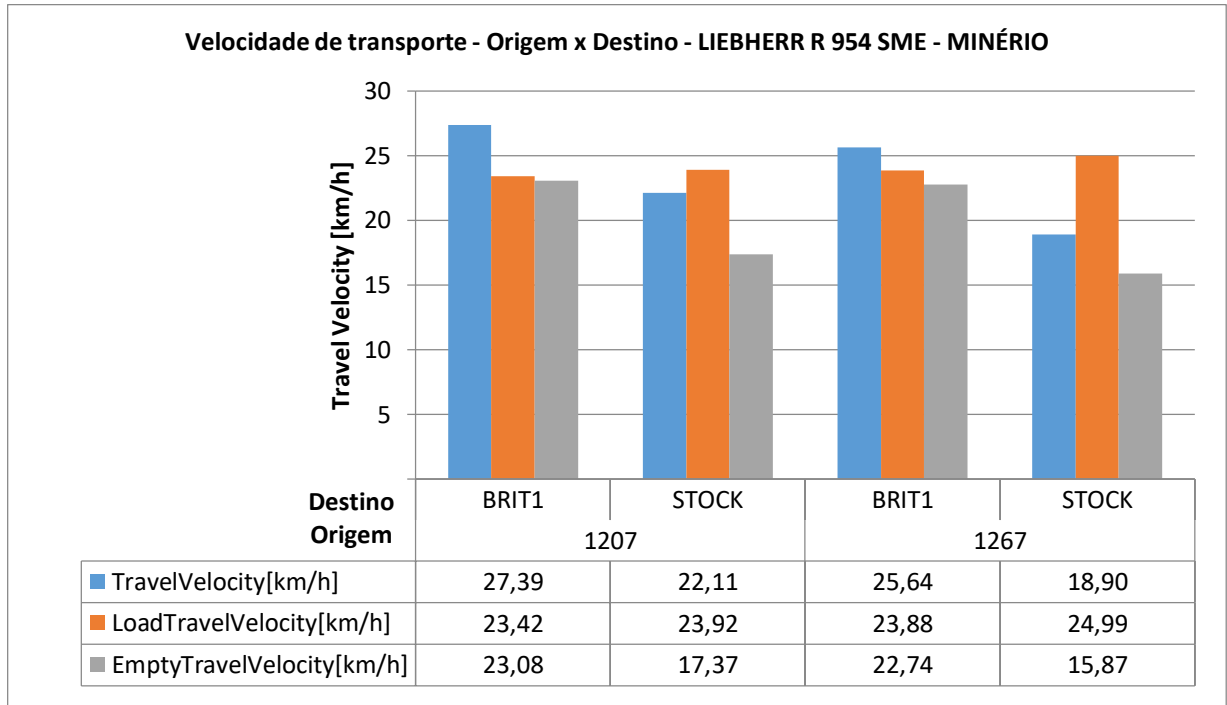
GRÁFICO TOTAL DE MASSA POR FRENTE LIEBHERR S 954 SME - MINÉRIO



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO X

