CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CUSTOS DE DIMENSIONAMENTO DE FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO

TIAGO ALVES

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2022

TIAGO ALVES

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CUSTOS DE DIMENSIONAMENTO DE FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar
Coorientador: Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes

Linha de pesquisa: Geologia de Engenharia na Mineração.

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2022

ATA DA 8ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 20 (vinte) dias do mês de outubro do ano de 2022 (dois mil e vinte dois), às 18h00min (dezoito horas), na sala 702, localizada no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Araxá, através da Plataforma Microsof TEAMS, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando TIAGO ALVES, *sob a forma parcialmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pelo Prof. Dr. Henrique José Avelar (Presidente) – CEFET-MG, Prof. Dr. Michel Melo Oliveira (Membro Interno) – UFMG/CEFET-MG e Engº Me. Walter Schmidt Felsch Junior (Membro externo) – WF Mining.

Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando ***Tiago Alves***, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado "METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CUSTOS DE DIMENSIONAMENTO DE FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM UMA MINA A CÉU ABERTO", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Geologia de Engenharia na Mineração*. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi aprovado, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 20 de outubro de 2022

Prof. Dr. Henrique José Avelar
Presidente (CEFET-MG)

Prof. Dr. Michel Melo Oliveira
Membro interno (UFMG/CEFET-MG)

Engº Me. Walter Schmidt Felsch Junior
Membro externo (WF Mining)

Engº Tiago Alves
Discente

Alves, Tiago
A474m Metodologia de análise de custos de dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto / Tiago Alves. – 2022.
105 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar.
Coorientador: Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.
Bibliografia.

1. Minas e Mineração – Teses. 2. Minas e Mineração – Transporte – Teses. 3. Mineração a céu aberto – Teses. I. Avelar, Henrique José. II. Fontes, Marcélio Prado. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.063

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

RESUMO

A constante disponibilização de novas tecnologias e o avanço da indústria 4.0 vem transformando o cenário da mineração em todo o mundo. A cada ano são disponibilizadas novas ferramentas, o porte dos equipamentos é maximizado e técnicas para ganhos de produtividade são implantadas nas operações. Em uma operação de mina as atividades de carregamento e transporte são responsáveis por grande parte das despesas totais, demandando máxima eficácia. Neste contexto se torna cada vez mais importante o correto dimensionamento dos equipamentos de uma operação de mina, buscando a otimização do custo-benefício e maximizando o retorno financeiro. Este trabalho apresenta técnicas para análise de dimensionamento de equipamentos de carga e transporte em operações de mina a céu aberto com foco de curto a longo prazo. Ao longo do trabalho são correlacionadas análises técnicas e estatísticas de modo a facilitar a composição dos cenários operacionais. O trabalho demonstra como uma ferramenta que com essas técnicas pode trouxe um resultado mais robusto e consistente para a tomada de decisão com uma redução de gastos de 8% para as frotas de carregamento e transporte.

Palavras-chave: Mineração – Dimensionamento – Custos – Carregamento – Transporte – Produtividade.

ABSTRACT

The constant availability of new technologies and the advancement of industry 4.0 has been transforming the mining scenario around the world. Every year new tools are made available, the size of the equipment is maximized and techniques for productivity gains are implemented in the operations. In a mine operation, loading and transport activities are responsible for a large part of the total expenses, demanding maximum efficiency. In this context, the correct dimensioning of equipment in a mine operation becomes increasingly important, seeking cost-benefit optimization and maximizing financial return. This work presents techniques for analyzing the sizing of load and transport equipment in open pit mine operations with a short to long-term focus. Throughout the work, technical and statistical analyzes are correlated in order to facilitate the composition of operational scenarios. The work demonstrates how a tool that with these techniques can bring a more robust and consistent result for decision making with a cost reduction of 8% for the loading and transport fleets.

Keywords: Mining – Sizing – Costs – Loading – Transport – Productivity.

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo de Planejamento de mina e Produção 14

Figura 2 – Ilustração dos processo de operação de mina 18

Figura 3 - (a) Escavadeira Hidráulica (b) Escavadeiras a Cabo (c) Carregadeiras Frontais 20

Figura 4 - Principais Categorias de Equipamentos de Carregamento em Mineração 20

Figura 5 - Histórico de Aumento de Porte de Caminhões para a Mineração 22

Figura 6 - Resumo do Ciclo de Trabalho de um Caminhão 23

Figura 7 - Compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas frontais 28

Figura 8 - Curva de *Rimpull* Caterpillar 38

Figura 9 - Curva 10/10/20 Cartepillar 39

Figura 10 - Fórmula de Cálculo do TKPH 41

Figura 11. Estratificação das Horas Calendário 43

Figura 12 - Classificação de Custos Fixos e Variáveis 46

Figura 13 - Classificação de Custos Diretos e Indiretos..... 47

Figura 14 - Fluxo de custeio por absorção 48

Figura 15 - Esquema de Custeio Variável 49

Figura 16 - Modelo de Planilha Excel 61

Figura 17. Padronização para elaboração de estudo de dimensionamento de frotas..... 63

Figura 18 - Exemplo de Relatório de Apropriações 64

Figura 19 - Exemplo de Relatório de Ciclo Detalhado 64

Figura 20 - Exemplo de Relatório de Registro de Velocidades 65

Figura 21 - Tela de Visão Geral 67

Figura 22 - Tela de Cadastro das Minas 68

Figura 23 - Tela de Cadastro dos Regimes de Trabalho 68

Figura 24 - Tela de Cadastro dos dados do Plano de Produção 69

Figura 25 - Tela de Cadastro dos Dados das Frotas de Carregamento 70

Figura 26 - Tela de Cadastro dos dados das Frotas de Transporte 71

Figura 27 - Tela de Cadastro dos dados de Manutenção das Frotas 72

Figura 28 - Tela de Cadastro dos dados de Utilização Física da Frota 72

Figura 29 - Tela de Cadastro das Informações de Preço dos Itens 73

Figura 30 - Tela de Seleção dos dados para Dimensionamento 74

Figura 31 - Tela de Dimensionamento 74

Figura 32 - Tela de Cadastro da Frota Atual 75

Figura 33 - Seleção das Frotas para Dimensionamento 75

Figura 34 - Comandos do Dimensionamento 76

Figura 35 - Exemplo de Dimensionamento Preenchido 77

Figura 36 - Comandos para Ajuste do Dimensionamento 77

Figura 37 - Dimensionamento de Frente Concluído 78

Figura 38 - Complemento de *Match* de Equipamentos para uma Frente 79

Figura 39 - Tela Preenchida para Criação de novo Período para o Dimensionamento 80

Figura 40. Comparativo de Desembolso Total por Cenário 85

Figura 41. Fluxo de Caixa e VPL por cenário 85

Figura 42 - Exemplo de Tela para Inserção de dados de Variação de Cenários 86

Figura 43. Teste de Normalidade e Histograma de Utilização Física 87

Figura 44. Teste de Normalidade e Histograma de Disponibilidade Física 87

Figura 45. Teste de Normalidade e Histograma de Horas Trabalhadas Não Produtivas 88

Figura 46. Teste de Normalidade e Histograma de Horas Trabalhadas em Atraso Operacional 88

Figura 47. Teste de Normalidade e Histograma de Carga 88

Figura 48. Teste de Normalidade e Histograma de Velocidade 89

Figura 49. Teste de Normalidade e Histograma de Distância de Transporte 89

Figura 50. Teste de Normalidade e Histograma de Tempos Fixos (exceto Tempo de Carregamento) 89

Figura 51. Teste de Normalidade e Histograma de Tempo de Carregamento 90

Figura 52 - Resumo Gráfico e Descritivo das Estatísticas Básicas dos Cenários 90

Figura 53 - Gráficos Histograma e Bloxpot dos Cenários 91

Figura 54 - Gráficos de Valores Individuais e de Intervalos de Custo dos Cenários 91

Figura 55 - Resultado do Teste T para 2 amostras de comparativo dos Cenários 92

Figura 56 - Resumo da Análise de Regressão Linear Múltipla do Cenário 01 93

Figura 57 - Resumo da Análise de Regressão Linear Múltipla do Cenário 02 93

Figura 58. Modelo de estratificação de OEE para a frota de Transporte 94

Figura 59. Modelo de estratificação de OEE para a frota de Carregamento 95

Figura 60. Acompanhamento de Utilização Física de frota 95

Figura 61. Acompanhamento de Disponibilidade Física de Frota 95

Figura 62. Acompanhamento de Horas Trabalhadas não Efetivas de Frota 96

Figura 63. Acompanhamento de Velocidade Média de Frota de Transporte 96

Figura 64. Acompanhamento de Distância de Transporte de Frota 96

Figura 65. Acompanhamento de Tempo de Carregamento de Frotas 97

Figura 66. Acompanhamento de Carga de Equipamentos de Transporte 97

Figura 67. Mapa de Velocidade das Vias da Mina.....97

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Tipos de Solo x Modelos de Equipamentos 25

Tabela II. Tempo de Referência para o Ciclo de Escavaderias 32

Tabela III. Fator de Ajuste para o Tempo de Ciclo 33

Tabela IV - Fluxo de caixa de um projeto de mineração 51

Tabela V. Exemplo de Tabela de Análise de Sensibilidade de Custo Unitário 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AO - Acurácia do operador

CAPEX - *Capital Expenditure*

CMT - Capacidade mássica do equipamento de transporte

CVT - Capacidade volumétrica do equipamento de transporte

DF - Disponibilidade física

DM - Densidade do material

DMT - Distância Média de Transporte

DTC - Distância de transporte cheio

DTV - Distância de transporte vazio

EMP - Empolamento do material

ENC - Percentual de enchimento da concha

EO - Eficiência operacional

FC- Fluxo de Caixa

FCt - Fluxo de caixa no ano t

FFM - Fator *Fleet Match*

HC - Horas calendário

HM - Horas de manutenção

HMC - Horas de manutenção corretiva

HMP - Horas de manutenção preventiva

HO - Horas ociosas

HOI - Horas ociosas internas

HOE - Horas ociosas externas

HT - Horas trabalhadas

HTAO - Horas trabalhadas em atraso operacional

HTEF - Horas trabalhadas efetivas

HTNP - Horas trabalhadas não produtivas

I0 - Investimento Inicial

IVA - Índice de Valor Atual

MMC - Massa de material escavado e carregado por ciclo

MOV - Movimentação a ser realizada

OPEX - *OperatingExpenditure*

PEC - Produtividade efetiva dos equipamentos de carga

PGC - Produtividade global de carregamento

PGT - Produtividade global de transporte

QCC - Quantidade de ciclos para o carregamento

QEC - Quantidade de equipamentos de carregamento

QET - Quantidade de equipamentos de transporte

RO - Rendimento operacional

TB - Tempo de basculamento

TCC - Tempo de ciclo de equipamento de carga

TCE - Tempo de carregamento efetivo

TCO - Total Cost of Ownership

TCT - Tempo de ciclo de transporte

TDC - Tempo de descarga da concha

TEC - Tempo de enchimento da concha

TFC - Tempo de fila na carga

TFD - Tempo de fila na descarga

TFT - Tempos fixos de transporte

TIR - Taxa Interna de Retorno

TKPH - Tonelada quilômetro por hora

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

TMC - Tempos de manobras na carga

TMD - Tempos de manobras na descarga

TMPH - Tonelada milha por hora

TRC - Tempo de rotação com concha carregada

TRD - Tempo de rotação com concha descarregada

TTC - Tempo de transporte carregado

TTT - Tempo de troca do equipamento de transporte

TTV - Tempo de transporte vazio

TVT - Tempo variável de transporte

UEP - Unidade de esforço de produção

UF - Utilização física

VBA - *Visual Basic for Applications*

VAL - Valor Atual Líquido

VC - Volume da concha

VMC - Volume de material escavado e carregado por ciclo

VPL - Valor presente líquido

VTC - Velocidade de transporte cheio

VTV - Velocidade de transporte vazio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Considerações Iniciais 14

1.2 Justificativa 15

1.3 Objetivos 16

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17

2.1 Métodos de Lavra 17

2.2 Processos em uma mina a céu aberto 18

2.2.1 Perfuração e Desmonte 18

2.2.2 Carregamento 19

2.2.3 Transporte 21

2.3 Dimensionamento de Frotas 24

2.3.1 Premissas Operacionais 24

2.3.2 Seleção de par de equipamentos para operação 27

2.3.2.1 Fator "Fleet Match" 29

2.3.3 Dimensionamento dos Equipamentos 30

2.3.3.1 Produtividade horária – Abordagem Geral 30

2.3.3.2 Produtividade horária do Carregamento 32

2.3.3.2.1 Tempo de ciclo do equipamento de Carregamento 32

2.3.3.2.2 Quantidade de Material por Ciclo 33

2.3.3.2.3 Quantidade de Ciclos Necessários 33

2.3.3.2.4 Tempo de Carregamento 34

2.3.3.2.5 Produtividade Horária Efetiva de Carregamento 34

2.3.3.2.6 Produtividade Horária Global de Carregamento 35

2.3.3.3 Produtividade Horária do Transporte 35

2.3.3.3.1 Tempos do Ciclo de Transporte 35

2.3.3.3.2 Carga Transportada 39

2.3.3.3.3 Produtividade Horária Efetiva de Transporte 40

2.3.3.3.4 Produtividade Horária Global de Transporte *40*
2.3.3.4 TKPH – Tonne-Kilometres Per Hour *41*
2.3.3.5 Horas Trabalhadas *41*
2.3.3.6 Quantidade de Equipamentos *44*
2.4 Conceitos de custos **45**
2.4.1 Métodos de Custeio 47
2.4.1.1 Custeio por Absorção *48*
2.4.1.2 Custeio Variável *48*
2.4.1.3 Método da Unidade de Esforço de Produção (UEP) *49*
2.5 Avaliação Econômica **49**
2.5.1 Fluxo de Caixa 50
2.5.2 Indicadores de Rentabilidade 51
2.5.2.1 Valor Presente Líquido (VPL) *51*
2.5.2.2 Índice de Valor Atual (IVA) *52*
2.5.2.3 Taxa Interna de Retorno (TIR) *53*
2.5.3 Análise de Sensibilidade 53
2.5.4 Análise de Riscos 54
2.5.4.1 Análise de Cenários *55*
2.5.4.2 Árvores de Decisão *55*
2.5.4.3 Simulação de Monte Carlo *55*
2.5.5 Composição de Custos e Comparação de Cenários 56
3 METODOLOGIA DE PESQUISA **59**
3.1 Natureza e classificação da pesquisa **59**
3.2 Procedimentos metodológicos **59**
3.2.1 Análise do cenário inicial 59
3.2.2 Definição da plataforma 61
3.2.2.1 Segurança dos dados *62*
3.2.3 Definição dos Requisitos 62
3.2.3.1 Definição de fluxo padrão para elaboração dos estudos de dimensionamento *62*

3.2.3.2 Dados de entrada necessários para a elaboração dos estudos.....63
3.2.3.2 Indicadores de saída para a rotina operacional.....65
3.2.3.3 Indicadores de saída para análise de cenários.....66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....67
4.1 Ferramenta para dimensionamento.....67
4.1.1 Dados de entrada.....67
4.1.2 Dimensionamento.....73
4.2 Consolidação dos dados.....81
4.3 Análise de sensibilidade.....83
4.4 Análise de VPL.....84
4.5 Ferramenta para simulação de Cenários.....86
4.6 Análise Comparativa de Cenários.....90
4.7 Preparação e acompanhamento dos dados de entrada.....93
4.8 Apuração de Ganhos.....98
4.9 Ganhos Adicionais.....99
5 CONCLUSÕES.....100
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....101
REFERÊNCIAS.....102

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

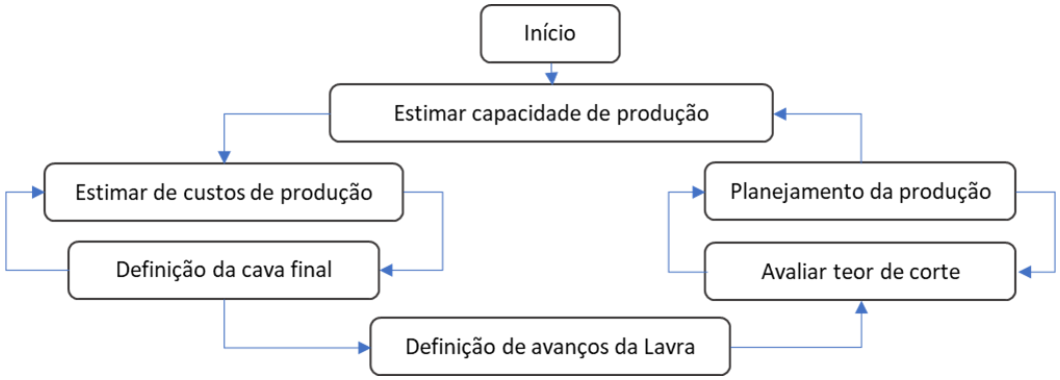
Segundo Thumse Mareth (2020), a previsibilidade, controle e redução dos custos de produção sempre foi um dos grandes objetivos da realização de estudos e planejamentos de produção, uma vez que a razão da existência das empresas é a geração de riqueza.

No ramo da mineração, segundo Borges (2013), os investimentos ultrapassam facilmente as cifras de centenas de milhões de dólares. Ainda segundo o mesmo autor, a otimização dos gastos e investimentos é extremamente importante para se garantir a viabilidade do negócio com o devido retorno dos valores aplicados.

Devem ser utilizadas metodologias consistentes para o dimensionamento das frotas, alinhadas a premissas sólidas de controle da rotina. Isso possibilitará a correlação entre as premissas utilizadas no planejamento e os custos incorridos na operacionalização da mina. Assim haverá maior garantia de que os retornos com os desembolsos serão realizados (DIDDENS, 2019).

Diddens (2019) cita que o processo do planejamento e execução dos custos deve ser constantemente avaliado e monitorado na rotina frente às demandas do processo produtivo. Planos de produção da mina, previsões de capacidades, custos, e programação de produção, podem sofrer alterações ao longo do seu processo de execução e ocasionarem impacto entre si conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de Planejamento de mina e Produção



Fonte: Adaptado de DIDDENS (2019)

De acordo com Cesário Neto (2019) a quarta revolução industrial, também chamada de indústria 4.0, visa implementar e potencializar a colaboração entre seres humanos e máquinas. Essa colaboração auxilia nos processos de planejamento de custos de produção, bem como na cadeia produtiva como um todo. A inteligência artificial, computação cognitiva e outras inovações tecnológicas, são o caminho natural para a maximização da competitividade e produtividade de diversos setores das indústrias. Tais inovações interligam equipamentos, pessoas e processos, imprimindo maior velocidade de reação e planejamento frente às necessidades.

A quarta revolução industrial depende de várias tecnologias conectadas, que irão resolver pequenos problemas de forma rápida e confiável, gerando um impacto mais profundo e exponencial à medida que se desenvolve (NAHAS, 2014).

1.2Justificativa

Conforme podemos observar em Colpo *et al.* (2013), quanto mais robusto for o planejamento das atividades da empresa, maior a confiabilidade do direcionador de custos, desde que as premissas sejam consistentes e tecnicamente embasadas. Controles consistentes auxiliam na análise e direcionamento do resultado das operações, além de possibilitarem um comparativo entre executado e planejado com o objetivo de implantar ações de mitigação dos desvios.

Dos custos envolvidos em uma operação de mina convencional a céu aberto, conforme descrito em Borges (2013), cerca de 60% dos valores estão diretamente relacionados aos processos de carregamento e transporte, sendo este o foco deste trabalho.

O dimensionamento das frotas de equipamentos de carregamento e transporte deve levar em consideração aspectos econômicos, de segurança, ambientais, e operacionais, buscando o melhor resultado em produtividade. Esses fatores influenciarão na lucratividade ou até mesmo na viabilidade de uma operação (BERNARDI, 2015).

Segundo Coutinho (2017), um bom dimensionamento de frota deve buscar o menor custo possível considerando várias opções tecnicamente viáveis com base nos planos de produção.

Atualmente existem no mercado várias ferramentas, estudos e técnicas que auxiliam na composição de estudos e análises para auxiliar na tomada de decisão de cenários de dimensionamento de frotas. Por exemplo, o modelo de simulação computacional proposto por Bozorgebrahimi, Hall & Blackwell (2003), os sistemas baseados em conjuntos nebulosos (lógica *fuzzy*) e AHP (*analytical hierarchy process*) propostos por Bascetin *et al*. (2006), ferramentas de mercado como Datamine e Deswik, entre muitos outros. Muitas destas ferramentas normalmente não estão acessíveis a toda corporação, seja por terem aplicações específicas direcionadas a outros processos, por possuírem altos custos de licenças, ou por questões de usabilidade.

A justificativa deste trabalho se dá pela necessidade de uma ferramenta que possibilite a composição de cenários para dimensionamento e análise comparativa, reunindo as técnicas e metodologias necessárias para embasar um correto planejamento para tomada de decisão. Este desenvolvimento provê uma ferramenta acessível, intuitiva, tecnicamente embasada, com rotinas automatizadas, que reúne as funcionalidades necessárias antes distribuídas em outras plataformas distintas. Isso trará maior agilidade e confiabilidade nos resultados entregues pelas análises.

1.3 Objetivos

Demonstrar o impacto do dimensionamento das frotas de equipamentos de carga e transporte na análise de cenário global para tomada de decisões operacionais e financeiras em uma mina a céu aberto.