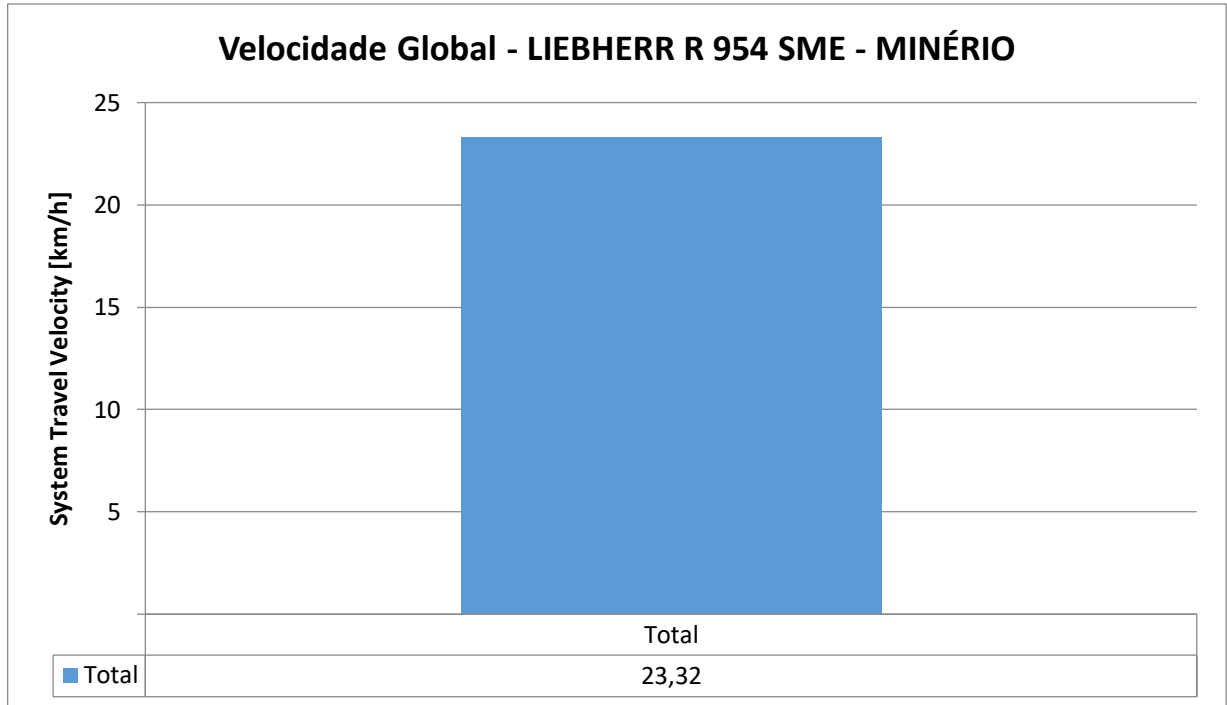
GRÁFICO VELOCIDADE DE TRANSPORTE – LIEBHERR R 954 SME – MINÉRIO



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XI

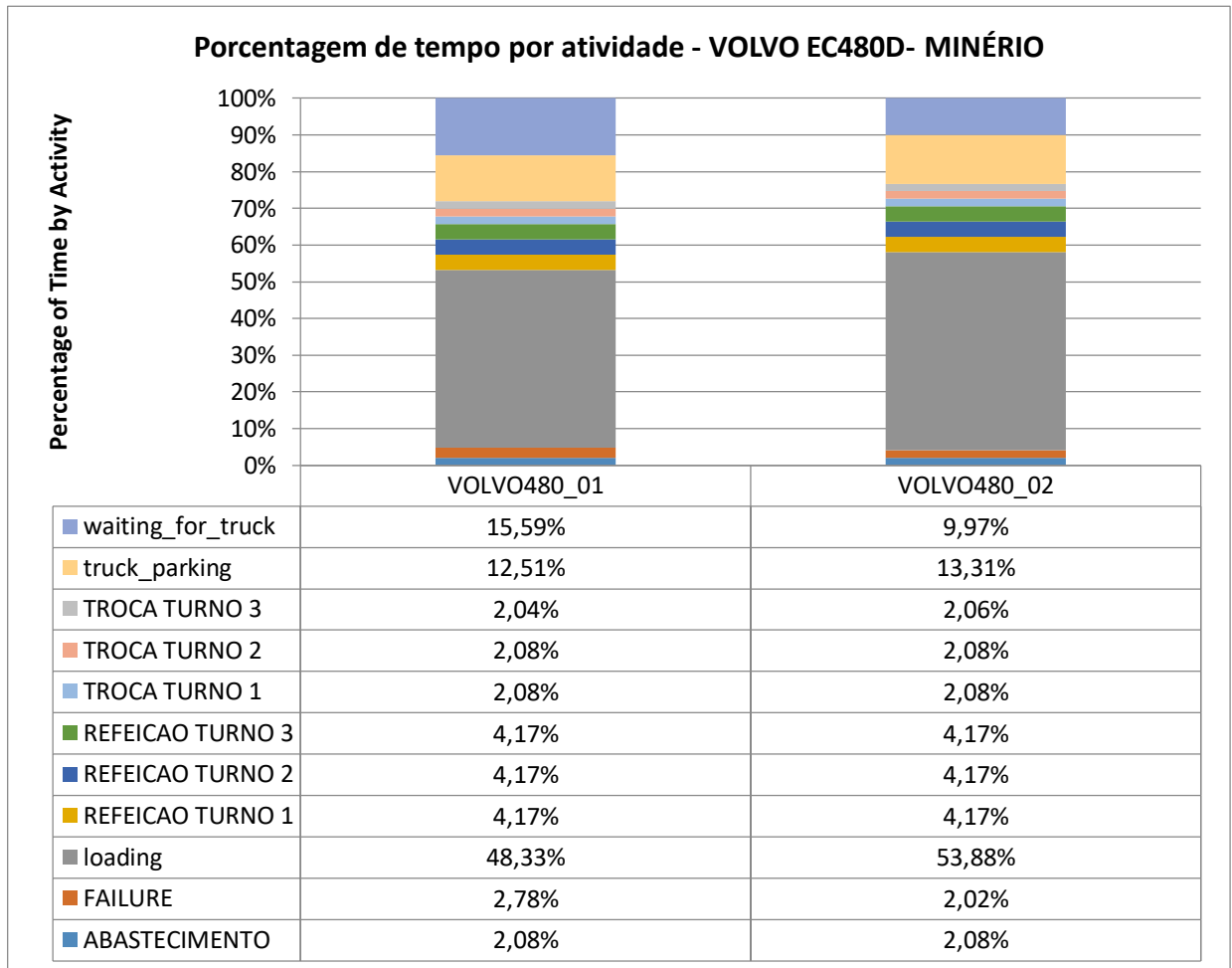
GRÁFICO VELOCIDADE GLOBAL LIEBHERR R 954 SME - MINÉRIO



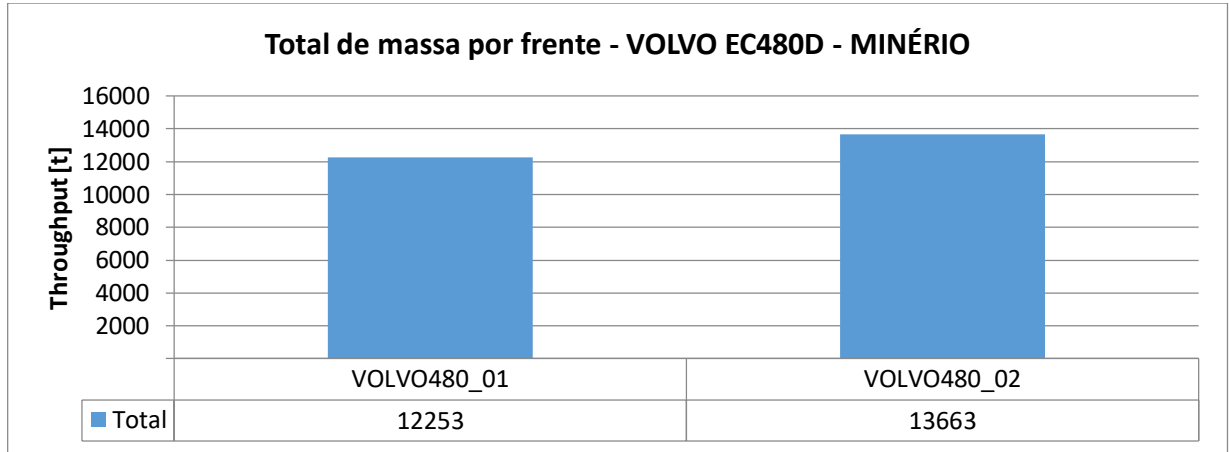
Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XII