- Desenvolver ferramenta informatizada para a elaboração do dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em minas a céu a aberto;
- Empregar um modelo de estimativa de custos de cenários de dimensionamentos de frotas atrelado à ferramenta computacional do projeto;
- Disponibilizar uma ferramenta acessível para simulação de cenários do dimensionamento de frotas para auxílio no processo de comparação e avaliação de melhores estratégias para tomada de decisão;
- Demonstrar, em um cenário de análise prático, os conceitos observados neste projeto, apresentando as variações dos custos totais e unitários em função das variáveis levantadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção irá apresentar a base teórica da pesquisa, que irá fundamentar o projeto. Serão apresentadas informações sobre métodos de lavra, processos de operação de mina, dimensionamento de frotas de carregamento e transporte, composição de custos e análise de cenários.

2.1 Métodos de Lavra

Burt e Caccetta (2018) afirmam que, para um empreendimento de mineração, um importante elemento a ser analisado criteriosamente é a seleção do método de lavra, uma vez que isso poderá implicar no seu sucesso ou fracasso.

Curi (2017) define lavra como o processo de se extrair e transportar minérios ou minerais industriais de seu ambiente natural até o ponto de seu tratamento ou uso. O mesmo autor cita que o método de lavra é a forma de como isso será feito.

Segundo Newman *et al*. (2010), o método de lavra contempla o conjunto dos trabalhos de planejamento, dimensionamento e execução. É fundamental que exista harmonia entre esses processos, constituindo a técnica de extração do minério, seja em superfície ou em profundidade.

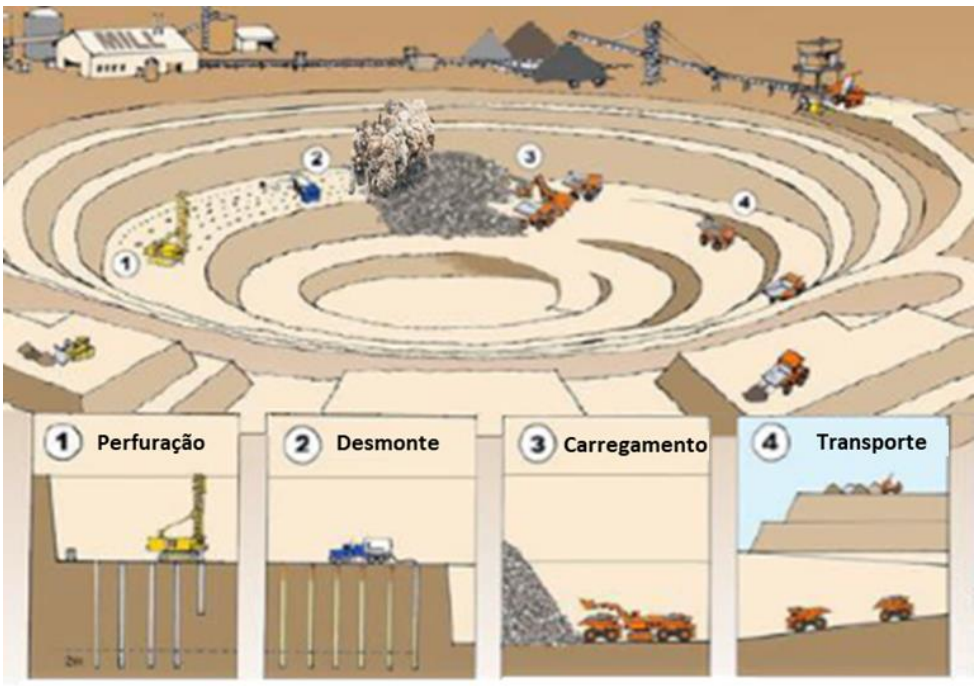
Curi (2014) afirma que a técnica de extração remete aos aspectos técnicos da seleção do método, da seleção e dimensionamento dos equipamentos necessários, e do planejamento das aberturas e sequência da lavra. Ainda segundo Curi (2014), a seleção do método se dá com a avaliação das condições geológicas, sociais e ambientais, que eliminará as opções que não estejam de acordo com os critérios desejados. O resultado será a seleção de menor custo estimado, e maior retorno do investimento, observando condições técnicas que garantam uma maior segurança.

Muitas minas trabalham com mais de um método de lavra na sua operação, pois uma forma pode ser mais apropriada a algumas áreas do depósito e em outras partes seu emprego pode não ser a melhor opção. Além disso, mais de um método pode ser utilizado ao longo da vida útil de uma mina (JESUS, 2013).

2.2 Processos em uma mina a céu aberto

Conforme observado em Costa (2005), as operações de mina são processos com muitas variáveis e complexidades. Essas operações se dividem em perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Há ainda atividades de infraestrutura e apoio para suportar estes processos. A Figura 2 ilustra algumas das atividades em uma mina a céu aberto.

Figura 2–Ilustração dos processo de operação de mina



Fonte: Adaptado de COSTA (2005)

2.2.1 Perfuração e Desmonte

Em minas a céu aberto, nos casos em que não é possível o desmonte mecânico com as próprias máquinas de escavação, as atividades se iniciam com a preparação da área a ser lavrada para que ela possa ser perfurada e detonada (JESUS,2013).

O Desmonte de rochas é composto pelo conjunto de atividades planejadas com o objetivo de fragmentar e desagregar o bem mineral de interesse. Isso se faz necessário para adequar o material conforme as exigências para se obter eficiência nas etapas posteriores (BOTELHO, 2014).

Em muitas operações de mineração é necessário o desmonte de rochas por meio de explosivos, contribuindo para a economia e para a produtividade. Esses ganhos se dão pela otimização de parâmetros variáveis do plano de fogo, como afastamento, espaçamento, tipo de explosivo, carga máxima por espera etc. Existem ainda outras considerações que não são diretamente relacionadas à produção, como proximidade com comunidades, e que devem ser consideradas. Tais considerações podem gerar problemas ambientais e de segurança nas operações durante o desmonte com explosivo (QUAGLIO, 2020).

Os processos de perfuração e desmonte têm por objetivo a fragmentação de blocos maciços de rochas para produzir blocos de rochas menores. Essa fragmentação visa atender a granulometria especificada para a otimização do transporte e beneficiamento do minério com menor custo e maior produtividade (MORAIS, 2004).

A fragmentação resultante das detonações possui uma influência direta no desempenho dos equipamentos de lavra, britagem e moagem. A detonação deve prover um material com a homogeneidade granulométrica esperada, que irá maximizar a produtividade da frota de carregamento e transporte com ganhos em tempo de carregamento e redução da variabilidade de carga transportada (TEIXEIRA, 2013).

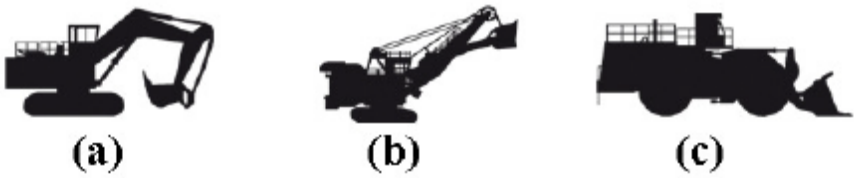
2.2.2 Carregamento

Campelo *et al.* (2018) definem o processo de carregamento como a colocação do material previamente desagregado no equipamento de transporte. O mesmo autor cita que o carregamento deve ser realizado pela traseira ou pela lateral do equipamento de transporte, de modo a obter maior produtividade e segurança.

No processo de seleção de equipamentos de carregamento devemos observar a compatibilidade de porte com o equipamento de transporte, de modo a não inserirmos perdas de eficiência em nenhuma das frotas (RACIA, 2017).

A Figura 3 ilustra os tipos de equipamentos de carga utilizados em uma mina a céu aberto, que podem variar entre escavadeiras a cabo, escavadeiras hidráulicas, e carregadeiras frontais, que também podem ser chamadas carregadeiras de rodas ou pás mecânicas (BURT e CACCETTA, 2018).

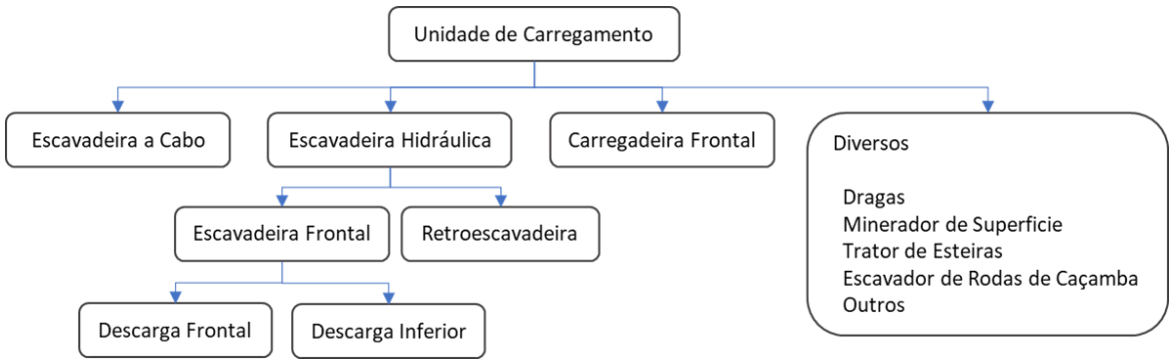
Figura 3 - (a) Escavadeira Hidráulica (b) Escavadeiras a Cabo (c) Carregadeiras Frontais



Fonte: Adaptado de Burt e Caccetta (2018).

No passado, o termo "*shovel*" era usado como um título genérico para todas as unidades de carregamento. Isso é herança dos tempos em que as escavadeiras a cabo dominavam as minas a céu aberto. Isso não é mais verdade, e as escavadeiras hidráulicas conquistaram uma grande fatia do mercado, com caçambas de mais de 40 m^3 agora disponíveis. Carregadeiras frontais maiores, com tamanhos de caçamba de até 40 m^3, também estão disponíveis. A Figura 4 categoriza as principais unidades de carga (AUSIMM, 2012).

Figura 4 - Principais Categorias de Equipamentos de Carregamento em Mineração



Fonte: Adaptado de AusIMM (2012)

AusIMM (2012) cita ainda que outros fatores são fundamentais na análise de equipamentos de carregamento tais como tamanho e fator de enchimento da caçamba, pressão no solo, peso operacional, potência, alcance e altura de carregamento.

Não é possível realizar a seleção dos equipamentos de carregamento ideais para a operação sem considerar os equipamentos de transporte que irão operar em conjunto, porém alguns fatores interferem diretamente no tipo de equipamento de carga. Jesus (2013) elenca alguns destes fatores conforme a seguir:

- Disponibilidade de energia ou combustível para fornecer a equipamentos elétricos ou a combustão;
- Desenho das bancadas, observando altura e ângulos;
- Fragmentação, umidade e densidade do material a ser carregado;
- Projeto das praças de carregamento;
- Condições de piso;
- Regime e horário de trabalho;
- Necessidade de mobilidade.

Ainda segundo Jesus (2013), outros fatores como prazo de fornecimento, vida útil e taxa de consumo de energia ou combustível devem ser considerados na análise de seleção destes equipamentos. É importante também considerar os custos de manutenção, mantenabilidade e disponibilidade de assistência técnica para que seja possível garantir uma mínima confiabilidade da frota ao longo da rotina de produção.

2.2.3 Transporte

Os equipamentos de transporte são responsáveis por levar os materiais do ponto de carregamento até o ponto de descarga predefinido. Para a seleção do melhor modelo de transporte deve-se considerar várias alternativas, como transporte por transportador de correias, locomotivas, caminhões, mineroduto, entre outros. Fatores como volume, densidade, umidade e distância devem ser avaliados para se tomar a melhor decisão (COELHO e MORALES, 2012). O foco deste trabalho é transporte por caminhões.

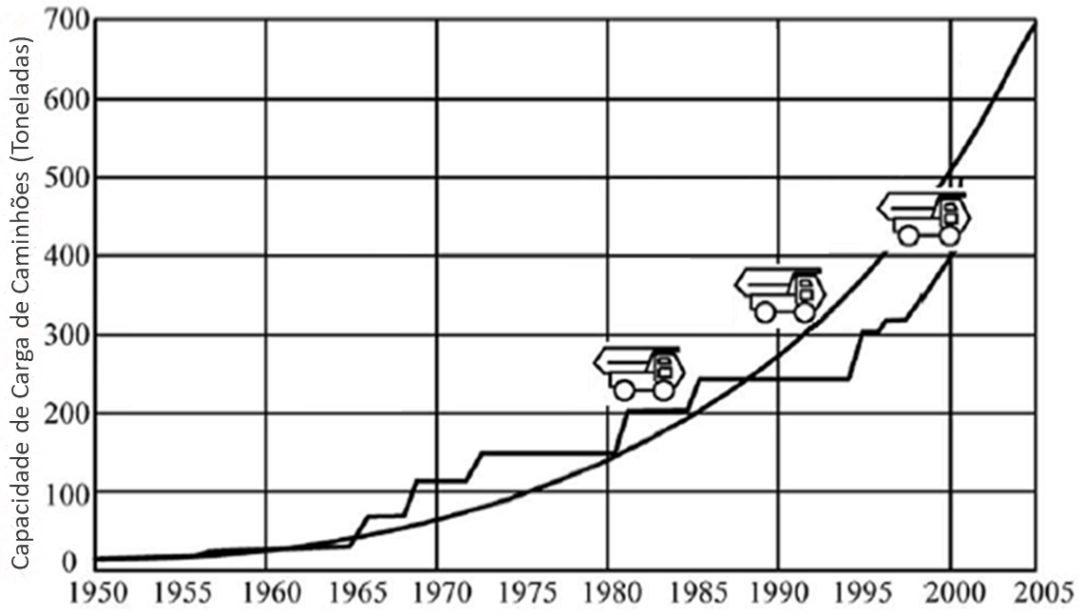
AusIMM (2012) classifica os principais caminhões utilizados nos processos de mineração pelas características abaixo:

- Forma de Basculamento/Descarga:
  - Descarga Traseira;
  - Descarga Lateral;
  - Descarga pelo fundo;
- Direção:
  - Direção Frontal;
  - Direção Articulada;

- Tração:
  - Tração Traseira;
  - Tração em todas as rodas;
- Número de Eixos:
  - Dois Eixos;
  - Três Eixos;
  - Mais de Três Eixos;
- Trem de Força:
  - Mecânico;
  - Elétrico;
  - Híbrido.

Ao longo das últimas décadas o porte de caminhões ofertado no mercado aumentou muito com o emprego de novas tecnologias, gerando muita competividade e novas alternativas para análise nas operações, conforme ilustrado na Figura 5 (KOELLNER *et al.*, 2004).

Figura 5 - Histórico de Aumento de Porte de Caminhões para a Mineração



Fonte: Adaptado de KOELLNER *et al.* (2004).

Conforme mostrado na Figura 6, o ciclo de trabalho de um caminhão é composto de atividades em que o equipamento está se deslocando de um ponto a outro. O ciclo possui tempos

considerados variáveis por serem afetados pela distância, ocorrências no trajeto e pela velocidade. O ciclo possui também atividades que possuem um tempo teoricamente fixo, como manobras na carga e basculamento, e o basculamento propriamente dito (KOELLNER *et al.*, 2004). Ao se realizar a seleção do equipamento ideal para a operação, deve-se considerar as particularidades da operação nestes fatores, e buscar o equipamento com maior capacidade de desempenhar essas etapas da forma mais eficiente. Por exemplo, não seria produtivo selecionar um caminhão com um ângulo de curvatura muito alto para operar em uma mina com planejamento de vias e praças inferiores ao necessário para um bom desempenho do equipamento.

Figura 6 - Resumo do Ciclo de Trabalho de um Caminhão



Fonte: Adaptado de Coutinho (2017).

Curi (2017) afirma que alguns fatores são de fundamental importância na tomada de decisão para a seleção dos equipamentos. Alguns destes fatores são condições de pistas e acessos, condições climáticas da região, volume de material a ser movimentado, largura e inclinação das vias, condições de segurança, sistema de gerenciamento da produção e padronização de frota.

AusIMM (2012) reforça outros pontos que requerem atenção na avaliação de seleção dos equipamentos de transporte tais como carga útil, peso líquido, peso bruto máximo do veículo, dimensões, curvas de aceleração e frenagem, pneus, potência e tipo de acionamento.

Cada operação possui características que podem interferir de forma positiva ou negativa no desempenho de cada tipo de equipamento.

2.3 Dimensionamento de Frotas

2.3.1 Premissas Operacionais

Um dos principais fatores de sucesso de uma operação de mina é a correta seleção dos métodos de trabalhos aplicáveis às condições operacionais existentes. Esses métodos devem ser previamente mapeados e analisados no planejamento estratégico da operação e servirão de premissa para o dimensionamento da frota (CORONADO; TENORIO, 2015).

Para Lima (2020), o dimensionamento de frotas requer visão sistêmica do planejamento de lavra de médio e longo prazos, aliados ao conhecimento dos principais equipamentos de mineração. O investimento em equipamentos de mina é expressivo, não sendo recomendável utilizar cenários inferiores a 5 anos para tomada de decisão. O ideal para análise são prazos iguais ou superiores a 10 anos.

Para Moreira Neto (2018), a análise de aquisição de um equipamento de grande porte deve considerar, além do valor de aquisição, o custo total de propriedade, comumente chamado de TCO – *Total Cost of Ownership*. O valor inicial de aquisição destes equipamentos é um entre vários itens a serem considerados, uma vez que a vida útil destes equipamentos pode chegar a 15 ou 20 anos.

Segundo Newman *et al.* (2010), o planejamento de longo prazo da operação de mina, desdobrado em planos de médio e curto prazo, dará embasamento para a tomada de decisão quanto à seleção de equipamentos mais aplicável e econômica a ser utilizada.

Jesus (2013) afirma que, antes de iniciar o dimensionamento, o dimensionador precisa ter algumas informações sobre o projeto, desde a vida útil, até a natureza do solo.

Souza-Junior (2012) salienta que, na elaboração do planejamento da mina, vários fatores irão influenciar nas definições de métodos de operação e afetarão na seleção dos equipamentos. Dentre esses fatores se destacam o formato e tamanho da jazida, angulação de mergulho e profundidade do corpo, geologia da cava e vida útil do projeto. O mesmo autor cita também

como pontos de atenção a distância de transporte, a relação estéril/minério, licenciamentos, aportes financeiros e disponibilidade de recursos.

Andrade (2004) ressalta que, para encontrar a solução ótima em qualquer modelo para tomada de decisão, é preciso realizar o mapeamento criterioso de suas restrições e variáveis de interesse.

Há no mercado uma grande variedade de modelos de equipamentos de vários portes e aplicabilidade. A escolha do modelo mais adequado ao modelo de operação é fator decisivo para o sucesso de empreendimento de mineração. A Tabela I relaciona alguns tipos de solo com modelos aplicáveis a eles (MIRANDA-JUNIOR, 2011).

Tabela I - Tipos de Solo x Modelos de Equipamentos

TIPOS DE MATERIAIS						
Tipo de Solo	Solo Orgânico (Topsoil)*	Vegetação	Brando e Seco	Brando e Úmido	Dureza Média ou Altamente Fraturado	Duro e Denso*
ESCAVAÇÃO						
Trator / Carregadeira Frontal	X	X	X		X	X*
Scraper	X		X		X*	
Shovel			X		X	X
Draglines			X	X	X*	
Bucket Well Escavator	X		X		X	
Dragas				X		
TRANSPORTE						
Scraper	X		X		X*	
Carregadeira Frontal	X		X		X	
Caminhão	X	X	X	X*	X	X
Correia Transportadora	X		X		X	X*
Hidráulico	X*		X*	X		
Trens		X			X	X
OUTROS						
Britador						X
*Depende de condições específicas						

Fonte: Miranda-Junior (2011)

Burt e Caccetta (2018) afirmam que o processo de análise e seleção dos equipamentos da mina faz parte do processo de elaboração do planejamento da mina. Estes processos devem ocorrer em paralelo, uma vez que aspectos, incertezas, restrições e conclusões observados em

um, poderá interferir nas tomadas de decisões a serem aplicadas ao outro. Por exemplo, nas análises de porte de caminhões, pode-se concluir que determinado equipamento é economicamente vantajoso em função de caraterísticas do material, distância de transporte, possibilidades de carregamento, entre outros. Porém, no decorrer do planejamento da mina podem surgir restrições previamente não mapeadas que limitem larguras de vias e de praças. Neste caso se faz necessário realizar revisões no plano ou no estudo de equipamentos, de modo a adequar à nova condição de premissa.

Além de premissas operacionais de produtividade e segurança, é fundamental que se observe também premissas de horas trabalhadas para as frotas. Fatores como intempéries, sazonalidades e regime de trabalho, além de indisponibilidade operacional da frota, irão restringir o aproveitamento das horas-calendário da operação. Neste ponto, Ali e Reza (2013) afirmam que, no momento da análise do tipo de equipamento que será selecionado para sua operação, deve-se analisar os fatores de mantenabilidade e confiabilidade. Isso auxiliará a garantir que se tenha o equipamento disponível conforme o previsto para atendimento à produção dentro dos custos esperados.