GRÁFICO PORCENTAGEM DE TEMPO POR ATIVIDADE VOLVO EC480D -
MINÉRIO



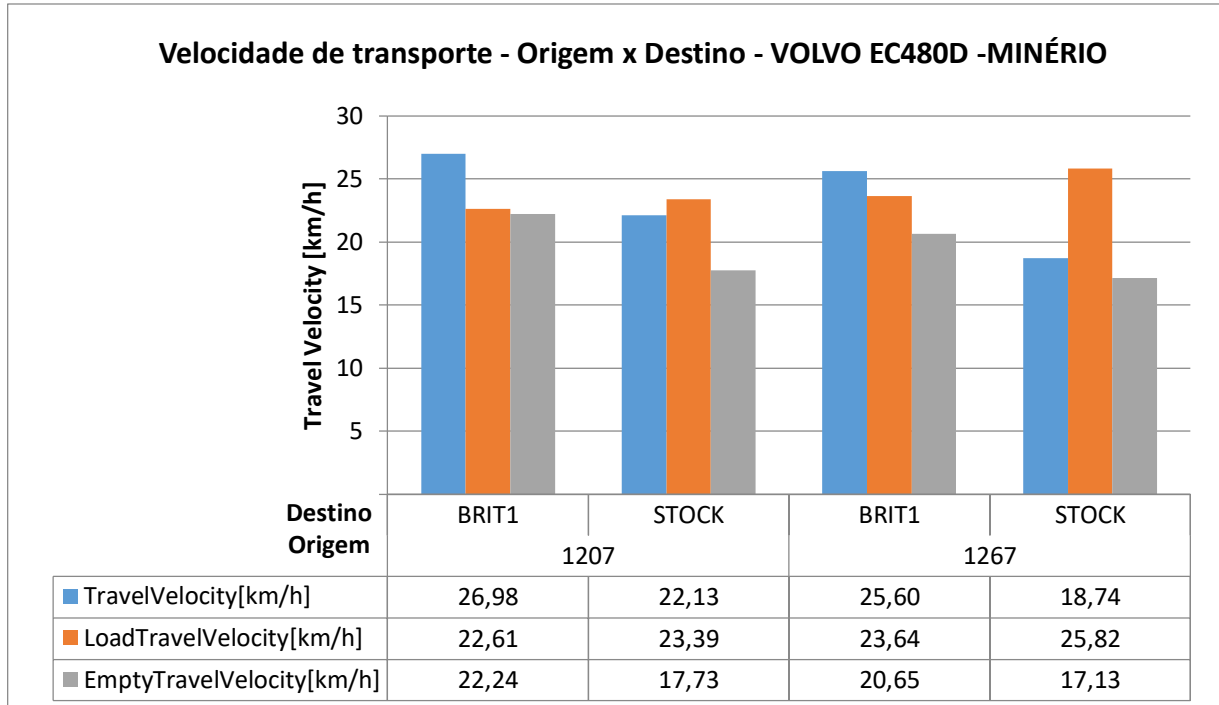
Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XIII**GRÁFICO TOTAL DE MASSA POR FRENTE VOLVO EC480D - MINÉRIO**

Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XIV

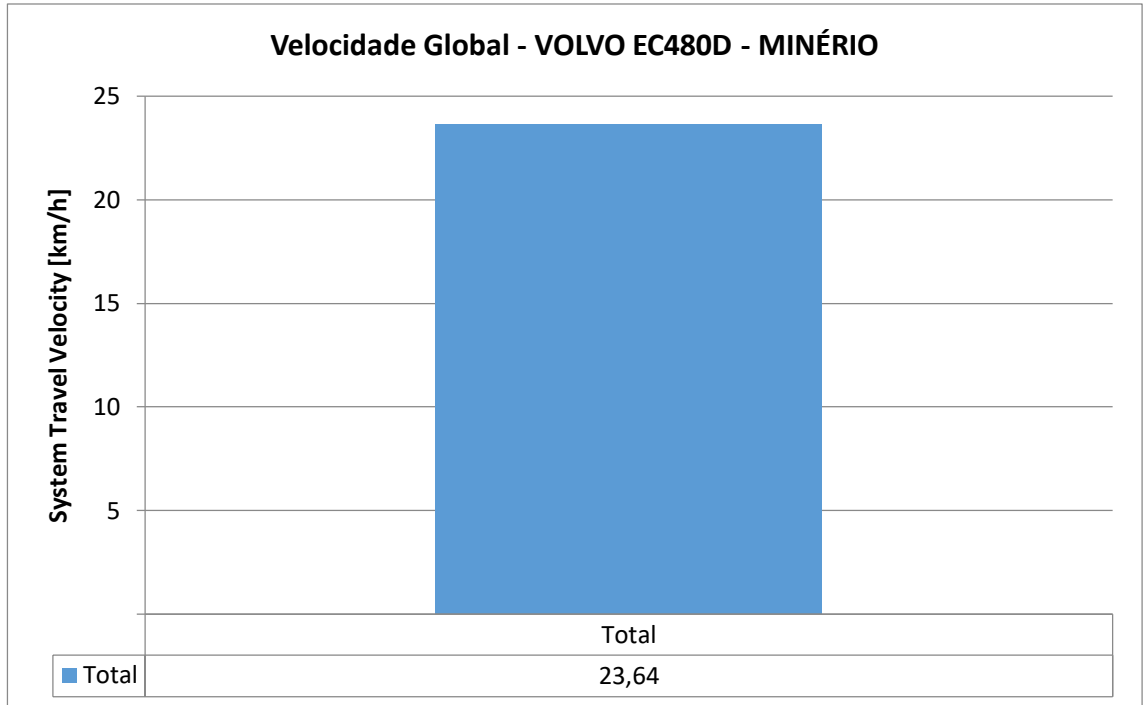
GRÁFICO VELOCIDADE DE TRANSPORTE VOLVO EC480D - MINÉRIO



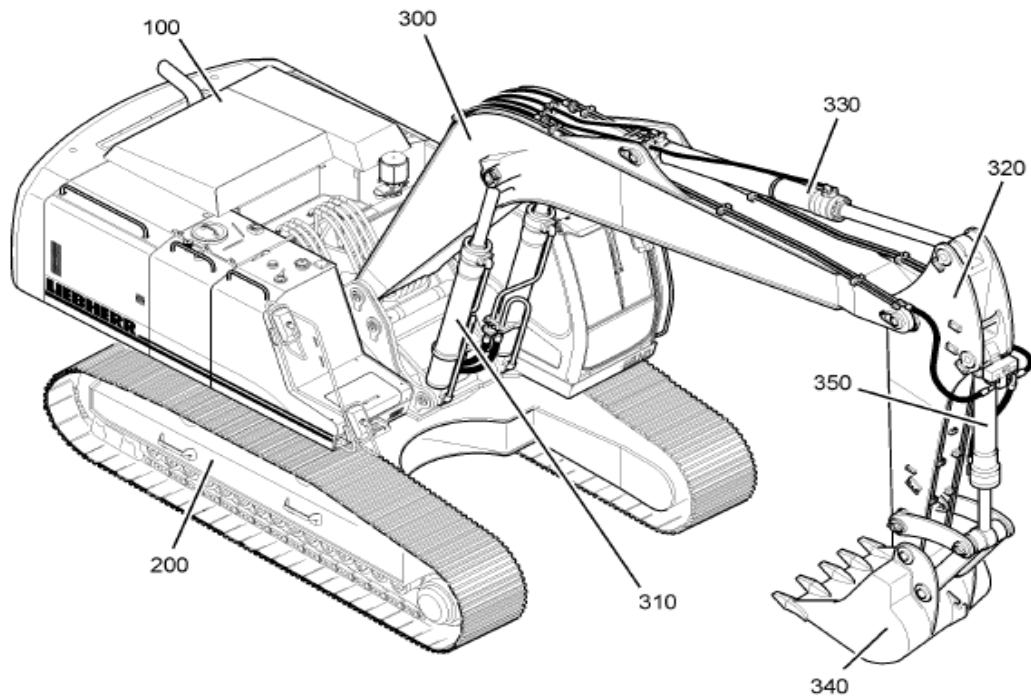
Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XV