Para Racia e Peroni (2014), a correta seleção dos equipamentos depende das seguintes premissas:

- Porte dos empreendimentos: estimativa de vida útil da mina, taxa de produção, método de lavra;
- Projeto de cava: altura das bancadas, largura das frentes de trabalho, diferença de nível entre as frentes de lavra e o destino dos caminhões;
- Tipos de rocha: características do minério e do estéril, como massa específica "*in-situ*", empolamento, umidade, resistência à escavação, grau de fragmentação, tipo de desmonte necessário;
- Projeto de deposição do estéril: local da deposição, forma de disposição do estéril, distância média de transporte;
- Projetos das estradas: largura das estradas (com uma largura mínima de pista igual a 3,5 vezes a largura do caminhão), inclinação longitudinal das rampas de acesso, raio de curvatura em trechos curvos, acabamento da superfície de rolamento;

- Planejamento de lavra: número de frentes simultâneas, relação estéril/minério, frequência de deslocamento entre as frentes de lavra;
- Destino do minério: distância, tipo, dimensões e taxa de produção do equipamento que receberá o minério do caminhão, tais como britadores, silos, pilha para lixiviação, entre outros;
- Infraestrutura de apoio: recursos de manutenção, recursos para abastecimento, comunicações etc.;
- Equipamentos para demais operações: manutenção das estradas e frentes de lavra, desmonte de minério e do estéril etc.

2.3.2 Seleção de par de equipamentos para operação

O par de equipamentos formando o conjunto equipamento de carga e equipamento de transporte é comumente chamado de *match* de equipamentos (LIMA, 2020).

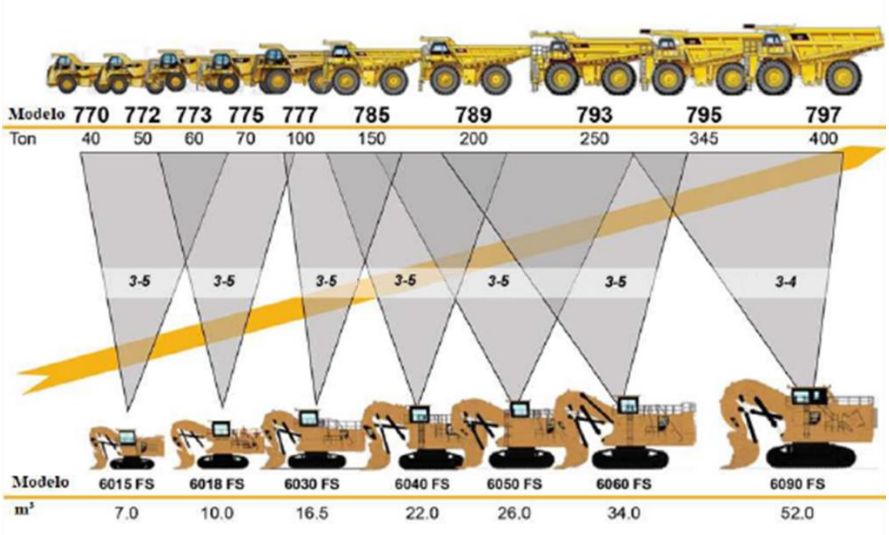
Um fator para determinação do *match* ideal de equipamentos de carga e transporte, segundo Lima (2020), é a produtividade horária que será realizada por estes equipamentos em função das capacidades individuais de cada um. Nos processos de carregamento e transporte, a produtividade será maximizada com a otimização do tempo de ciclo total das frotas, e esta condição é favorecida quando analisada em conjunto com equipamentos de carregamento e transporte.

O tamanho do caminhão é premissa para o tamanho do equipamento de carga, e vice-versa. Normalmente, para uma performance ótima, os principais operadores entenderam que o equipamento de carga deve carregar o caminhão com um número de passes entre três e seis. Embora exista esta referência, outros fatores podem contribuir para determinação do equipamento de carga, como por exemplo: tipo de material, necessidade de escavação, equipamentos de limpeza de praça, padronização de frota etc. (QUEVEDO, 2009).

De acordo com Lages (2018), deve-se observar a compatibilidade do *match* de equipamentos de modo a se evitar perdas de produtividade. Por exemplo, caso a capacidade das escavadeiras seja muito inferior à dos caminhões, teremos em tempo de carregamento muito alto, e os equipamentos de transporte executarão menos viagens por hora que a sua capacidade. Por outro lado, caso a capacidade da escavadeira seja muito superior à dos caminhões, a

escavadeira ficará muito tempo parada aguardando caminhões ou aguardando manobras de caminhões. A Figura 7 exemplifica uma relação de compatibilidade de equipamentos de carregamento e transporte proposta pela Caterpillar.

Figura 7 - Compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas frontais (Quantidade de passes por match)



Fonte: Adaptado de Lages (2018).

Coronado e Tenório (2015) nos trazem que as recomendações de compatibilidade de equipamentos de carregamento e transporte são construídas através da análise das capacidades de básculas dos caminhões e de concha das máquinas de carga. Normalmente recomenda-se que o número de passes de carregamento da máquina de carga fique entre três e cinco. Acima de cinco passes temos perda de produtividade na frota de transporte e abaixo de três temos perda produtividade na frota de carga. Há situações em que se admite fugir desta referência, de acordo com as necessidades e particularidades das operações.

Para este trabalho será considerado que o número de passes padrão ficará entre três e cinco passes, podendo ser ajustado conforme a necessidade e análise do responsável pelo dimensionamento.

Alguns fatores de produtividade dependem da rotina de operação da mina e outros dependem exclusivamente das capacidades individuais do equipamento. Porém há ainda outros que dependem dos equipamentos que possuem interface entre si (CAVALCANTE, 2020).

Diddens (2019) descreve também que a definição da frota de equipamentos é determinada pelo custo por tonelada e pelo e valor presente líquido (VPL), que devem ser levantados nos estudos.

2.3.2.1 Fator "Fleet Match"

Outro conceito importante é descrito por Burt e Caccetta (2018) como Fator "*Fleet Match*" (FFM). Neste conceito se busca mensurar a compatibilidade do par de equipamentos de carga e transporte pela correlação dos tempos de espera em ambos ao longo do processo de produção. Para frotas homogêneas, a fórmula considera o tempo de carregamento dos caminhões (TCE), a quantidade de caminhões (QET), o tempo total de transporte dos caminhões (TVT) e a quantidade de equipamentos de carga (QEC), conforme (1):

$$\mathrm{FFM} = \frac{\mathrm{TCE} * \mathrm{QET}}{\mathrm{TVT} * \mathrm{QEC}} \quad (1)$$

Os resultados podem ser interpretados da seguinte forma:

- Resultado acima de 1,0: não existe tempo de espera para o equipamento de carga, ou seja, após o término de carregamento de um caminhão, o próximo já terá chegado à praça de carregamento e estará em fila. Quanto maior o valor, maior será a perda para a frota de transporte.
- Resultado abaixo de 1,0: não existe tempo de espera para o caminhão. Sempre que ele chegar na praça de carregamento, o equipamento de carga estará aguardando pronto para realizar o carregamento. Quanto menor o valor, maior será a perda para a frota de carregamento.
- Quanto mais próximo de 1,0 for o resultado, melhor será distribuída a produtividade do *match*.

Quando o FFM é usado para determinar a adequação de uma frota selecionada, deve-se levar em consideração que o custo mínimo da frota pode não ser o mais produtivo. Desta forma, um fator de correspondência de 1,0 não deve isoladamente ser considerado ideal para a mineração, pois corresponde unicamente a uma análise de produtividade. Ou seja, em determinadas situações, um equipamento de carga operando a uma determinada fração de sua

capacidade pode ter um custo total inferior a outro com 100% da capacidade nas mesmas condições (FISONGA; MUTAMBO, 2017).

2.3.3 Dimensionamento dos Equipamentos

Segundo Jesus (2013), a base para a elaboração de um dimensionamento de frota para carregamento e transporte e a estimativa de sua performance são a hora trabalhada e a produtividade horária que irão desempenhar. Os principais fatores a serem considerados são o plano de produção, que contém os volumes e distâncias a serem movimentados, além do período em que essa movimentação necessita ser realizada. Tanto para estimativa da produtividade, quanto das horas trabalhadas, o responsável pelo dimensionamento deve levantar algumas informações previamente que lhe servirão de premissas. Estes fatores irão refletir diretamente nos custos de operação.

Racia e Peroni (2014) citam que o tempo de ciclo dos equipamentos é fundamental para o cálculo da sua produtividade e deve ser calculado considerando parâmetros operacionais e parâmetros dos equipamentos.

Em relação ao volume de materiais, Cavalcante (2020) descreve as métricas para o cálculo do empolamento, sendo o percentual de diferença de densidade do material "*in situ*" e solto após o desmonte.

- Volume "*In situ*": é o volume de material em repouso no seu estado natural, como encontrado na natureza, na bancada a ser lavrada.
- Volume Solto: é o volume de material solto, após desmonte da bancada a ser lavrada.

Cavalcante (2020) aborda também outro conceito importante que é a densidade, que pode ser medida "*in situ*" e empolada. Para dimensionar as frotas utilizamos a densidade empolada, apesar de que em alguns casos, para escavadeiras hidráulicas, possa ser necessária a densidade do material "*in situ*".

2.3.3.1 Produtividade horária – Abordagem Geral

Segundo Pellegrin *et al.* (2007), uma questão extremamente importante para a estimativa de equipamentos necessários à realização de qualquer trabalho é como calcular a

produtividade ou taxa de produção horária. Primeiramente é preciso calcular um valor teórico e ideal com base na capacidade nominal do equipamento. A partir deste resultado, deve-se realizar um ajuste de acordo com os números reais obtidos do histórico da operação, de operações semelhantes, ou de estimativas planejadas. Este ajuste, relativo principalmente à eficiência do trabalho, deve proporcionar um valor realista para o projeto, cuidando para que não seja demasiadamente arrojado ou conservador.

Por isso é necessário um completo entendimento dos cálculos teóricos e do processo de trabalho. Desta forma, o responsável pela análise será capaz de obter um valor adequado para a eficiência de trabalho e para o volume de trabalho que pode ser alcançado.

Ainda segundo Pellegrin *et al.* (2007), uma forma geral para se estimar a produtividade horária de um determinado equipamento é mostrada na Equação (2):

$$A = B * C * D \tag{2}$$

Onde

A = Produtividade Horária (unidades/hora, litros/hora, metros/hora, m³/hora, etc.)
B = Produção por Atividade (unidades, litros, metros, m³, etc.)
C = Número de Atividades por Hora
D = Eficiência do Trabalho

A eficiência do trabalho é um percentual que reflete o quanto o processo propicia que a capacidade nominal do equipamento seja alcançada. Este índice será afetado negativamente por fatores que aumentem o tempo da atividade, reduzindo a quantidade de atividades por hora, ou que reduzam a produção por atividade (PELLEGRIN *et al.*, 2007).

Rodovalho (2016) cita que, com a crescente preocupação e esforço das organizações em reduzir as emissões de carbono, cada vez mais é importante investir em melhorias de produtividade nas operações industriais.

2.3.3.2 Produtividade horária do Carregamento

2.3.3.2.1 Tempo de ciclo do equipamento de Carregamento

O tempo de ciclo de um equipamento de carga (TCC) é composto pelo tempo de enchimento da concha (TEC), tempo de giro/deslocamento com concha carregada (TRC), tempo de deposição do material no equipamento que estiver sendo carregado (TDC) e tempo de giro/deslocamento com concha descarregada (TRD). É comum considerar um fator de acurácia do operador (AO), que pode afetar o tempo de ciclo. Este valor depende da análise do processo, e mais se aproxima de 100% quanto maior for o nível de acurácia do operador (MAY, 2012; BURT; CACCETTA, 2018; JESUS, 2013).

O tempo de ciclo total de um equipamento de carregamento é definido pela Equação (3):

$$\mathrm{TCC} = \frac{\mathrm{TEC+TRC+TDC+TRD}}{\mathrm{AO}} \tag{3}$$

Apesar de não ser o foco deste trabalho, algumas literaturas fornecem valores de referência, que devem ser avaliados conforme realidade das aplicações. As tabelas II e III exemplificam os dados sugeridos em Komatsu (2013) para algumas frotas. Neste exemplo, o tempo de ciclo de referência seria dado pelo produto do tempo de referência com o fator de ajuste.

Tabela II. Tempo de Referência para o Ciclo de Escavadeiras

Modelo	Ângulo de Giro		Modelo	Ângulo de Giro	
	45° --- 90°	90° --- 180°		45° --- 90°	90° --- 180°
PC78	10 --- 13	13 --- 16	PC270, PC290	15 --- 18	18 --- 21
PW148	11 --- 14	14 --- 17	PC300, PC350	15 --- 18	18 --- 21
PC130, PC138US	11 --- 14	14 --- 17	PC400, PC450	16 --- 19	19 --- 22
PC160	13 --- 16	16 --- 19	PC600, PC700	17 --- 20	20 --- 23
PW160, PW180	13 --- 16	16 --- 19	PC750, PC800, PC850	18 --- 21	21 --- 24
PC190	13 --- 16	16 --- 19	PC1250	22 --- 25	25 --- 28
PC200, PC210, PC228US	13 --- 16	16 --- 19	PC2000	24 --- 27	27 --- 30
PW200, 220	14 --- 17	17 --- 20			
PC220, PC230, PC240	14 --- 17	17 --- 20			

Fonte: Adaptado de Komatsu (2013)

Tabela III. Fator de Ajuste para o Tempo de Ciclo

Condição de Escavação Profundidade Realizada / Profundidade Max. Especificada	Condição de Descarga			
	Fácil (Descarga em Pilha)	Normal (Local de Descarga Grande)	Pouco Difícil (Local de Descarga Pequeno)	Dificil (Local de Descarga Pequeno com máxima acertividade)
Abaixo de 40%	0.7	0.9	1.1	1.4
Entre 40 e 75%	0.8	1	1.3	1.6
Acima 75%	0.9	1.1	1.5	1.8

Fonte: Adaptado de Komatsu (2013)

2.3.3.2.2 Quantidade de Material por Ciclo

Para o cálculo da produtividade horária, é preciso calcular o volume de material escavado e carregado por ciclo do equipamento de carga (VMC). Esse cálculo será afetado pelo volume da concha do equipamento em (VC) e pelo percentual de enchimento da concha (ENC) (ERCELEBI; BASCETIN, 2009; BURT; CACCETTA, 2018; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

A Equação (4) a seguir demonstra este cálculo:

$$\mathrm{VMC} = \mathrm{VC} * \mathrm{ENC} \tag{4}$$

É possível também calcular a massa de material escavado e carregado por ciclo (MMC), considerando-se a densidade do material (DM) e o percentual de empolamento do material (EMP) (ERCELEBI; BASCETIN, 2009; BURT; CACCETTA, 2018; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

A Equação (5) a seguir demonstra este cálculo:

$$\mathrm{MMC} = \frac{\mathrm{VC}*\mathrm{DM}}{1+\mathrm{EMP}} \tag{5}$$

2.3.3.2.3 Quantidade de Ciclos Necessários

Na sequência podemos calcular a quantidade de ciclos (QCC) necessários para a realização do carregamento completo de um equipamento de transporte. Para tal é importante considerar também a informação de capacidade mássica (CMT) e volumétrica (CVT) do equipamento de transporte. A capacidade do equipamento de transporte deve ser verificada

considerando o seu fator de enchimento admissível, a densidade e o fator de empolamento do material, uma vez que não se deve exceder as capacidades de peso do equipamento (BURT; CACCETTA, 2018; JESUS, 2013).

O cálculo da quantidade de ciclos do equipamento de carga se dá pela Equação (6):

$$\mathrm{QQC} = \frac{\mathrm{CVT}}{\mathrm{VMC}} = \frac{\mathrm{CMT}}{\mathrm{MMC}} \tag{6}$$

Neste item, é necessária uma análise de melhor produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte em conjunto, pois os cálculos podem resultar em quantidades decimais de ciclos como, por exemplo, 3,4 ciclos. Assim é necessária uma análise da viabilidade de se considerar a carga completa com 3 ciclos, ou reduzir o volume do ciclo ajustando para 4 ciclos. É necessário verificar se o ganho na carga do equipamento, compensa o aumento do tempo de carregamento com o ciclo adicional (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

2.3.3.2.4 Tempo de Carregamento

O tempo de carregamento efetivo (TCE) será calculado multiplicando-se a quantidade de ciclos necessários pelo tempo de cada ciclo (FISONGA; MUTAMBO, 2017; MAY, 2012, CAVALCANTE, 2020).

A Equação (7) apresenta este cálculo:

$$\mathrm{TCE} = \mathrm{QQC} * \mathrm{TCC} \tag{7}$$

Deve-se ainda estimar o tempo de espera para troca do equipamento de transporte (TTT), que é o intervalo de tempo gasto entre a conclusão de um carregamento e a manobra do outro equipamento para que o carregamento seja iniciado.

2.3.3.2.5 Produtividade Horária Efetiva de Carregamento

Definidos esses valores, pode-se calcular a produtividade efetiva dos equipamentos de carga (PEC). Esta produtividade pode ser calculada em capacidade mássica ou volumétrica (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; MAY, 2012), conforme Equações (8) e (9).

$$\mathrm{PEC\ Volume} = \frac{\mathrm{CVT}}{\mathrm{TTT+TCE}} \tag{8}$$

Ou

$$\text{PEC Massa} = \frac{\text{CMT}}{\text{TTT+TCE}} \quad (9)$$

A produtividade efetiva de um equipamento de carga será afetada fortemente por condições de trabalho. Tais condições incluem o posicionamento da máquina em relação ao material ou ao equipamento a ser carregado, condições de fragmentação do material a ser carregado, forma de penetração no solo, atrasos operacionais, entre outros (JESUS, 2013, MAY, 2012).

2.3.3.2.6 Produtividade Horária Global de Carregamento

Como em todo processo pode existir um determinado nível de ineficiência, deve-se analisar, e aplicar se necessário, um percentual de eficiência operacional (EO), que deve ser estimado com base no processo em particular. Jesus (2013) observa que se deve avaliar os índices de acurácia do operador e de eficiência com critérios técnicos e em conjunto, de modo a não se sobrepor perdas de produtividade nos dois parâmetros.

O cálculo da produtividade global (PGC) do equipamento de carregamento, considerando a eficiência operacional, se dará conforme Equações (10) e (11):

$$\text{PGC Volume} = \left(\frac{\text{CVT}}{\text{TTT+TCE}}\right) * (1 - \text{EO}) \quad (10)$$

Ou

$$\text{PGC Massa} = \left(\frac{\text{CMT}}{\text{TTT+TCE}}\right) * (1 - \text{EO}) \quad (11)$$

2.3.3.3 Produtividade Horária do Transporte

2.3.3.3.1 Tempos do Ciclo de Transporte

O tempo de ciclo do equipamento de transporte (TCT) será afetado por fatores que chamamos de tempos fixos (TFT) e fatores que chamamos de tempos variáveis (TVT). Os tempos fixos são os tempos de manobras na carga e descarga (TMC + TMD), tempo de basculamento (TD), tempo de carregamento efetivo (TCE), que deve ser o mesmo considerado para o equipamento de carga, e tempos de filas na carga e descarga (TFC + TFD). Fatores que

chamamos de tempos variáveis (TVT) são os tempos de transporte carregado (TTC) e de transporte vazio (TTV) (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; MAY, 2012; BURT; CACCETTA, 2018).

O tempo de carregamento é a parcela que faz com que a produtividade horária do caminhão precise ser calculada levando-se em consideração o equipamento de carregamento que ele irá trabalhar em conjunto (JESUS, 2013; MAY, 2012; CAVALCANTE, 2020).

Os tempos fixos levam em consideração parâmetros dos equipamentos, além de condições e estratégias operacionais. Para uma maior aderência das estimativas com as condições operacionais, sempre que possível o responsável pelo dimensionamento deve buscar dados reais da operação em campo (FISONGA; MUTAMBO, 2017).

O tempo de basculamento geralmente irá depender das condições do veículo e tende a ser um tempo com menor variabilidade. Já os tempos de manobra na carga e na descarga serão afetados por condições dos locais de operação e do fluxo de equipamentos. Os tempos de fila na carga e na descarga serão afetados por estratégias, parâmetros e condições operacionais que podem ser afetadas por diversos fatores no dia a dia. Podem interferir nos tempos de fila a utilização ou não de depósitos e suas condições, a quantidade de frentes operacionais, a disponibilidade e acessos a depósitos ou performance das plantas de britagem. O tempo de carregamento é impactado pelo equipamento de carga selecionado para trabalhar em conjunto e pelas condições do material a ser carregado (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

O tempo Fixo do equipamento de transporte pode ser calculado conforme Equação (12).

$$\mathrm{TFT} = \mathrm{TFC} + \mathrm{TMC} + \mathrm{TCE} + \mathrm{TFD} + \mathrm{TMD} + \mathrm{TB} \tag{12}$$

A depender da eficiência do processo, algumas parcelas do tempo fixo podem inexistir ou ter valores irrisórios (JESUS, 2013).

O tempo variável dos equipamentos de transporte é composto basicamente pelos tempos de deslocamento cheio e vazio, e são influenciados pela distância percorrida cheio e vazio, e suas respectivas velocidades de deslocamento (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

Coutinho (2017) cita que os tempos de deslocamento, além de serem afetados pela distância de transporte, serão também afetados por condições das vias, perfil das vias, resistência ao rolamento, carga do equipamento, interferências no trajeto e condições operacionais que possam interferir na velocidade do veículo.

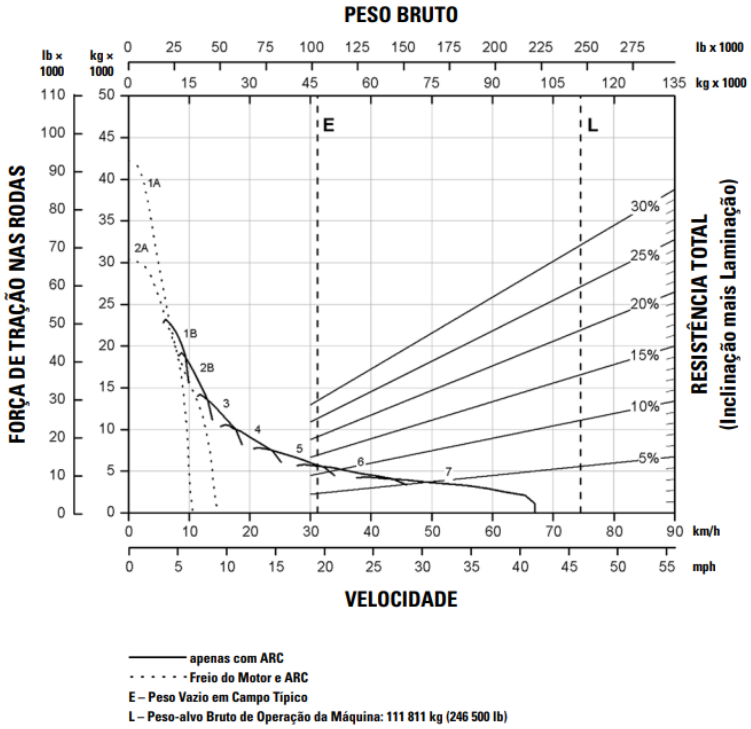
As distâncias de transporte são premissas de planejamento da operação e são definidas na elaboração do planejamento de produção. O plano de produção deve ser elaborado levando em consideração diversos fatores para a melhor condição do fluxo de equipamentos, como gradiente de rampas, ângulos de curvatura, largura de vias, largura de praças etc. (JESUS, 2013; RACIA, 2016).

Para Amaral (2008), mesmo com a utilização de softwares de planejamento de lavra, a distribuição das rotas e planejamento de distâncias deve ser alvo de análise criteriosa. O planejador deve avaliar os melhores trajetos, considerando otimização da distância, distribuição do fluxo de equipamentos, e redução de interferência das distintas frentes em operação.

As velocidades cheio (VTC) e vazio (VTV), a serem consideradas no cálculo do tempo de deslocamento, irão depender das condições operacionais da mina, bem como dos equipamentos selecionados para a operação. Sempre que possível podemos utilizar valores medidos em campo, refletindo a realidade da operação (FISONGA; MUTAMBO, 2017).

Para alguns equipamentos de maior porte temos ainda como referência as curvas de *Rimpull*, que estimam a velocidade que os equipamentos conseguem atingir. A estimativa é realizada correlacionando o peso do equipamento, o gradiente da rampa e a resistência ao rolamento, definindo inclusive a marcha que o equipamento deve operar em cada condição (AUSIMM, 2012), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Curva de *Rimpull* Caterpillar



Fonte: Adaptado de AUSIMM (2012)

Através das distâncias e das velocidades aplicáveis, podemos realizar o cálculo do tempo variável de transporte (TVT) (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

A Equação (13) apresenta este cálculo:

$$\mathrm{TVT} = \left(\frac{\mathrm{DTC}}{\mathrm{VTC}}\right) + \left(\frac{\mathrm{DTV}}{\mathrm{VTV}}\right) \tag{13}$$

Assim como para a frota de carregamento, é comum considerar um fator de acurácia do operador (AO) que pode afetar o tempo de ciclo. Este valor depende da análise do processo e se aproxima de 100% quanto maior for o nível de acurácia do operador (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

Desta forma, de posse dos índices previamente calculados, o tempo de ciclo da frota de transporte é calculado conforme a Equação (14):

$$\mathrm{TCT} = \frac{\mathrm{TFT}+\mathrm{TVT}}{\mathrm{AO}} \tag{14}$$

2.3.3.3.2 Carga Transportada

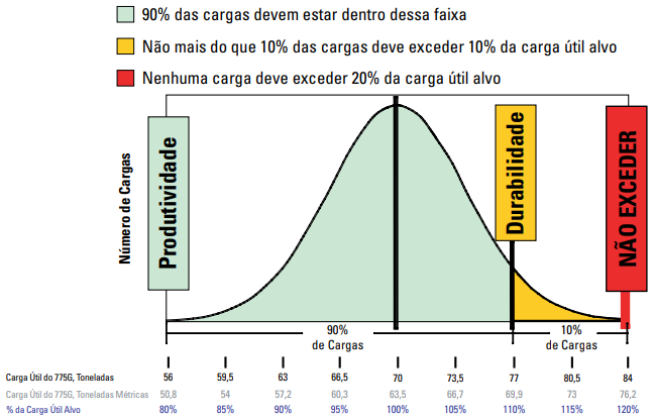
Para o cálculo da produtividade dos equipamentos de transporte, precisamos também considerar a carga do equipamento. Assim como na frota de carga, também podemos calcular a produtividade volumétrica e mássica, e devemos considerar a capacidade nominal especificada para o equipamento (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

Os equipamentos de transporte são fornecidos com especificações definidas de volume da caçamba, que pode variar conforme a necessidade da operação, e quanto à capacidade de peso (BERNARDI, 2015).

A carga média para frota de transporte deve sempre ser dimensionada conforme a capacidade especificada para o equipamento. Uma carga superior à especificada fará com que o caminhão fique mais pesado, consumindo mais combustível, diminuindo a velocidade média e prejudicando a vida útil dos componentes e pneus (KOELLNER *et al.*, 2004).

Um exemplo de gestão da carga média a ser dimensionada e utilizada na operação é a política 10/10/20 da Caterpillar, publicada em seus manuais, ilustrada na Figura 9, e amplamente difundida nas operações de mina com seus equipamentos. Com base nessa política, a mediana da distribuição das cargas deve ser a carga nominal do equipamento e 10% das pesagens medidas não devem exceder 110% da mediana. Além disso, nenhuma pesagem deve exceder 120% da mediana (BERNARDI, 2015).

Figura 9 - Curva 10/10/20 Cartepillar



Fonte: (CATERPILLAR, 2019)

Apurada a carga admissível nos equipamentos, é possível calcular o volume utilizando-se da densidade e empolamento. A capacidade de carga calculada, a densidade e o empolamento devem ser os mesmos no dimensionamento dos equipamentos de carregamento e transporte.

2.3.3.3.3 Produtividade Horária Efetiva de Transporte

Definidos os valores de carga e tempos de ciclo, pode-se calcular a produtividade efetiva dos equipamentos de transporte (PET). Esta produtividade pode ser calculada em capacidade mássica ou volumétrica (JESUS, 2013).

As Equações (15) e (16) a seguir demonstram estes cálculos:

$$\text{PET Volume} = \frac{\text{CVT}}{\text{TCT}} \tag{15}$$

Ou

$$\text{PETMassa} = \frac{\text{CMT}}{\text{TCT}} \tag{16}$$

2.3.3.3.4 Produtividade Horária Global de Transporte

Para o cálculo da produtividade horária global deve-se considerar também para a frota de transporte um percentual de eficiência operacional (EO), analisando as particularidades de cada processo. Deve-se avaliar os índices de acurácia do operador e de eficiência com critérios técnicos e em conjunto, de modo a não se sobrepor perdas de produtividade nos dois parâmetros (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017; BURT; CACCETTA, 2018).

As Equações (17) e (18) demonstram os cálculos da produtividade horária global da frota de transporte:

$$\text{PGT Volume} = \left(\frac{\text{CVT}}{\text{TCT}}\right) * (1 - \text{EO}) \tag{17}$$

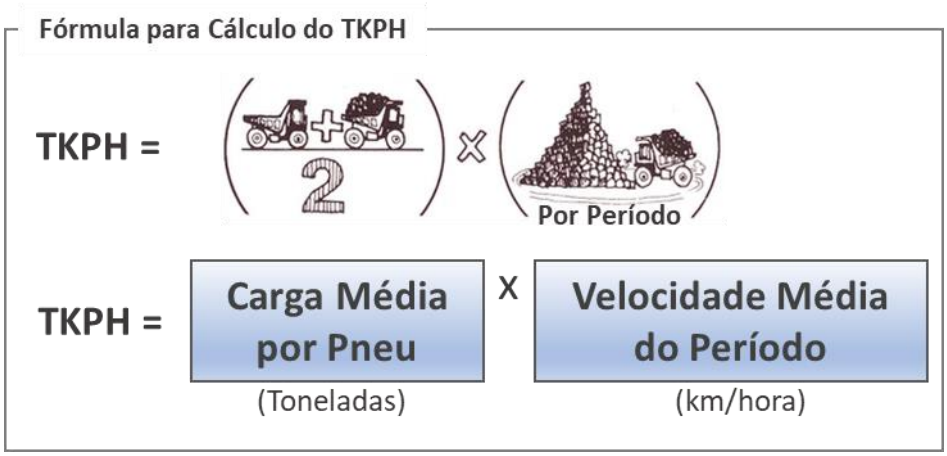
Ou

$$\text{PGT Massa} = \left(\frac{\text{CMT}}{\text{TCT}}\right) * (1 - \text{EO}) \tag{18}$$

2.3.3.4 TKPH –Tonne-Kilometres Per Hour (Tonelada-Quilômetro por hora)

Um ponto de extrema importância a se observar nos índices de dimensionamento da frota de transporte é o TKPH, sigla que em português significa Tonelada-Quilômetro por Hora. Este é um índice que determina a capacidade máxima que os pneus poderão suportar durante uma hora de trabalho (AUSIMM, 2012; FISONGA; MUTAMBO, 2017). O TKPH deverá ser considerado no momento do dimensionamento, de modo a garantir que os índices utilizados estão de acordo com a especificação planejada para os pneus da frota. Isso se faz necessário para garantir a aplicabilidade do dimensionamento e evitar riscos à segurança, danos prematuros e custos adicionais não planejados durante a operação da frota. A Figura10 ilustra o cálculo do TKPH (AUSIMM, 2012).

Figura 10 - Fórmula de Cálculo do TKPH



Fonte: (AUSIMM, 2012)

2.3.3.5 Horas Trabalhadas

Para o cálculo das horas trabalhadas dos equipamentos, deve-se levar em conta os percentuais de disponibilidade física (DF) e utilização física (UF) praticáveis para as frotas em relação às horas-calendário (QUEVEDO, 2009).

As horas-calendário são referentes à quantidade de horas contempladas no período útil de operação das frotas (QUEVEDO, 2009; JESUS, 2013). Por exemplo, em uma operação que trabalhe 24 horas por dia durante 365 corridos, temos 24 * 365 = 8760 horas calendário.

Conforme se pode verificar em Quevedo (2009) e Jesus (2013), horas serão divididas em algumas categorias de horas, sendo:

- Horas de manutenção (HM): tempo em que o equipamento não está disponível para operação por estar manutenção. Estas horas de manutenção irão impactar negativamente na disponibilidade física (DF) e podem ser subdivididas em:
  - Horas de manutenção corretiva (HMC): equipamento em uma manutenção não programada;
  - Horas de manutenção preventiva (HMP): equipamento em uma manutenção programada;
- Horas Ociosas (HO): tempo em que o equipamento está disponível para a operação, mas não está sendo utilizado. Estas horas irão impactar negativamente na utilização física (UF) e podem ser subdividas em:
  - Horas Ociosas Internas (HOI): equipamento não sendo utilizado por fatores internos, como trocas de turno ou refeição dos operadores, abastecimento, reuniões de equipe, falta de operadores etc.
  - Horas Ociosas Externas (HOE): equipamentos não sendo utilizados por fatores externos, sem gestão direta da equipe de operação, como condições climáticas por exemplo.
- Horas Trabalhadas (HT): somatório de tempo em que o equipamento está em operação. Estas horas irão impactar positivamente na utilização física (UF) e podem ser subdividas em:
  - Horas Trabalhadas Efetivas (HTEF): equipamento está sendo utilizado e está trabalhando no ciclo de produção em atividades efetivas, como por exemplo carregando, deslocando cheio, deslocando vazio, basculando etc. Essas horas impactam positivamente a produtividade global do equipamento.
  - Horas Trabalhadas em Atraso Operacional (HTAO): equipamento está sendo utilizado, porém em tempo de atraso no ciclo de produção, por exemplo em filas no carregamento, filas no basculamento, escavadeiras aguardando caminhões etc.
  - Horas Trabalhadas não Produtivas (HTNP): equipamento está sendo utilizado, porém em atividades não produtivas como, por exemplo, deslocamentos entre frentes, manutenção de taludes ou acessos etc.

A Figura 11 ilustra a estratificação das horas.

Figura 11. Estratificação das Horas Calendário



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os resultados de utilização e disponibilidade física neste trabalho são apresentados no resultado da fórmula em forma de número decimal, e interpretados de forma percentual. Por exemplo, uma disponibilidade física de 90,1%, tem o resultado expresso na equação por 0,901.

O cálculo da disponibilidade física (DF) pode ser realizado utilizando as horas calendário e horas de manutenção (QUEVEDO, 2009; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

A Equação (19) apresenta este cálculo:

$$\mathrm{DF} = \frac{\mathrm{HC}-\mathrm{HM}}{\mathrm{HC}} \tag{19}$$

O cálculo da utilização física (UF) pode ser realizado utilizando as horas calendário, horas trabalhadas e horas de manutenção (QUEVEDO, 2009; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

A Equação (20) apresenta este cálculo:

$$\mathrm{UF} = \frac{\mathrm{HT}}{\mathrm{HC}-\mathrm{HM}} \tag{20}$$

O indicador que representa o percentual de horas calendário que o equipamento foi realmente utilizado é o rendimento operacional (RO) (QUEVEDO, 2009; FISONGA; MUTAMBO, 2017), representado pela Equação (21):

$$\mathrm{RO} = \frac{\mathrm{HT}}{\mathrm{HC}} = \mathrm{DF} * \mathrm{UF} \tag{21}$$

Utilizando o mesmo exemplo do cálculo das horas-calendário citado acima, podemos exemplificar a disponibilidade física considerando que um equipamento, no período de 30 horas calendário, acumulou 6 horas de manutenção. Sendo assim, aplicando Equação 19, temos uma disponibilidade física no período de ((30 – 6) /30) = 80%. Seguindo com o exemplo, restaram 24 horas disponíveis (30 – 6). Destas 24 horas, suponhamos que a equipe de operação fique impossibilitada de operar por 2 horas devido a refeições dos operadores, 1 hora devido a trocas de turno, 1 hora para abastecimento e inspeções dos equipamentos e mais 1 hora devido a condições climáticas, totalizando 5 horas de paradas e 19 horas de operação. Nessas condições temos uma utilização física acumulada no período de (19 / (30 –6)) = 79,2%.

2.3.3.6 Quantidade de Equipamentos

O cálculo da quantidade de equipamentos deve ser realizado levando em consideração as movimentações demandas no plano de produção.

Com base na massa (MOV_{Massa}) ou volume (MOV_{Volume}) a ser movimentado, e as produtividades já calculadas, é possível determinar a quantidade de horas trabalhadas necessárias ($HT_{Demanda}$) para o atendimento do plano de produção (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

As Equações (22) e (23) demonstram estes cálculos:

$$HT\ Demanda\ Transporte = \frac{MOV\ Massa}{PGTMassa} = \frac{MOV\ Volume}{PGT\ Volume} \quad (22)$$

$$HT\ Demanda\ Carga = \frac{MOV\ Massa}{PGCMassa} = \frac{MOV\ Volume}{PGC\ Volume} \quad (23)$$

Calculadas as horas necessárias e os índices de UF e DF para cada frota, tem-se todos os dados necessários para calcular a quantidade de equipamentos de carregamento (QEC) e de transporte (QET) (JESUS, 2013; FISONGA; MUTAMBO, 2017).

As Equações (24) e (25) demonstram estes cálculos:

$$QEC = \frac{HT\ Demanda\ Carga}{HC*DF\ Carga*UF\ Carga} \quad (24)$$

$$QET = \frac{HT\ Demanda\ Transporte}{HC*DF\ Transporte*UF\ Transporte} \quad (25)$$

É comum encontrar quantidades fracionadas de equipamentos na conclusão destes cálculos. Nestes casos é necessário realizar uma análise operacional promovendo ganhos em performance ou em movimentação, de modo a buscar a máxima eficiência da frota (JESUS, 2013).

2.4 Conceitos de custos

Conforme apresentado em Miranda-Junior (2011), a definição dos custos associados em uma mineração é uma tarefa complexa, pois existe uma grande quantidade de variáveis que necessitam de meios para que possa ser realizada uma organização destas. Estes custos podem ser divididos entre custos de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*) e custos operacionais (OPEX – *Operating Expenditure*).

Os custos de capital são os custos aplicados na implantação da infraestrutura necessária para a implantação do empreendimento de mineração, desde a localização e prospecção da jazida até a partida do projeto, incluindo obviamente a aquisição dos equipamentos (CAVALCANTE, 2020). Estes custos ocorrem também ao longo da vida do empreendimento como, por exemplo, em projetos de aumento de capacidade instalada, aquisição de equipamentos para reposição ou aumento de frota, reforma de equipamentos visando aumento de sua vida útil, construção e ampliação de instalações, entre outros. Os custos de capital podem ser divididos em custo de capital fixo, que são destinados à fase de implantação do projeto, ou custos de capital de giro, que é destinado ao início da produção do projeto.

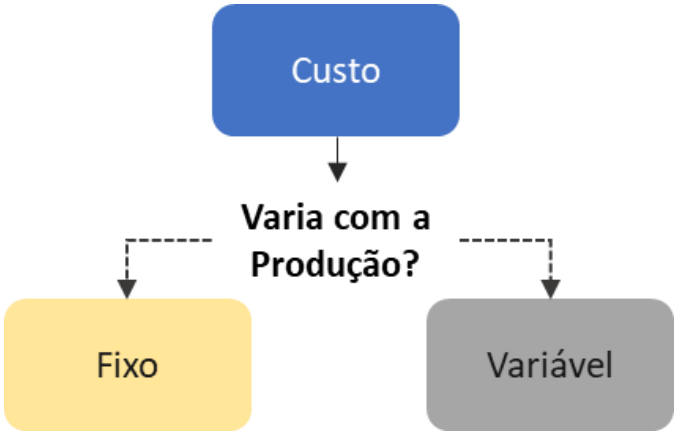
Os custos operacionais são os custos aplicados na operação e condução das atividades de rotina de produção, englobando todas as despesas diárias como insumos, energia, folha de pagamento, manutenção entre outros. Os custos operacionais podem ser classificados como custos fixos ou variáveis, e como custos diretos ou indiretos (ABBAS *et al.*, 2012).

Podemos observar em Abbas *et al.* (2012) que a literatura nos traz os conceitos e definições, além disso temos algumas legislações sobre este tema. Alguns pontos são relativamente amplos, uma vez que é necessário que se adequem aos diversos processos, sendo possível encontrar condições parecidas com apropriações diferentes em empresas distintas, e ainda assim atendendo aos conceitos predefinidos.

Lopes *et al.* (2020) classificam os custos como fixos e variáveis, conforme Figura 12 e relação abaixo:

- Custos fixos: são custos aplicados no processo de produção que não variam conforme o volume produzido. Em sua maioria são gastos relacionados a atividades para suporte à produção. É válido destacar que os custos fixos não são necessariamente com um valor fixo, uma vez que são classificados desta forma apenas por haver uma previsão de desembolso independente da produção. Podemos utilizar como exemplos de custos fixos os gastos com aluguéis de recursos para a produção, folha de pagamento não comissionada, manutenção etc.
- Custos Variáveis: são gastos que variam conforme ocorre variação do volume produzido e normalmente são gastos diretamente relacionados à produção. Podemos utilizar como exemplos em uma lavra o diesel utilizado em equipamentos, alguns tributos, e os explosivos utilizados para desmonte, entre outros.

Figura 12 - Classificação de Custos Fixos e Variáveis



Fonte: Adaptado de LOPES *et al.* (2020)

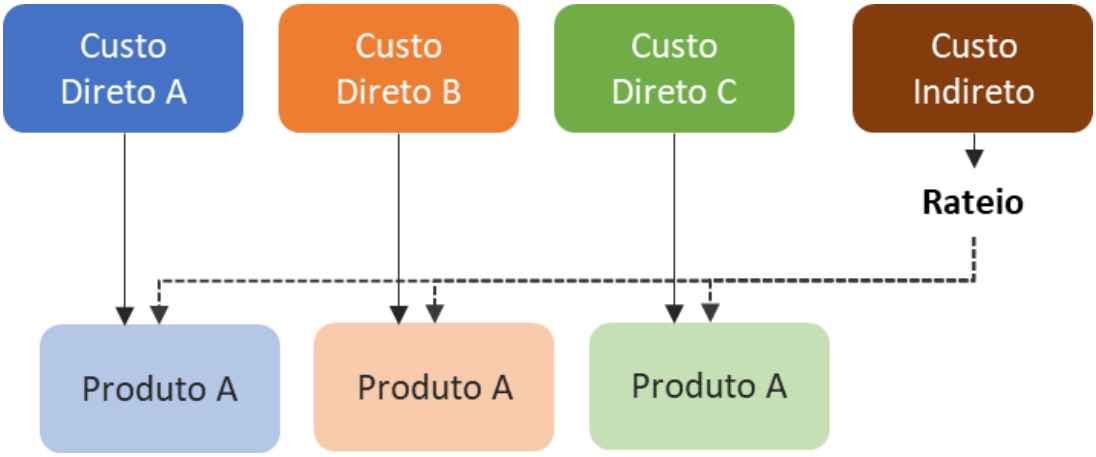
Existe também a classificação dos custos entre diretos e indiretos. Em Colpo *et al.* (2013) podemos classificar os custos como diretos e indiretos, conforme Figura 13 e relação abaixo:

- Custos Diretos: são gastos que podem ser diretamente atribuídos à operação, processo ou produto e são considerados como custos primários. Podemos citar como exemplo a

locação de algum equipamento que irá operar especificamente em algum produto ou com o diesel que foi utilizado neste equipamento.