GRÁFICO VELOCIDADE GLOBAL VOLVO EC480D - MINÉRIO



Fonte: DSIM, 2019

ANEXO XVI**IMAGEM PRINCIPAIS COMPONENTES DA ESCAVADEIRA R 954 C SME LIEBHERR**

Fonte: LIEBHERR, 2016

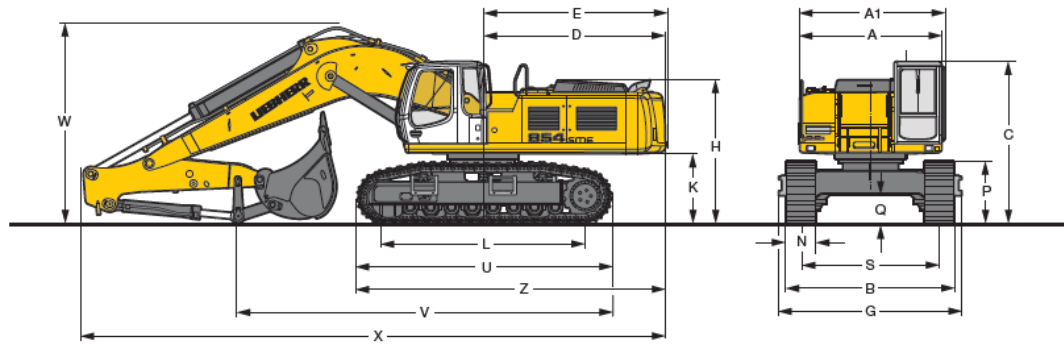
ANEXO XVII**IMAGEM**

100: Chassi superior	310: Cilindro de elevação	340: Caçamba de elevação
200: Chassi inferior	320: Haste	350: Cilindro da caçamba de elevação
300: Lança	330: Cilindro da haste	

Fonte: LIEBHERR, 2016

ANEXO XVIII

IMAGEM DIMENSÕES DO EQUIPAMENTO

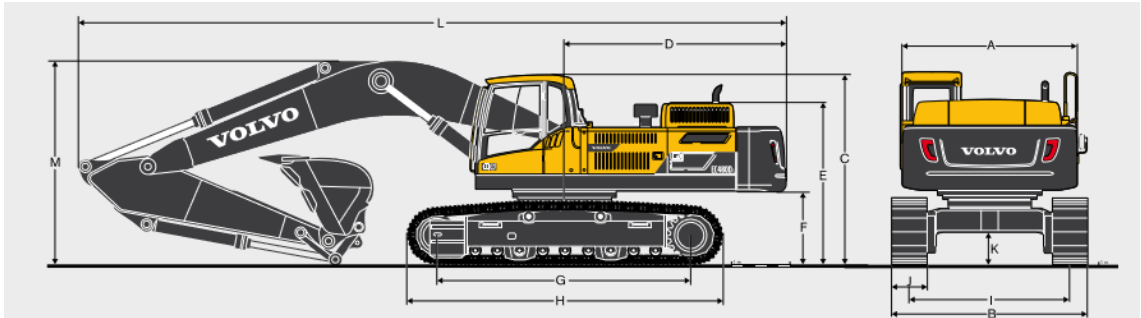


	mm		Braço m	Lança monobloco 6,70 m mm
A	2.980			
A1	3.060	V	2,35 SME	7.900
C	3.395		2,80 SME	6.100
D	3.850	W	2,35 SME	4.200
E	3.850		2,80 SME	4.200
H	3.010	X	2,35 SME	12.350
K	1.460		2,80 SME	12.350
L	4.280			
P	1.290			
Q	605			
S	2.900			
U	5.345			
Z	6.495			
N	600			
B	3.626			
G	3.820			

Fonte: LIEBHERR, 2015

ANEXO XIX

IMAGEM



Descrição	Unidade	EC380DL				EC480DL*			
		6.2	6.45	6.5	7.0	6.2	6.45	6.5	7.0
Laça	m	6.2	6.45	6.5	7.0	6.2	6.45	6.5	7.0
Braço	m	2.6	2.6	3.2	3.9	2.55	3.0	2.55	3.0
A. Largura total da estrutura superior	mm	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990
B. Largura total	mm	3 340	3 340	3 340	3 340	3 440	3 440	3 440	3 440
C. Altura total da cabine	mm	3 197	3 197	3 197	3 197	3 257	3 257	3 257	3 257
D. Raio de giro traseiro	mm	3 560	3 560	3 560	3 560	3 800	3 800	3 800	3 800
E. Altura total do capô do motor	mm	2 720	2 720	2 720	2 720	2 770	2 770	2 770	2 770
F. Espaço livre do contrapeso	mm	1 210	1 210	1 210	1 210	1 275	1 275	1 275	1 275
G. Comprimento da esteira em contato com o solo	mm	4 240	4 240	4 240	4 240	4 370	4 370	4 370	4 370
H. Comprimento da esteira	mm	5 180	5 180	5 180	5 180	5 370	5 370	5 370	5 370
I. Bitola da esteira	mm	2 740	2 740	2 740	2 740	2 740	2 740	2 740	2 740
J. Largura das sapatas	mm	600	600	600	600	700	700	700	700
K'. Altura livre mínima do solo	mm	500	500	500	500	550	550	550	550
L. Comprimento total	mm	11 080	11 330	11 240	11 290	11 630	11 590	12 130	12 100
M. Altura total da lança	mm	3 700	3 580	3 350	3 590	3 770	3 810	3 630	3 680