- Custos Indiretos: são gastos que não podem ser atribuídos diretamente a alguma operação, processo ou produto e demandam um processo de rateio para sua alocação e dependem do nível de controle que se deseja realizar. Podemos citar como exemplos o transporte de funcionários de uma empresa para suas residências, o pagamento de pessoal administrativo, gastos com oficina, entre outros.

Figura 13 - Classificação de Custos Diretos e Indiretos



Fonte: Adaptado de COLPO *et al.* (2013)

Para realização deste trabalho, trataremos nos próximos capítulos dos custos de aquisição dos equipamentos e custos fixos e variáveis de operação dos equipamentos.

2.4.1 Métodos de Custeio

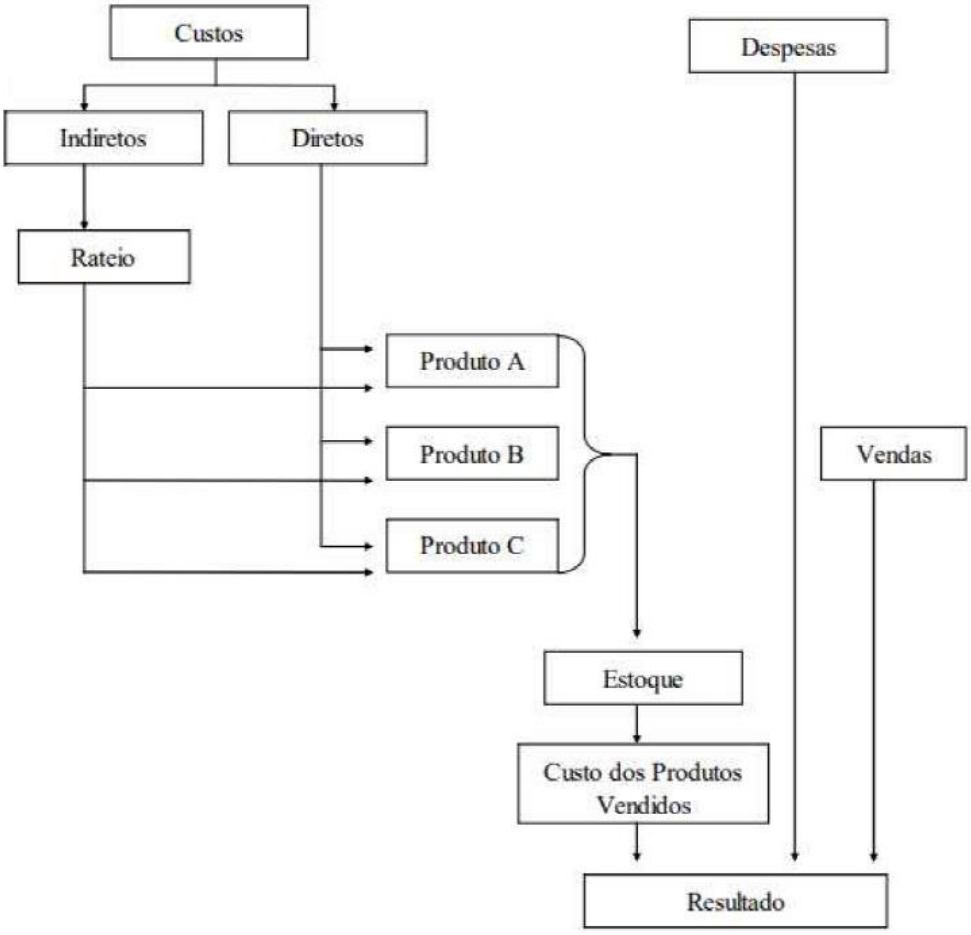
Em Filgueira (2016), encontramos a definição de que métodos de custeio são um conjunto de técnicas, de diversas formas de identificação dos custos, em que cada método tem sua forma específica de classificação dos custos. Antes de definir o método de custeio da empresa, deve-se entender qual o objetivo da entidade e o método que a empresa registra seus custos, referenciando a seu método de produção, seus produtos etc.

Para Cesário Neto (2019), os métodos de custeio mais comuns são o Método de Custeio Variável, o Método de Custeio Baseado em Atividades e o Método de Custeio por Absorção.

2.4.1.1 Custeio por Absorção

No custeio por absorção é necessário realizar a apropriação dos custos fixos e variáveis aos produtos, incorporando aos mesmos os custos ocorridos durante sua produção. No método de custeio por Absorção é necessário separar os gastos em custos e despesas, apropriar os custos diretos e apropriar os custos indiretos. A Figura 14 ilustra um fluxo de custeio por absorção.

Figura 14 - Fluxo de custeio por absorção



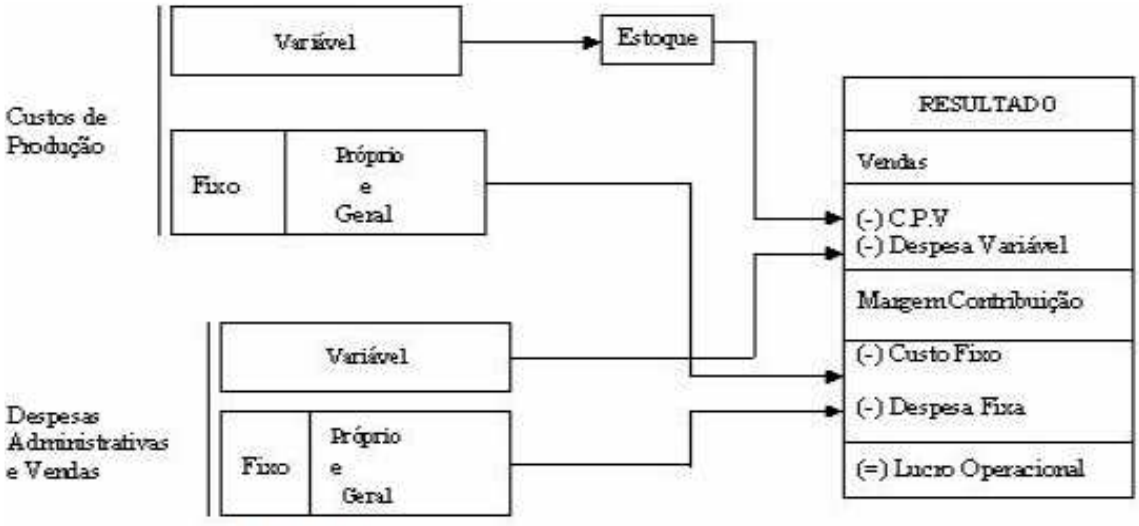
Fonte: Adaptado de CESÁRIO NETO (2019)

2.4.1.2 Custeio Variável

Esse método surgiu da dificuldade de apropriação dos custos fixos e da utilidade do conhecimento dos custos variáveis. Neste método os custos variáveis são alocados aos produtos e os custos fixos são considerados como despesa. Desta forma, a contabilização do estoque será composta por custos variáveis e os custos fixos são direcionados para o resultado. Neste método

os custos fixos correspondem aos recursos necessários na manutenção estrutural da produção, não sendo recursos consumidos pelos produtos em sua produção. Este método não atende aos princípios fundamentais da contabilidade e não é aceito pelo fisco. A Figura 15 ilustra o fluxo do custeio variável.

Figura 15 -Esquema de Custeio Variável



Fonte: Adaptado de CESÁRIO NETO (2019)

2.4.1.3 Método da Unidade de Esforço de Produção (UEP)

Neste método é necessário se realizar a unificação de todas as etapas do processo produtivo e seu objetivo é fornecer informações mais simplificadas para a gestão. É um método indicado para mensurar a eficácia, eficiência e produtividade da empresa. Não é um método recomendado para empresas que desejam controlar os custos de produção de mais de um produto, pois ele possui dificuldades de alocação de custos a produtos diversos (CESÁRIO NETO, 2019).

2.5 Avaliação Econômica

A avaliação econômica de projetos de mineração deve ser abrangente em relação aos aspectos considerados, levando em conta fatores financeiros, técnicos, econômicos, de risco, entre outros. Além disso, fatores intangíveis também devem ser considerados, como instabilidade política, regras econômicas, opinião pública, meio ambiente etc. Esta avaliação

deve ser realizada com projeções de fluxo de caixa, considerando o valor do dinheiro no tempo, e comparando as alternativas econômicas para identificar a mais rentável. Essa seleção deverá ser realizada após um estudo de sensibilidade e análise de riscos para tomada de decisões (ALMEIDA, 2017).

Análises econômicas para cenários de dimensionamento de frotas são parte desta avaliação do projeto como um todo, tanto em suas fases iniciais, quanto para análises ao longo da operação da mina.

2.5.1 Fluxo de Caixa

Para avaliar a capacidade de um negócio render o suficiente para se sustentar e gerar lucro, é utilizado o fluxo de caixa (FC). Nele analisam-se as entradas e saídas de caixa durante um determinado período, realizando um melhor planejamento financeiro (MIRANDA-JUNIOR, 2011; RYBA *et al.*, 2012).

Merschmann (2002) cita que se deve considerar todos os gastos, diretos ou indiretos na composição do fluxo de caixa de uma operação de mineração.

Segundo Almeida (2017), os resultados econômicos de um empreendimento de mineração dependem das projeções de seu fluxo de caixa ao longo de toda sua vida útil. Esse fluxo de caixa é chamado de FC líquido anual. A elaboração de um fluxo de mineração requer conhecimento de vários parâmetros econômicos do projeto conforme a Tabela IV.

Tabela IV - Fluxo de caixa de um projeto de mineração

Fluxo de caixa de um projeto de mineração
(1) Investimento fixo: (1.1)+(1.2)+(1.3)+(1.4)
(1.1) Investimento fixo inicial (equipamentos e serviços)
(1.2) Reposição e reforma de equipamentos
(1.3) Direitos minerários e outros direitos
(1.4) Despesas de "posta em marcha" ou Start Up
(2) Capital de giro (injeção inicial e recuperação final)
(3) Investimento total: (1)+(2)
(4) Receita operacional líquida
(5) Receita não operacional (valor residual ou do salvado)
(6) Receita total: (4)+(5)
(7) Custos operacionais
(8) EBITDA- Lucro Antes dos Juros, Impostos, Depreciação e Amortização: (6)-(7)
(I) FC do Projeto Antes do IR: (3)+(8)
(9) Encargos de capital: (9.1)+(9.2)+(9.3)
(9.1) Depreciação
(9.2) Amortização fiscal
(9.3) Exaustão
(10) Lucro tributável: (8)-(9)
(11) Imposto de renda IR: (alíquota)x(10)
(12) Lucro Após IR: (8)-(11) ou (10)-(11)+(9)
(II) FC do Projeto Após IR: (I)-(11) ou (3)+(12)

Fonte: Adaptado de MIRANDA-JUNIOR (2011)

2.5.2 Indicadores de Rentabilidade

Levando em consideração o valor do dinheiro ao longo do tempo, destacam-se os métodos estáticos e dinâmicos para avaliações econômicas. Os métodos estáticos não consideram o fator tempo em sua análise, como por exemplo a análise de *payback time* e custo anual equivalente. Já os métodos dinâmicos, que são mais amplamente utilizados, consideram o fator tempo avaliando a desvalorização do dinheiro e juros. Os métodos dinâmicos mais utilizados são o Valor Presente Líquido (VPL) ou Valor Atual Líquido (VAL), Índice de Valor Atual (IVA) e Taxa Interna de Retorno (TIR) (MIRANDA-JUNIOR, 2011; BORGES, 2013; FILGUEIRA, 2016).

2.5.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) é também conhecido por Valor Atual Líquido (VAL) e converte os fluxos de caixa de um investimento em um valor estimado na data inicial. É soma

algébrica de todas as entradas e saídas de caixa, com a atualização dos valores pela taxa mínima de atratividade (TMA). O VPL considera a valorização do capital ao longo do tempo, estimando-se o ganho real de investimento (MIRANDA-JUNIOR, 2011; RYBA *et al.*, 2012).

De modo geral, a análise dos resultados conclui que em um VPL negativo as despesas são maiores que as receitas e o projeto é inviável. Já com um VPL positivo, as receitas são maiores que as despesas e o projeto é viável. Para um VPL igual a 0, as receitas e despesas são equivalentes e a decisão de investir no projeto é neutra (RYBA *et al.*, 2012). O cálculo do VPL é indicado na Equação (26).

$$VPL = \left[\sum_{t=1}^{n} \frac{FC_t}{(1+i)^t}\right] - I_0 \tag{26}$$

Sendo:

FC_t = Fluxo de caixa no ano t.
I_0 = Investimento Inicial.
i= Taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade.
n = período

2.5.2.2 Índice de Valor Atual (IVA)

O IVA, também conhecido como índice de rentabilidade ou relação custo-benefício, é um indicador de rentabilidade e se assemelha ao VPL. Pode ser definido como o quociente entre o valor presente das entradas e o valor absoluto presente das saídas, descontados a uma determinada taxa. São viáveis os projetos com índice maior ou igual a 1. É um indicador que mensura a eficiência ou lucratividade do projeto (HAFEMANN *et al.*, 2017; RYBA *et al.*, 2012; MIRANDA-JUNIOR, 2011).

Segundo Miranda-Junior (2011), considerando “p” como o período de investimento o IVA pode ser calculado pelas Equações (27) e (28).

$$IVA = \frac{\sum_{x=1}^{n} \frac{FC_x}{(1+i)^x}}{\sum_{x=1}^{p} \frac{FC_x}{(1+i)^x}} \tag{27}$$

ou

$$IVA = \frac{Valor\ atual\ do\ fluxo\ de\ benefícios\ ou\ entradas\ à\ taxa\ i}{Valor\ atual\ do\ fluxo\ de\ investimentos\ à\ taxa\ i} \tag{28}$$

2.5.2.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de desconto que, aplicada ao fluxo de caixa de um projeto, anula o VPL igualando a soma do valor atual das entradas líquidas ao valor atual das saídas líquidas. A TIR é usada para avaliar a atratividade de um projeto ou investimento. Além disso, pode ser usada para calcular a taxa de retorno de um investimento e para avaliar a rentabilidade dos projetos. É aceitável um resultado de TIR maior ou igual à taxa de atratividade (HAFEMANN *et al.*, 2017; RYBA *et al.*, 2012; MIRANDA-JUNIOR, 2011).

A TIR não deve ser considerada isoladamente para a tomada de decisão, especialmente na comparação de projetos com durações diferentes. É indicado avaliar em conjunto com outras técnicas como o VPL ou IVA (HAFEMANN *et al.*, 2017; RYBA *et al.*, 2012).

Segundo Miranda-Junior (2011), a TIR é a taxa que torna verdadeira a Equação (29) a seguir:

$$VAL = \sum_{j=0}^{n} \frac{[FC_j]}{(1+i)^j} = 0 \tag{29}$$

2.5.3 Análise de Sensibilidade

Para Miranda-Junior (2011), em análises de investimentos, principalmente as que envolvem estimativas com projeção de fluxos de caixa futuros, sempre haverá algum nível de incerteza. É nesse contexto que a análise de sensibilidade se destaca entre as técnicas, pois ela

mostra o quanto um projeto ou investimento será afetado se uma das suas variáveis sofrer alteração.

Para Hafemann *et al.* (2017), uma análise de sensibilidade deve analisar os indicadores relevantes para o resultado e com valores realistas, e isso demanda conhecimento de mercado e processo por parte dos responsáveis pela análise.

Ryba *et al.* (2012) ressaltam que essa ferramenta é importante, pois pode ser utilizada para demandas de análises nos mais diversos níveis e complexidades de projetos. A análise de sensibilidade possibilita que sejam tomadas ações preventivas e preparação de contingências para os riscos relevantes observados.

Segundo Almeida (2017), a análise de sensibilidade investiga a influência da variação de uma ou mais variáveis do estudo sobre os índices que medem a rentabilidade do projeto ou na comparação com outro projeto. As análises de sensibilidade classificam-se em unidimensionais e multidimensionais, quando modificam respectivamente uma ou mais variáveis do estudo, fixando o valor das demais.

Segundo Silva Neto (2017), algumas limitações são inerentes a esta metodologia, pois a análise não fornece informação quanto à probabilidade das variações estudadas, e partem do pressuposto de que todo o resto permanece inalterado (*ceteris paribus*). Este é um ponto especialmente relevante para projetos de mineração, que sofrem alterações das mais diversas formas. Contudo, aplicando-se a devida atenção a estes pontos, esta é uma ferramenta útil e eficaz na elaboração de estudos.

2.5.4 Análise de Riscos

Normalmente, análises econômicas são elaboradas considerando a existência de risco e incerteza das variáveis premissas. Modelos probabilísticos podem ser utilizados na análise, oferecendo uma maior previsibilidade e uma base mais confiável para a tomada de decisões. Entre os principais modelos probabilísticos destacam-se a Análise de Cenários, Árvores de Decisão, e Simulação de Monte Carlo (MIRANDA-JUNIOR, 2011; ALMEIDA, 2017).

2.5.4.1 Análise de Cenários

Para a elaboração de Análise de Cenários, fluxos de caixa esperados e os valores de ativos para diferentes situações devem ser estimados de modo a enfatizar o efeito do risco. As informações que compõem o cálculo do valor do ativo são consideradas para o melhor e pior caso, e os fluxos de caixa são calculados com esses valores. Assim, a medida do risco é tomada como a diferença entre os resultados do melhor e o pior caso. Existe ainda a avaliação para cenários múltiplos, não restritos ao melhor e pior caso, em que o valor do ativo é calculado em cenários distintos, alterando-se as hipóteses para variáveis específicas do ativo (MIRANDA-JUNIOR, 2011; ALMEIDA, 2017).

2.5.4.2 Árvores de Decisão

Árvores de Decisão são eficientes em projetos em que o risco é discreto e sequencial, onde a falha do projeto em qualquer ponto o inviabiliza por completo. Nestes casos, as Árvores de Decisão consideram o risco em cada estágio com respostas cada um deles (MIRANDA-JUNIOR, 2011; ALMEIDA, 2017).

Almeida (2017) ressalta que o método mostra as principais perdas e oportunidades do risco, bem como as ações que devem ser tomadas em reação a elas. Ele gera também a faixa de variação dos valores que contém o risco em potencial para o investimento.

2.5.4.3 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo estima as distribuições de valores para cada parâmetro de análise e obtém um resultado para cada uma das distribuições, gerando um conjunto de fluxos de caixa. Com um número de simulações suficiente, pode ser gerada uma distribuição para esses valores que mostrará a incerteza da análise. Os resultados são apresentados em intervalos, através de distribuições de probabilidade com informações mais assertivas para a análise e tomada de decisão (MIRANDA-JUNIOR, 2011; ALMEIDA, 2017).

2.5.5 Composição de Custos e Comparação de Cenários

Em uma composição de cenários para tomada de decisão quanto à frota que deverá operar em uma lavra, além de aspectos técnicos, devem ser considerados também aspectos econômicos no processo de análise (AUSIMM, 2012).

Em empreendimentos de mineração existem várias dimensões de gastos, porém o objetivo deste trabalho é abordar os gastos diretos, tanto fixos quanto variáveis, incorridos com as frotas de carregamento e transporte ao longo do período a se analisar.

É comum que, na análise operacional dos equipamentos que atendem aos requisitos técnicos para operação de uma mina, sejam levantados mais do que uma opção viável. Nestes casos é preciso fazer uma análise comparativa, incluindo-se aspectos financeiros para a tomada de decisão. Mesmo que seja proposta apenas uma frota como tecnicamente viável para operação da mina, deve-se realizar o levantamento contendo todos os custos com o maior horizonte possível (JESUS, 2013; AUSIMM, 2012).

Para a realização de um comparativo de cenários de frota, é importante que seja observado o mesmo período para todos os cenários, mesmo que as frotas possuam vidas úteis diferentes. Segundo Lages (2018), os principais fatores a serem considerados na valorização dos cenários são:

- CAPEX (*Capital Expenditure)* para aquisição e reposição dos equipamentos;
- Valor residual das frotas ao fim do período analisado e/ou depreciação, a depender da forma do estudo;
- Gastos com mão de obra de operação, incluindo absenteísmo;
- Gastos com manutenção (mão de obra, materiais, serviços);
- Gastos de necessidades de adequações em estruturas de operação e manutenção (oficinas, vestiários, postos de abastecimento, instalações de energia);
- Gastos com combustíveis;
- Gastos com pneus;
- Gastos com materiais de desgaste (ferramentas de perfuração de solo);
- Gastos com aquisição e adequações em equipamentos de apoio diretamente ligados à frota analisada.

Os gastos devem ser elaborados com base no dimensionamento de frotas previamente elaborado, com base nos planos de produção da mina, sendo que estes planos devem abranger o maior período possível.

Quando se tratar de análise de entrada de equipamentos em uma operação que já está em andamento, alguns cuidados a mais devem ser tomados. Souza-Junior (2012) cita alguns destes cuidados conforme abaixo:

- Verificar necessidade de treinamento adicional para operação do equipamento;
- Avaliar se as estruturas físicas, como oficinas de manutenção, postos de combustíveis e britadores, acomodam as dimensões dos novos equipamentos;
- Avaliar se produtividade do equipamento está de acordo com os volumes de produção da mina ao longo da vida do equipamento;
- Avaliar se haverá demanda de outros equipamentos de apoio ou infraestrutura para operação da nova frota;
- Elaborar estratégia para política de sobressalentes e contratos de manutenção para atendimento do novo equipamento;
- Avaliar ajustes necessários no quadro de funcionários com eventuais despesas com contratação ou rescisão contratual de equipe.

Ainda na análise de aquisição de equipamentos para substituição de frotas já em operação, Ali e Reza (2013) citam que se deve realizar um comparativo dos custos de aquisição de equipamento, frente aos custos de revitalização da frota já existente. A depender da estratégia de operação, a revitalização de uma frota pode se mostrar mais atrativa economicamente e operacionalmente, uma vez que a área já está preparada para dar continuidade à sua operação.

Segundo Jesus (2013), devem ser mapeados também os riscos referentes à análise dos cenários, ressaltando fatores que podem demandar revisão do estudo, como variação cambial e alterações do plano de produção, e demonstrar resultados simulando cenários realistas, otimistas e pessimistas.

Os custos de propriedade são os valores pagos para aquisição do equipamento, acrescidos de fretes, seguros, impostos etc. Normalmente, são operações com financiamentos de longo prazo e com carência de pagamento. Também é necessário um conhecimento básico de depreciação. Os custos de operação envolvem os principais gastos para manutenção dos

equipamentos, incluindo diesel, mão de obra operacional, material rodante, ferramentas de perfuração do solo, periféricos, componentes reserva, serviços de reformas e assistência técnica etc. (ALI; REZA, 2013; AUSIMM, 2012).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Natureza e classificação da pesquisa

Este trabalho se classifica como uma pesquisa aplicada quanto à finalidade, englobando estudos, técnicas, e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a solução do problema.

Quanto aos campos da ciência é uma pesquisa interdisciplinar, uma vez que envolve várias áreas de conhecimento que interagem entre si para alcançar o resultado esperado com o trabalho.

Quanto aos objetivos é uma pesquisa explicativa, pois busca os fundamentos do dimensionamento de frotas de carregamento e transporte, bem como da composição e comparação de seus custos e resultados operacionais.

Quanto aos procedimentos classifica-se como pesquisa de revisão bibliográfica, a partir de materiais já publicados sobre o tema, e experimental, analisando a influência dos fatores de eficiência e produtividade nos resultados. Enquadra-se ainda como sendo de ação, uma vez que utiliza de metodologia de resolução de problema, investigação científica e desenvolvimento de ferramenta aplicada.

Quanto à abordagem classifica-se como uma pesquisa quantitativa, pois tem o objetivo de verificar uma hipótese a partir da coleta e tratativa de dados numéricos e análise estatística e computacional.

Com relação ao tipo de método empregado neste projeto, é o método hipotético-dedutivo, uma vez que busca desenvolver uma hipótese pré-estabelecida que será analisada e testada.

3.2 Procedimentos metodológicos

3.2.1 Análise do cenário inicial

O mapeamento inicial foi realizado envolvendo as áreas de planejamento e operação de minas a céu aberto de fosfato de cinco localidades, sendo:

- Araxá/MG;
- Cajati/SP;
- Catalão/GO;
- Patrocínio/MG;
- Tapira/MG;

Por meio de análise de rotina em campo, foi verificado como os trabalhos de dimensionamento de frotas, análise de performance dos equipamentos e comparativo de cenários eram realizados. Em seguida realizou-se o mapeamento dos principais pontos de melhoria que poderiam ser sanados no desenvolvimento do trabalho. Foram realizadas entrevistas com os responsáveis pela elaboração e análise dos estudos e com os clientes que recebem o produto destas análises, de modo que foram levantadas as principais demandas do processo.

Foram analisadas também as ferramentas utilizadas, quais funcionalidades eram essenciais, quais funcionalidades eram vistas como satisfatórias e quais eram apontadas como os principais entraves no desenvolvimento dos estudos. Foram mapeadas algumas dificuldades, seja por necessidade de licenças, concorrência ou falta de acesso, necessidade de recursos adicionais ou necessidade de treinamento específico por não serem intuitivas ou não fazer parte da rotina de uso dos responsáveis.

Essas análises contemplam os processos de levantamento dos dados necessários para elaboração dos estudos, elaboração dos cenários de dimensionamento de frotas e composição de custos destes cenários. São realizadas também análises comparativas dos resultados e do processo de acompanhamento dos resultados na rotina de operação.

Outro ponto mapeado foi o que havia de disponível no mercado ou em outros processos que pudesse contribuir para o atendimento das necessidades do trabalho.

A partir destes levantamentos foi possível concluir que, com uma ferramenta que unificasse as funcionalidades necessárias para a rotina e que facilitasse o acompanhamento dos resultados, seria possível atender a demanda do trabalho.

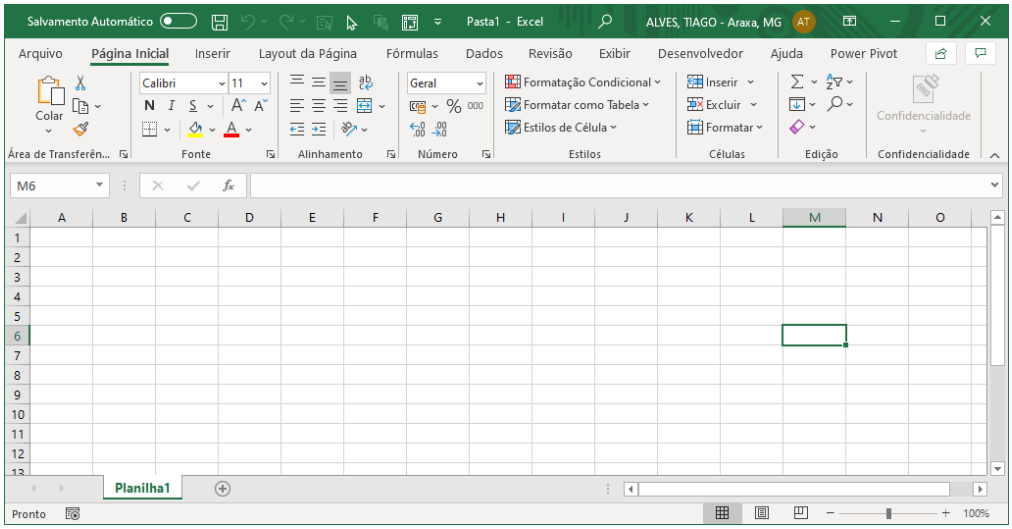
3.2.2 Definição da plataforma

Foi necessário definir uma plataforma para a ferramenta, de forma que a sua utilização fosse maximizada atendendo ao proposto pelo trabalho, e a definição pelo Microsoft Excel® se deu pelos seguintes motivos:

- Disponibilidade a todos os usuários necessários, pois a licença de uso do software faz parte do pacote básico de licenças que todo o público-alvo da ferramenta possui;
- Por ser um software muito utilizado em vários outros processos, a interface já é amigável a todo o público-alvo da ferramenta, tornando sua utilização intuitiva;
- Flexibilidade para implementar as funcionalidades necessárias, pois com a criação de macros e com o uso da linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*), já nativa no software, não há restrições para o desenvolvimento do trabalho;
- Acessibilidade do software no ambiente da empresa, por ser um software já homologado no cardápio de ferramentas disponível da empresa.

Outro fator que favorece o desenvolvimento da ferramenta com o uso da plataforma Microsoft Excel®, ilustrada na Figura 16, é o fato dela ser uma ferramenta amplamente utilizada no mercado em geral, favorecendo a ampliação da utilização da ferramenta em outros processos e outras empresas, contribuindo ainda mais com o objetivo do trabalho.

Figura 16 - Modelo de Planilha Excel



Fonte: Acervo do Próprio Autor

3.2.2.1 Segurança dos dados

O Microsoft Excel® oferece ferramentas para auxiliar na segurança das informações e integridade da funcionalidade. De modo a facilitar a utilização da ferramenta foi implementado bloqueio das fórmulas e das macros através de senha. No entanto, esse bloqueio e proteção visa apenas prevenir erros e direcionar a utilização da ferramenta de forma intuitiva, e não a proteção de informações sigilosas ou ocultação de informações.

A proteção dos dados e integridade da ferramenta deve ser realizada pelo usuário que estiver de posse de sua cópia. Repositórios de dados seguros, ambientes de rede corporativa e dispositivos de armazenamento protegidos são fundamentais para a guarda de dados sensíveis.

3.2.3 Definição dos Requisitos

Ao se realizar o mapeamento do cenário, antes da implantação da ferramenta, foram levantados requisitos quanto às entregas que já eram realizadas e precisavam ser mantidas.

Foram levantados também requisitos para novas funcionalidades com melhorias técnicas e aplicação de melhores práticas conhecidas ou mapeadas de outros processos, tornando os estudos mais robustos e embasados tecnicamente.

Foram levantados requisitos referentes a:

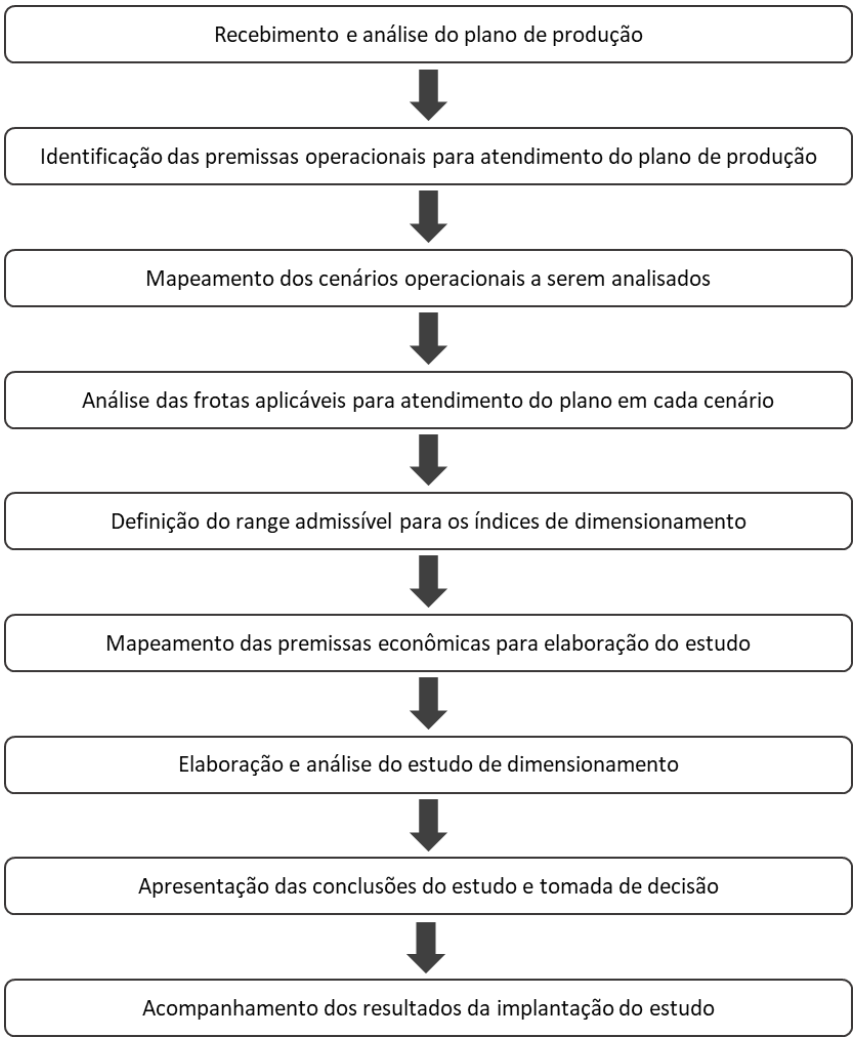
- Dados de entrada necessários para a elaboração dos estudos;
- Funcionalidades necessárias para desenvolvimento dos trabalhos;
- Integridade dos cálculos e fórmulas aplicadas;
- Validações internas de dados e cálculos;
- Indicadores de saída para a rotina operacional;
- Indicadores de saída para a análise de cenários comparativos.

3.2.3.1 Definição de fluxo padrão para elaboração dos estudos de dimensionamento

A elaboração de um fluxo que direcione de forma padronizada o processo de elaboração do dimensionamento é premissa fundamental para a definição de uma ferramenta que atenda esta tarefa.

A figura 17 demonstra um fluxo desenvolvido com esse objetivo.

Figura 17. Padronização para elaboração de estudo de dimensionamento de frotas



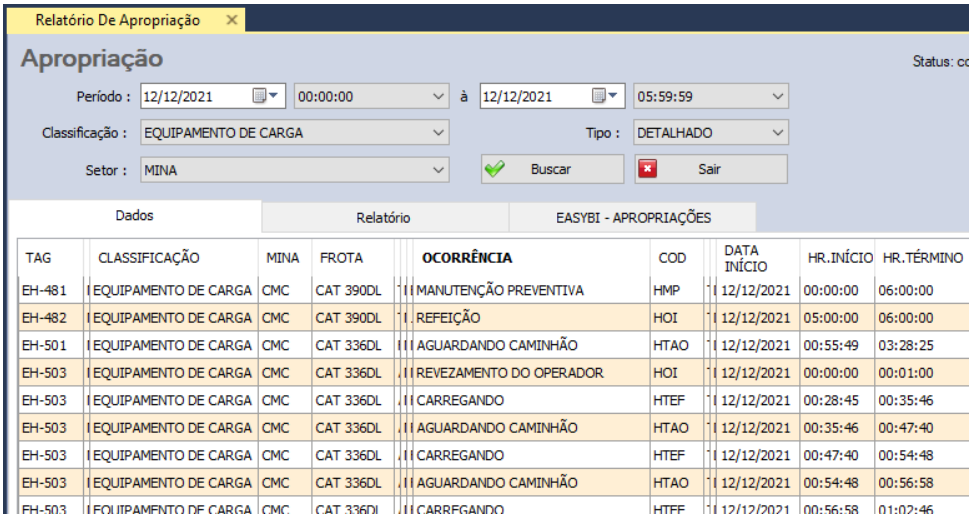
Fonte: Acervo do Próprio autor

3.2.3.2 Dados de entrada necessários para a elaboração dos estudos

Os dados de entrada são itens fundamentais para o bom resultado dos estudos a serem realizados. As minas analisadas contam atualmente com um sistema de gerenciamento de frota que registra um grande volume de dados sobre as ocorrências durante o processo de produção. Esses dados, com as devidas tratativas, podem servir de base para as informações de entrada necessárias para a elaboração dos estudos.

A Figura 18 ilustra o relatório de apropriações do sistema, que registra todas as apropriações de ocorrências apontadas pelos operadores ao longo das horas trabalhadas para os equipamentos.

Figura 18 - Exemplo de Relatório de Apropriações

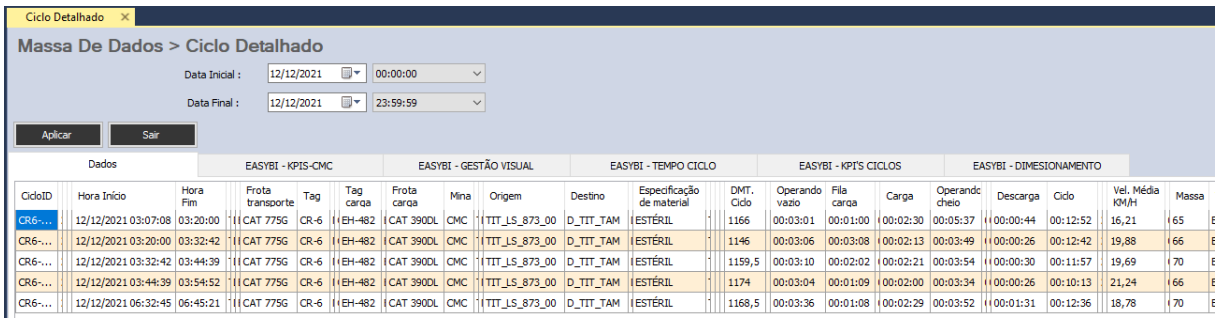


TAG	CLASSIFICAÇÃO	MINA	FROTA	OCORRÊNCIA	COD	DATA INÍCIO	HR.INÍCIO	HR.TÉRMINO
EH-481	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 390DL	MANUTENÇÃO PREVENTIVA	HMP	12/12/2021	00:00:00	06:00:00
EH-482	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 390DL	REFEIÇÃO	HOI	12/12/2021	05:00:00	06:00:00
EH-501	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	AGUARDANDO CAMINHÃO	HTAO	12/12/2021	00:55:49	03:28:25
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	REVEZAMENTO DO OPERADOR	HOI	12/12/2021	00:00:00	00:01:00
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	CARREGANDO	HTEF	12/12/2021	00:28:45	00:35:46
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	AGUARDANDO CAMINHÃO	HTAO	12/12/2021	00:35:46	00:47:40
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	CARREGANDO	HTEF	12/12/2021	00:47:40	00:54:48
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	AGUARDANDO CAMINHÃO	HTAO	12/12/2021	00:54:48	00:56:58
EH-503	EQUIPAMENTO DE CARGA	CMC	CAT 336DL	CARREGANDO	HTEF	12/12/2021	00:56:58	01:02:46

Fonte: Acervo do Próprio Autor

A Figura 19 ilustra o relatório de ciclo detalhado, que consolida os dados de todos os ciclos de transporte executados na operação das minas, detalhando seus intervalos de tempos e produtividade.

Figura 19 - Exemplo de Relatório de Ciclo Detalhado

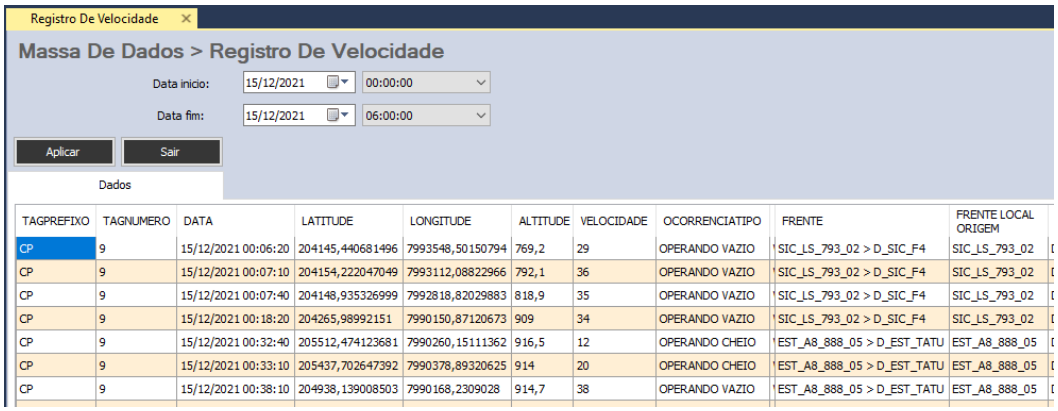


CicloID	Hora Início	Hora Fim	Frota transporte	Tag	Tag carga	Frota carga	Mina	Origem	Destino	Especificação de material	DMT. Ciclo	Operando vazio	Fila carga	Carga	Operandc cheio	Descarga	Ciclo	Vel. Média KM/H	Massa
CR6-...	12/12/2021 03:07:08	03:20:00	CAT 775G	CR-6	EH-482	CAT 390DL	CMC	TIT_LS_873_00	D_TIT_TAM	ESTÉRIL	1166	00:03:01	00:01:00	00:02:30	00:05:37	00:00:44	00:12:52	16,21	65
CR6-...	12/12/2021 03:20:00	03:32:42	CAT 775G	CR-6	EH-482	CAT 390DL	CMC	TIT_LS_873_00	D_TIT_TAM	ESTÉRIL	1146	00:03:06	00:03:08	00:02:13	00:03:49	00:00:26	00:12:42	19,88	66
CR6-...	12/12/2021 03:32:42	03:44:39	CAT 775G	CR-6	EH-482	CAT 390DL	CMC	TIT_LS_873_00	D_TIT_TAM	ESTÉRIL	1159,5	00:03:10	00:02:02	00:02:21	00:03:54	00:00:30	00:11:57	19,69	70
CR6-...	12/12/2021 03:44:39	03:54:52	CAT 775G	CR-6	EH-482	CAT 390DL	CMC	TIT_LS_873_00	D_TIT_TAM	ESTÉRIL	1174	00:03:04	00:01:09	00:02:00	00:03:34	00:00:26	00:10:13	21,24	66
CR6-...	12/12/2021 06:32:45	06:45:21	CAT 775G	CR-6	EH-482	CAT 390DL	CMC	TIT_LS_873_00	D_TIT_TAM	ESTÉRIL	1168,5	00:03:36	00:01:08	00:02:29	00:03:52	00:01:31	00:12:36	18,78	70

Fonte: Acervo do Próprio Autor

A Figura 20 ilustra o relatório de registro de velocidade, que registra a cada 10 segundos a localização dos equipamentos de transporte, sua carga, sua condição de operação cheio/vazio, seu operador, sua velocidade instantânea, entre outras informações.