Descrição	Unidade	EC480DL**				EC380DLR	EC480DLR*	EC480DLR**
		6.5	7.0	8.5	9.0	6.5	7.0	8.5
Laça	m	6.5	7.0	8.5	9.0	6.5	7.0	8.5
Braço	m	2.55	3.0	2.55	3.0	3.35	3.9	4.8
A. Largura total da estrutura superior	mm	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990	2 990
B. Largura total	mm	3 590	3 590	3 590	3 590	3 590	3 590	3 590
Largura total (retraída)	mm	3 090	3 090	3 090	3 090	3 090	3 090	3 090
C. Altura total da cabine	mm	3 370	3 370	3 370	3 370	3 370	3 370	3 370
D. Raio de giro traseiro	mm	3 800	3 800	3 800	3 800	3 800	3 800	3 800
E. Altura total do capô do motor	mm	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880
F. Espaço livre do contrapeso	mm	1 385	1 385	1 385	1 385	1 385	1 385	1 385
G. Comprimento da esteira em contato com o solo	mm	4 370	4 370	4 370	4 370	4 370	4 370	4 370
H. Comprimento da esteira	mm	5 370	5 370	5 370	5 370	5 370	5 370	5 370
I. Bitola da esteira	mm	2 390	2 390	2 390	2 390	2 390	2 390	2 390
Bitola da esteira (estendida)	mm	2 890	2 890	2 890	2 890	2 890	2 890	2 890
J. Largura das sapatas	mm	700	700	700	700	700	700	700
K'. Altura livre mínima do solo	mm	746	746	746	746	746	746	746
L. Comprimento total	mm	11 630	11 590	12 130	12 100	12 140	12 140	12 010
M. Altura total da lança	mm	3 800	3 810	3 630	3 680	3 650	3 830	4 790