Figura 20 - Exemplo de Relatório de Registro de Velocidades



TAGPREFIXO	TAGNUMERO	DATA	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	VELOCIDADE	OCORRENCIATIPO	FRENTE	FRENTE LOCAL ORIGEM
CP	9	15/12/2021 00:06:20	204145,440681496	7993548,50150794	769,2	29	OPERANDO VAZIO	SIC_LS_793_02 > D_SIC_F4	SIC_LS_793_02
CP	9	15/12/2021 00:07:10	204154,222047049	7993112,08822966	792,1	36	OPERANDO VAZIO	SIC_LS_793_02 > D_SIC_F4	SIC_LS_793_02
CP	9	15/12/2021 00:07:40	204148,935326999	7992818,82029883	818,9	35	OPERANDO VAZIO	SIC_LS_793_02 > D_SIC_F4	SIC_LS_793_02
CP	9	15/12/2021 00:18:20	204265,98992151	7990150,87120673	909	34	OPERANDO VAZIO	SIC_LS_793_02 > D_SIC_F4	SIC_LS_793_02
CP	9	15/12/2021 00:32:40	205512,474123681	7990260,15111362	916,5	12	OPERANDO CHEIO	EST_A8_888_05 > D_EST_TATU	EST_A8_888_05
CP	9	15/12/2021 00:33:10	205437,702647392	7990378,89320625	914	20	OPERANDO CHEIO	EST_A8_888_05 > D_EST_TATU	EST_A8_888_05
CP	9	15/12/2021 00:38:10	204938,139008503	7990168,2309028	914,7	38	OPERANDO VAZIO	EST_A8_888_05 > D_EST_TATU	EST_A8_888_05

Fonte: Acervo do Próprio Autor

São vários os relatórios disponíveis no sistema, no entanto esses são os principais para acompanhamento e análise dos indicadores que serão utilizados para o dimensionamento de frotas. Diariamente são gerados, nas cinco minas, aproximadamente 6.500 dados de ciclo, 60.000 linhas de apropriações de ocorrências e 600.000 registros de velocidade. É com a tratativa desta base de dados que podemos levantar os dados de entrada para um dimensionamento de frotas mais aderente à realidade operacional.

A análise dos dados para entrada na ferramenta deve estar sustentada em análise crítica dos históricos, de modo a se evitar informações enviesadas ou com histórico de ineficiência. Deve-se tomar o devido cuidado para realizar a tratativa dos dados considerando as particularidades de cada mina. Um mesmo indicador pode apresentar um determinado resultado em uma mina e ter uma realidade completamente diferente em outra, devido a diferenças nas condições operacionais, índices pluviométricos, horários de trabalho, porte dos equipamentos, entre outros. Cada operação de mina pode apresentar uma dinâmica diferente e exigir uma análise diferente, considerando inclusive as tendências de alteração do resultado atual ou histórico. Estas análises devem envolver tanto quanto possível as equipes operacionais que possuem as informações de rotina.

3.2.3.2 Indicadores de saída para a rotina operacional

Os indicadores de saída para a rotina operacional são os índices que serão utilizados como referência no acompanhamento da performance dos equipamentos ao longo da rotina de

operação da mina. Estes indicadores devem ser estratificados por frota e por de equipamentos de carregamento e transporte.

É através destes indicadores que será possível acompanhar, via sistema de gestão da operação de mina, se os equipamentos estão sendo utilizados conforme o planejado para cumprimentos dos planos de produção, sendo:

- Quantidade de Equipamentos;
- Utilização Física;
- Disponibilidade Física;
- Produtividade;
- Tempos Fixos;
- Carga Média;
- Velocidade Média;
- Distância Média de Transporte.

3.2.3.3 Indicadores de saída para análise de cenários

Os indicadores de saída para análise de cenários são indicadores de gastos e custos que servirão também para a elaboração dos orçamentos das operações de mina.

Além dos indicadores de gastos e custos, neste tópico é necessário também a entrega de base de dados para análise de sensibilidade dos resultados, simulação de cenários e análises estatísticas. É sabido que, por mais criteriosa que seja a análise e estimativa dos dados de performance das frotas, durante o processo produtivo ocorrem variações que podem comprometer os resultados esperados. Isso ocorre especialmente para estimativas de médio e longo prazo, o que gera uma incerteza nas análises. Os dados de saída para a realização das simulações e análises estatísticas têm por objetivo mensurar essa incerteza considerando, além dos valores absolutos para os dados de entrada, qual é o desvio padrão esperado e seu consequente impacto nos resultados da análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

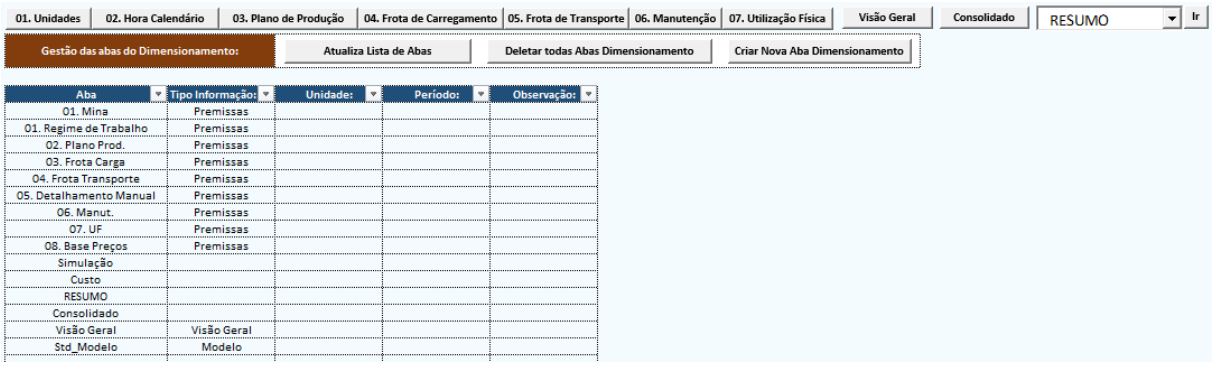
4.1 Ferramenta para dimensionamento

A funcionalidade de dimensionamento foi desenvolvida buscando agilizar e automatizar ao máximo as tarefas manuais e cálculo ao longo do processo de dimensionamento, buscando focar os esforços do responsável pelo dimensionamento nas ações de análise. Para tanto, a ferramenta para dimensionamento foi dividida em algumas partes, sendo:

- Dados de Entrada;
- Dimensionamento;
- Resultados.

A Figura 21 ilustra a tela de "Visão Geral", que tem um resumo da estrutura da ferramenta, com os comandos de navegação e o comando de "Criar Nova Aba de Dimensionamento" para o início da elaboração dos cenários de dimensionamento.

Figura 21 - Tela de Visão Geral



Fonte: Acervo do Próprio Autor

4.1.1 Dados de entrada

Para que seja automatizada a rotina de dimensionamento de frotas, são necessários alguns dados de referência para que se possa realizar os cálculos necessários. Todos os dados informados no cadastro da ferramenta são apenas referências de valores e podem ser alterados ao longo da elaboração do dimensionamento. Estes dados não necessitam ser alterados com

frequência na ferramenta, apenas se houver alguma atualização em função de revisão das análises que forneceram estes dados.

A seguir serão apresentadas algumas figuras que ilustram as telas da ferramenta, e todas elas contêm dados fictícios, de modo a não expor dados restritos das operações de mina em questão.

Uma informação importante é o cadastro das minas de onde serão informados os valores de referência, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Tela de Cadastro das Minas



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Outra informação é referente aos regimes de trabalho que estarão disponíveis para cálculo. Os campos de data inicial e final, bem como horas por dia e dias não úteis por período, sustentarão os cálculos de horas-calendário da frota. Além disso são incluídas as informações quanto à quantidade de turmas e absenteísmo, para cálculo de mão de obra operacional. A Figura 23 ilustra essa tela de cadastro.

Figura 23 - Tela de Cadastro dos Regimes de Trabalho



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Também são necessárias informações do plano de produção, onde serão informadas as massas e DMT planejadas, bem como a densidade empolada, que irá impactar nos tempos de carregamento. Os fatores de carga informados para os equipamentos irão impactar nos consumos e gastos com combustível. Os valores de referência de percentual de hora trabalhada não produtiva e atraso nos ciclos que são referentes à eficiência operacional. A eficiência operacional foi dividida nestes dois itens, pois é a forma que é apontada e controlada no sistema de gerenciamento de frota em operação nas minas. Todos estes dados podem ser informados no nível de detalhamento desejado, sendo uma linha para cada frente ou apenas uma linha com a movimentação total, ficando isso a critério do responsável pelo dimensionamento. A Figura 24 ilustra essa tela de cadastro.

Figura 24 - Tela de Cadastro dos dados do Plano de Produção

Plano de Produção														
Item	Frente	Período	Material	Massa	DMT	Densidade Empolada	Observação	Fator de Carga Transporte	HTNP de Transporte	Atraso no Ciclo de Transporte	Fator de Carga Carregamento	HTNP de Carga	Atraso no Ciclo de Carga
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													

Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os dados referentes à frota de carga para o cadastro de referência são:

- Modelo do equipamento;
- Vida útil que será utilizada para a estimativa de reposição e o valor de reposição;
- Tipo de diesel que será utilizado para buscar o valor unitário do diesel;
- Consumos baixo, médio e alto, conforme o fator carga. Este dado será utilizado para estimar o consumo de diesel do equipamento em litros por hora trabalhada.
- Valor anual do operador;

- Incremento de DF que será utilizado no cálculo da quantidade de operadores, de modo a absorver flutuações da média de DF realizada;
- Quantidade, modelo e vida útil dos pneus;
- Volume da concha, percentual de enchimento e tempo de passe que serão utilizados para cálculo do tempo de carregamento.

A Figura 25 ilustra a tela de cadastro das frotas de carregamento.

Figura 25 - Tela de Cadastro dos Dados das Frotas de Carregamento



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os dados referentes à frota de transporte para o cadastro de referência são:

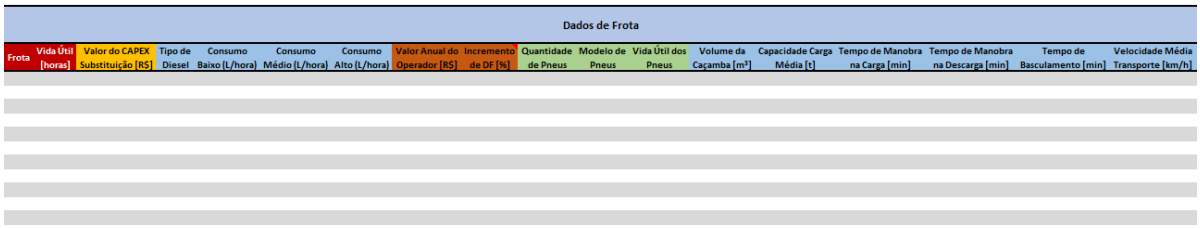
- Modelo do equipamento;
- Vida útil, que será utilizada para a estimativa de reposição, e o valor de reposição;
- Tipo de diesel que será utilizado, para buscar o valor unitário do diesel;
- Consumos baixo, médio e alto, conforme o fator carga. Este dado será utilizado para estimar o consumo de diesel do equipamento em litros por hora trabalhada.
- Valor anual do operador;
- Incremento de DF que será utilizado no cálculo da quantidade de operadores, de modo a absorver flutuações da média de DF realizada;
- Quantidade, modelo e vida útil dos pneus;
- Volume da caçamba e capacidade de carga, que serão utilizados para cálculo do tempo de carregamento;
- Tempos de manobras e tempo de basculamento que comporão o tempo fixo;

- Velocidade Média que, em conjunto com a DMT, será base do cálculo do tempo variável e da produtividade.

Nos parâmetros de referência para a frota de transporte não existe campo para inserção dos tempos de fila na carga e descarga. Foi implementada na ferramenta uma lógica para que, no dimensionamento automático, estes tempos sejam propostos como a metade dos tempos de carregamento e basculamento respectivamente, podendo ser ajustados manualmente assim como os demais itens.

A Figura 26 ilustra a tela de cadastro das frotas de transporte.

Figura 26 - Tela de Cadastro dos dados das Frotas de Transporte



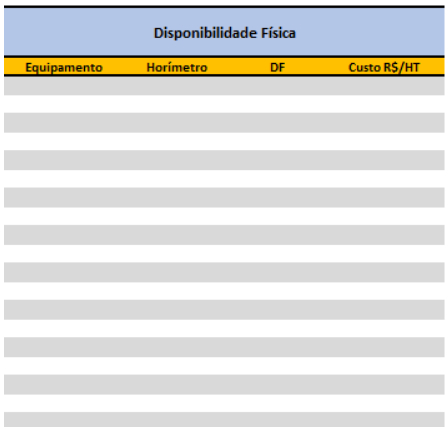
Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os dados referentes à manutenção são:

- Modelo do equipamento;
- O campo horímetro deve representar a faixa de vida do equipamento. Quando se informa um horímetro, este representa que os dados informados são aplicados ao equipamento até aquele valor de horímetro. Por exemplo, a disponibilidade física e custo de manutenção informados serão aplicáveis ao equipamento até aquele valor de horímetro;
- A DF é a disponibilidade física aplicável à faixa de horímetro;
- O custo é o valor de manutenção aplicável por hora trabalhada do equipamento. Este valor deve contemplar materiais, serviços e mão de obra de manutenção.

A Figura 27 ilustra a tela de cadastro dos dados de manutenção.

Figura 27 - Tela de Cadastro dos dados de Manutenção das Frotas



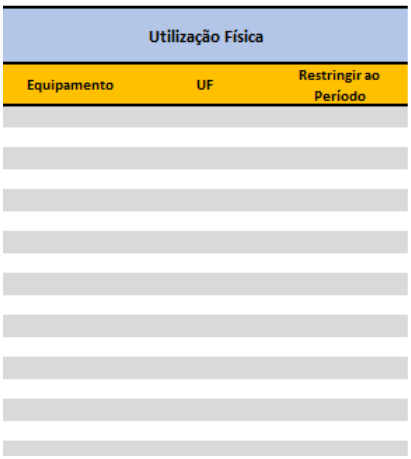
Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os dados referentes à utilização física são:

- Modelo do equipamento;
- O campo UF, representa a utilização física da frota;
- O campo “restringir ao período” tem a finalidade de definir se a utilização informada é restrita a algum período específico, ou se servirá de referência para qualquer período, caso esteja em branco. Lembrando que o período deve ser o mesmo cadastrado nos dados do plano de produção.

A Figura 28ilustra a tela de cadastro dos dados de manutenção.

Figura 28 - Tela de Cadastro dos dados de Utilização Física da Frota

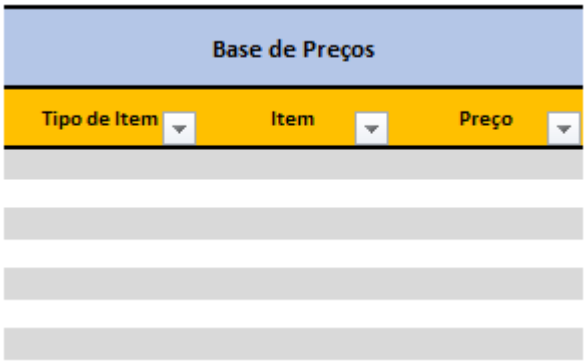


Fonte: Acervo do Próprio Autor

Os dados para a base de preço dos itens informados são necessários para compor os gastos com itens como pneus (por modelo de pneu) e diesel (por tipo de diesel).

A Figura 29 ilustra a tela de cadastro dos dados de manutenção.

Figura 29 - Tela de Cadastro das Informações de Preço dos Itens



Fonte: Acervo do Próprio Autor

O ideal é que estes cadastros sejam realizados englobando todas as frotas que tenham aplicabilidade nos processos da área, sendo necessárias apenas atualizações desses dados caso se faça necessário.

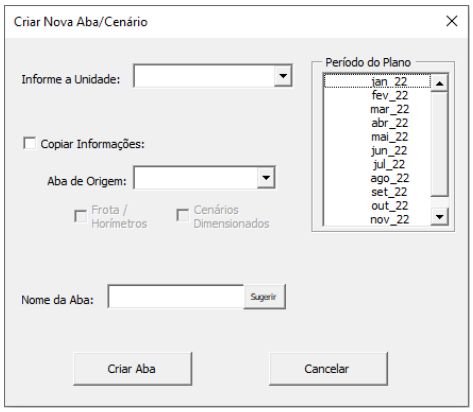
Estes dados cadastrais não são obrigatórios, sendo possível dar andamento na elaboração de dimensionamento sem informar os mesmos, porém não será possível a realização do dimensionamento de forma automática.

4.1.2 Dimensionamento

O dimensionamento será realizado por período, seja o período informado no plano ou algum período a ser definido pelo usuário, e para cada período será alocada uma aba individual da ferramenta de dimensionamento.

Ao se clicar no comando para criar uma aba de dimensionamento, presente na aba de “Visão Geral”, é exibida uma tela para seleção dos dados de período e plano, conforme Figura 30, para que as informações previamente cadastradas sejam utilizadas automaticamente. Caso não seja selecionada nenhuma informação, será carregada uma aba de dimensionamento em branco para inserção manual dos dados.

Figura 30 - Tela de Seleção dos dados para Dimensionamento

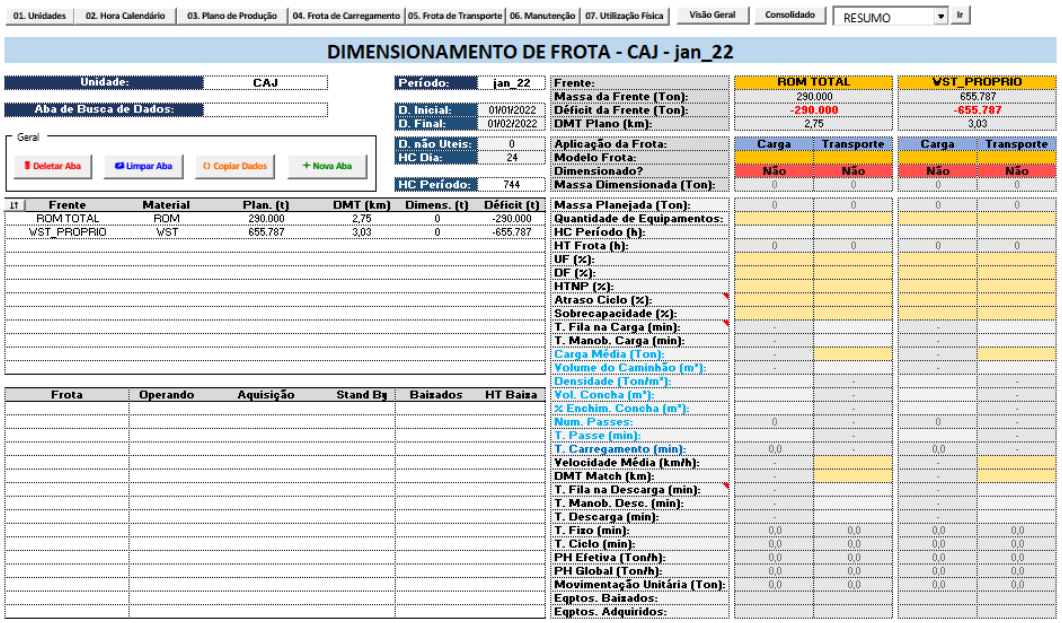


Fonte: Acervo do Próprio Autor

Para utilização das funcionalidades automáticas, na criação do primeiro cenário é necessário selecionar as informações de unidade, período do plano, e clicar em sugerir nome da aba (pode-se preencher ou alterar manualmente o nome sugerido pela ferramenta para a aba). Feito isso, clica-se em criar aba.

Será exibida uma tela com as informações iniciais de horas calendário e plano de produção cadastrados para o período, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Tela de Dimensionamento



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Para a utilização da funcionalidade de baixa e reposição automática de equipamentos ao final da vida útil, é necessário informar a lista da frota atual, com o horímetro. Caso se deseje que sejam inseridos equipamentos novos, basta não informar equipamento conforme Figura 32.