* Sem sapata com garras

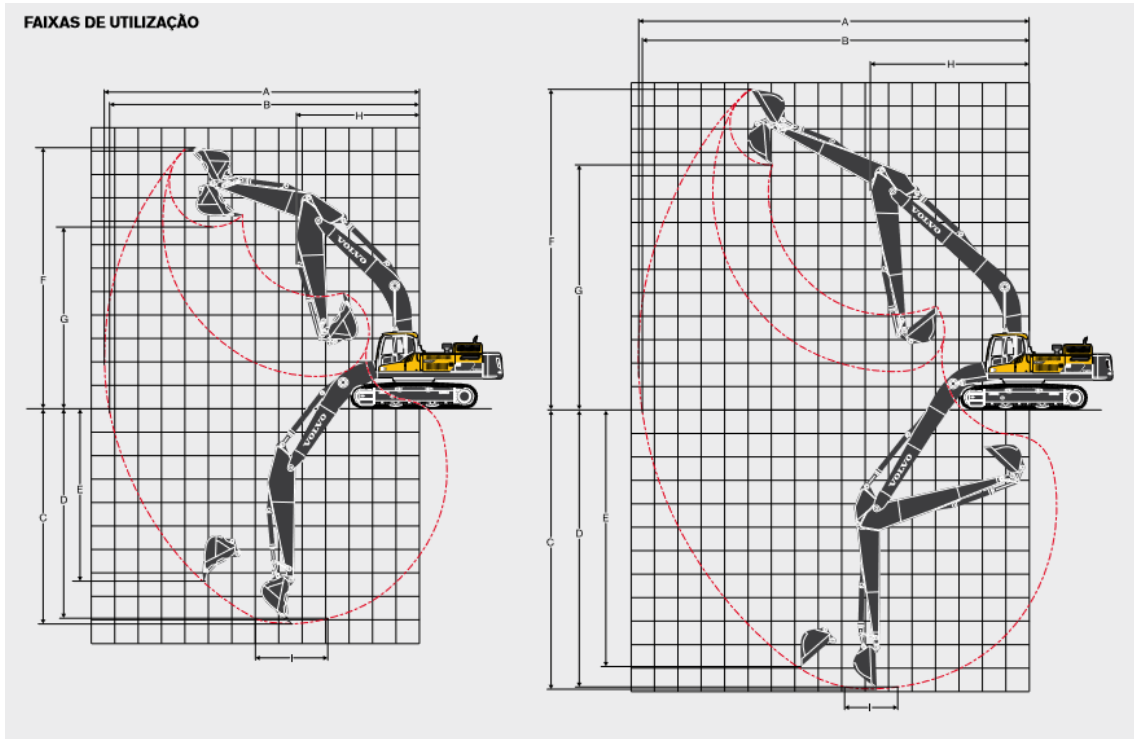
* CARRO INFERIOR FIXO

** CARRO INFERIOR RETRÁTIL

Fonte: Volvo, 2019

ANEXO XX

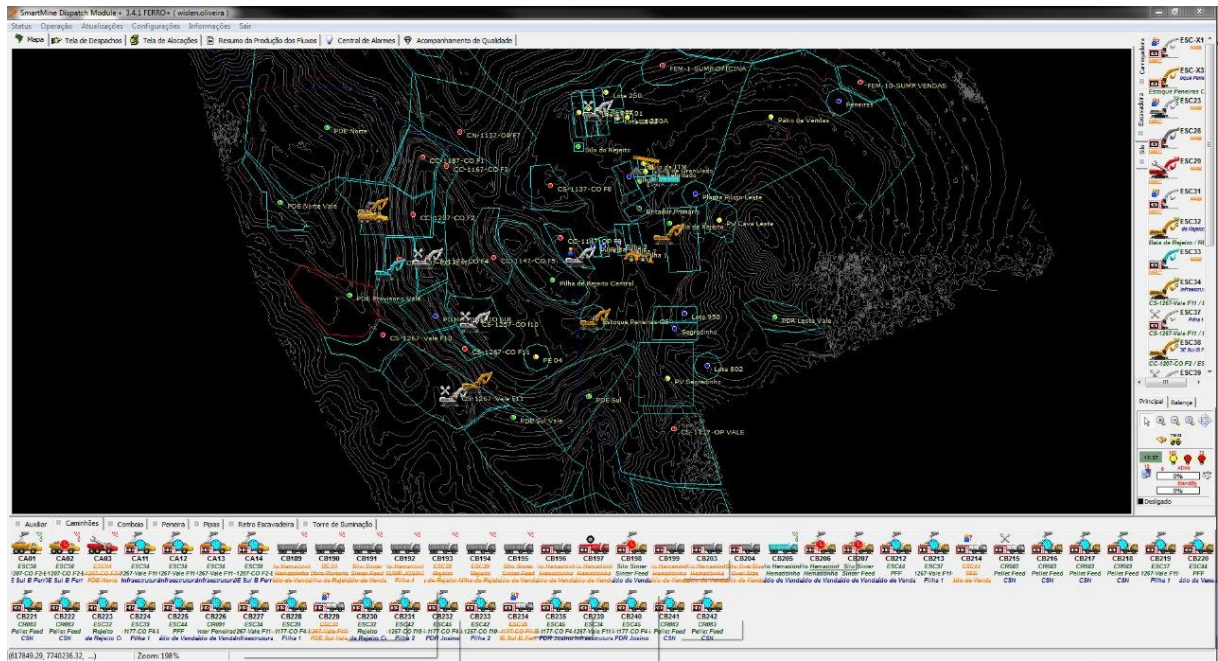
IMAGEM



Fonte: Volvo, 2019

ANEXO XXI

IMAGEM TELA SMART MINTE



Fonte: Acervo do autor

ANEXO XXII

TABELA DMTs

DMT (Km)	ESTÉRIL	MINÉRIO
1207	1,49	3,31
1267	2,73	2,62

Fonte: Adaptado de DSIM, 2019