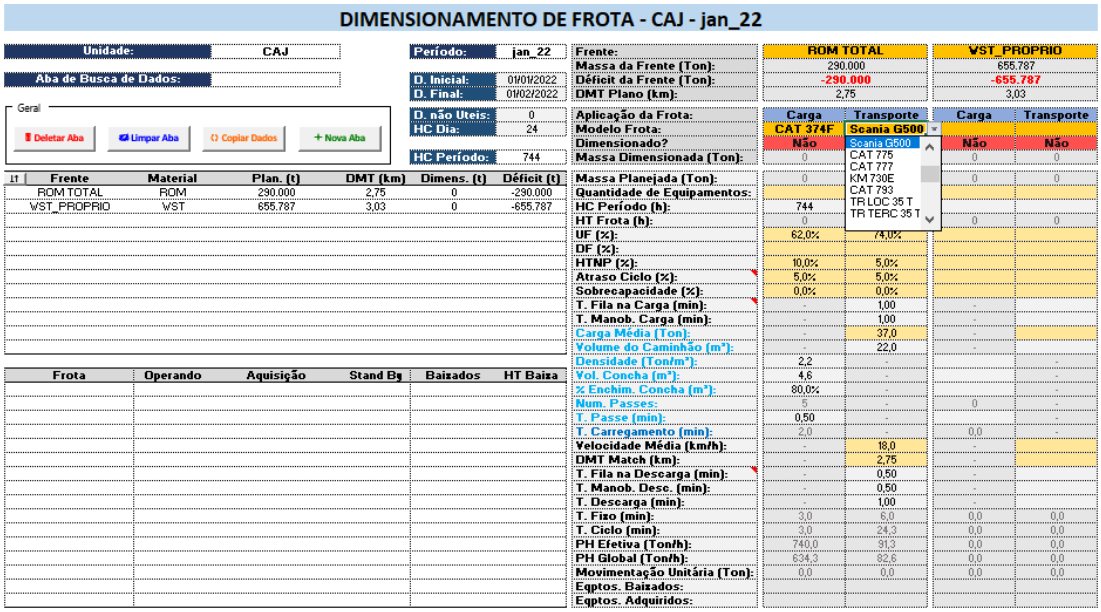
Figura 32 - Tela de Cadastro da Frota Atual



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Ao selecionar as frotas de carregamento e transporte nos respectivos campos conforme ilustrado na Figura 33, os dados de que comporão o cálculo de produtividade e a utilização física serão preenchidos conforme cadastros já realizados previamente.

Figura 33 - Seleção das Frotas para Dimensionamento



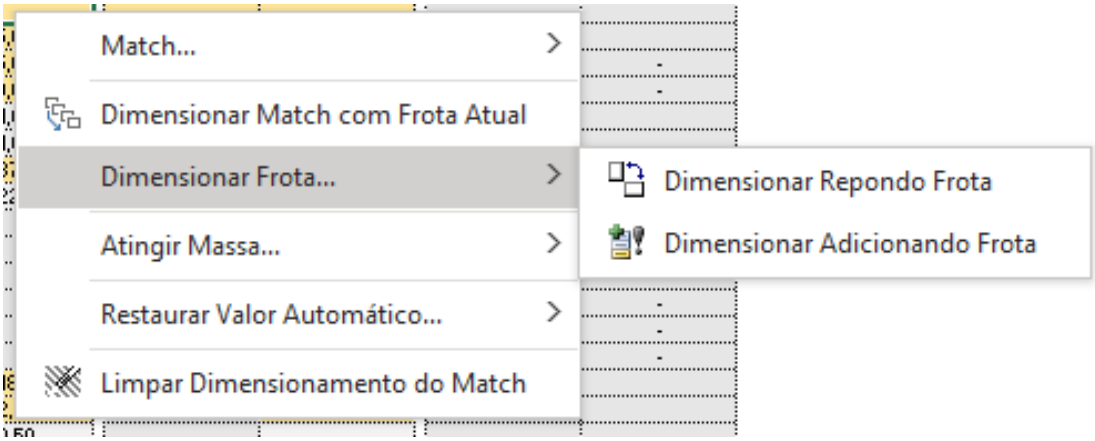
Fonte: Acervo do Próprio Autor

Será criado um par de equipamentos de carregamento e transporte disponível para cada frente cadastrada na aba “Plano de produção” para o período selecionado. O dimensionamento deverá ser realizado para cada par de equipamentos.

Selecionados os equipamentos de carregamento e transporte, tem-se a opção de informar uma disponibilidade manual para cada frota, ou solicitar um dimensionamento automático para a lista de equipamentos já preenchida ou os novos equipamentos a serem adicionados automaticamente.

Para se realizar o dimensionamento, deve-se clicar com o botão direito do mouse nos campos em cor amarela, e será exibida uma tela com opções conforme ilustrado na Figura34.

Figura 34 - Comandos do Dimensionamento

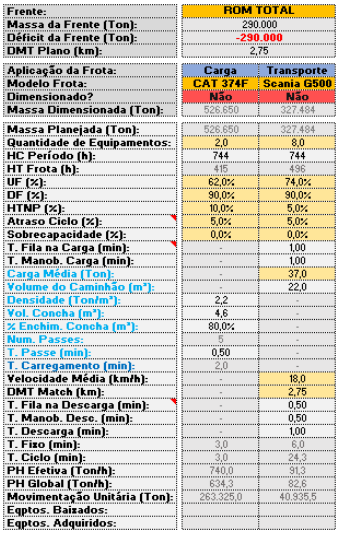


Fonte: Acervo do Próprio Autor

Caso tenha sido informada a frota disponível na unidade, deve-se selecionar a opção “Dimensionar *Match* com Frota Atual”. Caso não sido informada e deseje que a ferramenta insira equipamentos novos conforme a necessidade, deve-se selecionar “Dimensionar Adicionando Frota”. Caso já existam equipamentos que estejam próximo do final de sua vida útil, pode-se selecionar “Dimensionar Repondo Frota”.

Ao se clicar para a realização do dimensionamento, a ferramenta irá adicionar massa a cada equipamento, registrando individualmente seus itens de produtividade e hora trabalhada em lista até que a massa planejada seja cumprida, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Exemplo de Dimensionamento Preenchido

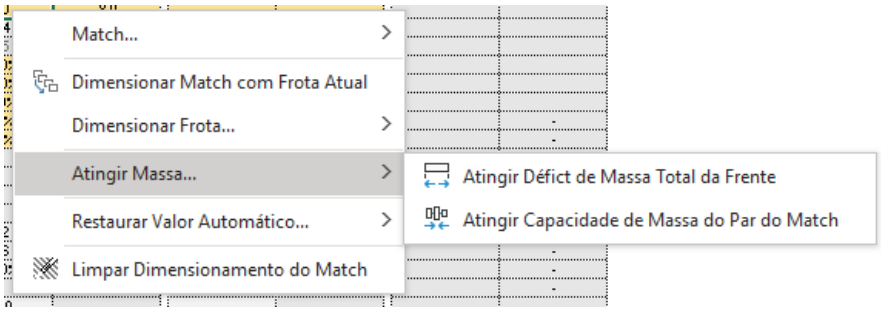


Frente:	ROM TOTAL	
Massa da Frente (Ton):	290.000	
Déficit da Frente (Ton):	-290.000	
DMT Plano (km):	2,75	
Aplicação da Frota:	Carga	Transporte
Modelo Frota:	CAT 374F	Scania G500
Dimensionado?	Não	Não
Massa Dimensionada (Ton):	526.650	327.484
Massa Planejada (Ton):	526.650	327.484
Quantidade de Equipamentos:	2,0	8,0
HC Período (h):	744	744
HT Frota (h):	415	496
UF (%):	62,0%	74,0%
DF (%):	90,0%	90,0%
HTNP (%):	10,0%	5,0%
Atraso Ciclo (%):	5,0%	5,0%
Sobrecapacidade (%):	0,0%	0,0%
T. Fila na Carga (min):	-	1,00
T. Manob. Carga (min):	-	1,00
Carga Média (Ton):	-	37,0
Volume do Caminhão (m³):	-	22,0
Densidade (Ton/m³):	2,2	-
Vol. Concha (m³):	4,6	-
% Enchim. Concha (m³):	80,0%	-
Num. Passes:	5	-
T. Passe (min):	0,50	-
T. Carregamento (min):	2,0	-
Velocidade Média (km/h):	-	18,0
DMT Match (km):	-	2,75
T. Fila na Descarga (min):	-	0,50
T. Manob. Desc. (min):	-	0,50
T. Descarga (min):	-	1,00
T. Fixo (min):	3,0	6,0
T. Ciclo (min):	3,0	24,0
PH Efetiva (Ton/h):	740,0	91,0
PH Global (Ton/h):	634,3	82,6
Movimentação Unitária (Ton):	263.325,0	40.935,5
Eqptos. Baixados:		
Eqptos. Adquiridos:		

Fonte: Acervo do Próprio Autor

No exemplo acima, pode-se observar que as massas ficaram acima da massa planejada, pois é premissa da planilha não sugerir no modo automático quantidades fracionadas de equipamento. O objetivo é demonstrar a capacidade da frota conforme a quantidade de equipamentos que precisará ser alocada naquela atividade. Foi criada uma funcionalidade para ajustar os índices buscando o exato cumprimento da massa planejada, ou da capacidade do equipamento par, seja carregamento ou transporte. Ao se clicar com o botão direito do mouse em qualquer campo em amarelo, é exibido o menu com as opções de “Atingir Déficit de Massa Total da Frente” e “Atingir Capacidade de Massa do Par do Match” conforme ilustrado na Figura 36. Estes comandos definem como meta a massa da frente ou a capacidade do equipamento par, e ajustam o parâmetro selecionado para atingir essa meta.

Figura 36 - Comandos para Ajuste do Dimensionamento



Fonte: Acervo do Próprio Autor

É possível também fazer o ajuste manual de qualquer índice, de modo a utilizar parâmetros mais adequados para o cenário, e caso seja um parâmetro que ocasione alteração nos índices da outra frota do par de equipamentos, ele será ajustado também. Por exemplo, se for alterado o valor da carga média do caminhão ou do volume de sua caçamba, o valor do tempo de carregamento será recalculado e ajustado conforme necessário.

Ao se realizar o ajuste dos índices de modo a atingir a movimentação da frente de produção conforme selecionado, e selecionar o comando para realizar o dimensionamento, os campos da linha selecionada são preenchidos com “Sim” com fundo verde. Isso indica que aquela parte do dimensionamento foi concluída, conforme ilustrado na Figura 37.

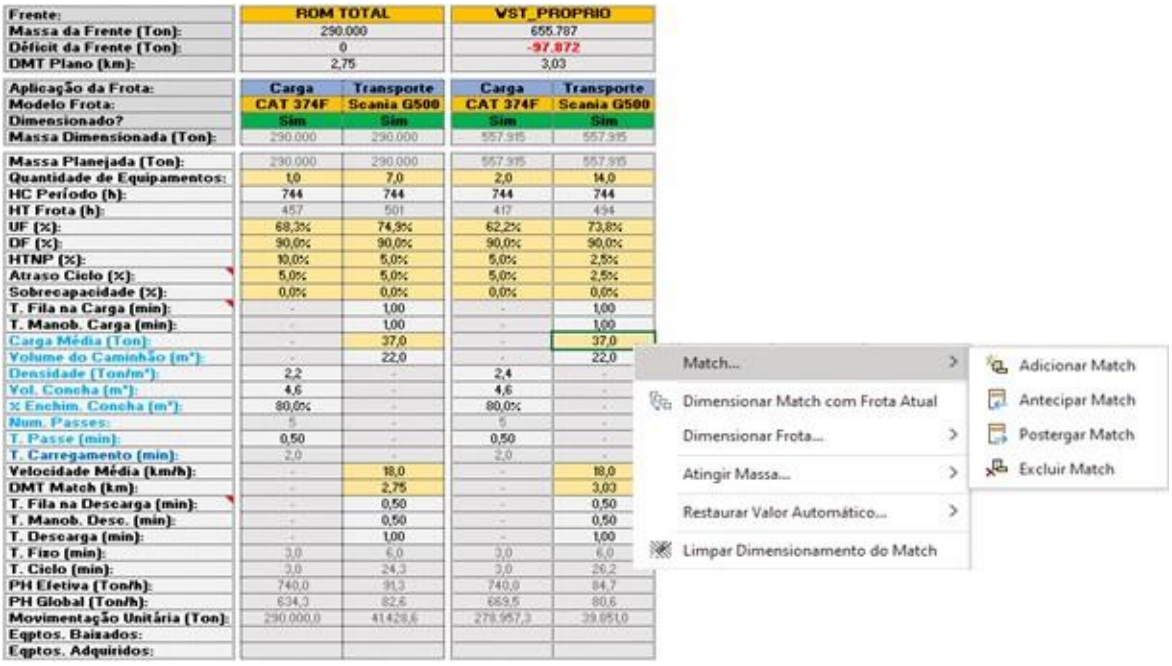
Figura 37 - Dimensionamento de Frente Concluído

Frente:	ROM TOTAL		VST_PROPRIO	
Massa da Frente (Ton):	290.000		655.787	
Déficit da Frente (Ton):	0		-655.787	
DMT Plano (km):	2,75		3,03	
Aplicação da Frota:	Carga	Transporte	Carga	Transporte
Modelo Frota:	CAT 374F	Scania G500		
Dimensionado?	Sim	Sim	Não	Não
Massa Dimensionada (Ton):	290.000	290.000	0	0
Massa Planejada (Ton):	290.000	290.000	0	0
Quantidade de Equipamentos:	1,0	7,0		
HC Período (h):	744	744		
HT Frota (h):	457	501	0	0
UF (%):	68,3%	74,9%		
DF (%):	90,0%	90,0%		
HTMP (%):	10,0%	5,0%		
Atraso Ciclo (%):	5,0%	5,0%		
Sobrecapacidade (%):	0,0%	0,0%		
T. Fila na Carga (min):	-	1,00	-	
T. Manob. Carga (min):	-	1,00	-	
Carga Média (Ton):	-	37,0	-	
Volume do Caminhão (m³):	-	22,0	-	
Densidade (Ton/m³):	2,2	-		-
Vol. Concha (m³):	4,6	-		-
% Enchim. Concha (m³):	80,0%	-		-
Num. Passes:	5	-	0	-
T. Passe (min):	0,50	-		-
T. Carregamento (min):	2,0	-	0,0	-
Velocidade Média (km/h):	-	18,0	-	
DMT Match (km):	-	2,75	-	
T. Fila na Descarga (min):	-	0,50	-	
T. Manob. Desc. (min):	-	0,50	-	
T. Descarga (min):	-	1,00	-	
T. Fixo (min):	3,0	6,0	0,0	0,0
T. Ciclo (min):	3,0	24,3	0,0	0,0
PH Efetiva (Ton/h):	740,0	91,3	0,0	0,0
PH Global (Ton/h):	634,3	82,6	0,0	0,0
Movimentação Unitária (Ton):	290.000,0	41.428,6	0,0	0,0
Eqptos. Baixados:				
Eqptos. Adquiridos:				

Fonte: Acervo do Próprio Autor

Existe a possibilidade de, se necessário, executar o dimensionamento da mesma frente com pares de equipamentos diferentes. Neste caso, deve-se realizar o dimensionamento normalmente com a quantidade e índices que se tem disponível para o primeiro par de equipamentos e na sequência deve-se solicitar um novo cenário da mesma frente para incluir o novo par de equipamentos, clicando em “Adicionar Match” conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Complemento de *Match* de Equipamentos para uma Frente

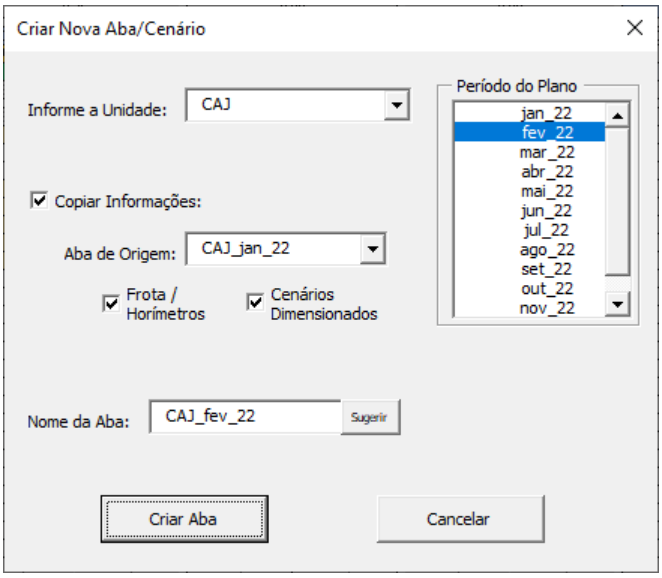


Frente:	ROM TOTAL		VST_PROPRIO	
Massa da Frente (Ton):	290.000		655.787	
Déficit da Frente (Ton):	0		-97.872	
DMT Plano (km):	2,75		3,03	
Aplicação da Frota:	Carga	Transporte	Carga	Transporte
Modelo Frota:	CAT 374F	Scania G500	CAT 374F	Scania G500
Dimensionado?	Sim	Sim	Sim	Sim
Massa Dimensionada (Ton):	290.000	290.000	557.935	557.935
Massa Planejada (Ton):	290.000	290.000	557.935	557.935
Quantidade de Equipamentos:	1,0	7,0	2,0	14,0
HC Período (h):	744	744	744	744
HT Frota (h):	457	501	417	494
UF (%):	68,3%	74,9%	62,2%	73,8%
DF (%):	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
HTNP (%):	10,0%	5,0%	5,0%	2,5%
Atraso Ciclo (%):	5,0%	5,0%	5,0%	2,5%
Sobrecapacidade (%):	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
T. Fila na Carga (min):	-	1,00	-	1,00
T. Manob. Carga (min):	-	1,00	-	1,00
Carga Média (Ton):	-	37,0	-	37,0
Volume do Caminhão (m³):	-	22,0	-	22,0
Densidade (Ton/m³):	2,2	-	2,4	-
Vol. Concha (m³):	4,6	-	4,6	-
% Enchim. Concha (m³):	80,0%	-	80,0%	-
Num. Passes:	5	-	5	-
T. Passe (min):	0,50	-	0,50	-
T. Carregamento (min):	2,0	-	2,0	-
Velocidade Média (km/h):	-	18,0	-	18,0
DMT Match (km):	-	2,75	-	3,03
T. Fila na Descarga (min):	-	0,50	-	0,50
T. Manob. Desc. (min):	-	0,50	-	0,50
T. Descarga (min):	-	1,00	-	1,00
T. Fixo (min):	3,0	6,0	3,0	6,0
T. Ciclo (min):	3,0	24,3	3,0	26,2
PH Efetiva (Ton/h):	740,0	91,3	740,0	84,7
PH Global (Ton/h):	634,3	82,6	669,5	80,6
Movimentação Unitária (Ton):	290.000,0	41428,6	278.957,3	39.851,0
Eqptos. Baixados:				
Eqptos. Adquiridos:				

Fonte: Acervo do Próprio Autor

A partir da elaboração do primeiro período do dimensionamento, ao se clicar no botão de solicitação de nova aba para o período seguinte, as informações para a nova aba já vêm previamente preenchidas na janela de solicitação. Pode-se alterar algo conforme necessário ou clicar em “Criar Aba” para prosseguir conforme ilustrado na Figura 39. O campo de “Período do Plano” já traz selecionado o período posterior ao último que foi criado. Também já vem preenchida qual a aba do período anterior, para que se replique automaticamente a frota com os horímetros atualizados, conforme horas trabalhadas anteriormente. Há ainda a opção de se buscar os cenários de par de equipamentos utilizados no período anterior, automatizando ainda mais a composição do cenário de dimensionamento.

Figura 39 - Tela Preenchida para Criação de novo Período para o Dimensionamento



Fonte: Acervo do Próprio Autor

A cada dimensionamento realizado, os índices definidos para a frota alocada na frente dimensionada são replicados individualmente nos equipamentos disponíveis, formando assim uma lista que irá compor o banco de dados do cenário. Esse banco de dados será utilizado posteriormente para o cálculo dos custos e consolidação dos indicadores de saída. As informações registradas para cada equipamento são:

- Identificação do par de equipamentos;
- Material;
- Frente;
- Modelo;
- TAG;
- Horímetro Inicial e Final;
- CAPEX;
- Status do Equipamento;
- Entrada Forçada;
- Saída Forçada;
- Baixa Forçada;
- Data de Entrada;

- Data de Saída;
- Utilização e Disponibilidade Física;
- Estratificação de horas (HC, HM, HD, HO, HTI, HTP, HT);
- Volume do Caminhão e Capacidade de Massa;
- Distância Média de Transporte;
- Percentual Hora trabalhada não produtiva e de Atraso no Ciclo;
- Tempo de Fila na Carga e na Descarga;
- Tempo de Manobra na Carga e na Descarga;
- Carga Média
- Densidade;
- Volume da Concha e Percentual Enchimento;
- Número de Passes e Tempo de Passe;
- Tempo de Carregamento;
- Velocidade Média;
- Tempo de Descarga;
- Tempo Fixo Total;
- Tempo de Ciclo Total;
- Produtividade Efetiva;
- Produtividade Global;
- Movimentação.

4.2 Consolidação dos dados

Foi implementada uma funcionalidade de consolidação de dados, que reúne todas as informações de cada aba de dimensionamento em um único banco de dados. Durante a consolidação dos dados é realizado o cálculo dos custos relacionados aos cenários, conforme parâmetros informados no cadastro das frotas.

Os gastos referentes ao CAPEX, para aquisição e reposição de frotas, são estimados com base na quantidade de equipamentos inseridos ao longo do dimensionamento dos períodos. Para cada equipamento adicionado é atribuído um gasto com base no valor de um equipamento novo informado na aba de cadastro do equipamento.

Os gastos de pneus e diesel são estimados com base na quantidade de horas trabalhadas de cada frota, atribuídas ao longo do dimensionamento dos períodos, e no consumo unitário definido no cadastro dos equipamentos. Multiplicando-se a quantidade de horas pelo consumo unitário destes itens temos a quantidade total, que é multiplicada pelo valor unitário também previamente cadastrado, obtendo-se assim o gasto total.

Os gastos com manutenção são estimados com base no custo unitário por hora trabalhada dos equipamentos, que é informado no cadastro da frota estratificado por faixa de vida do equipamento. Exemplificando, é possível informar que determinado equipamento tem um determinado custo horário de manutenção de 0 a 3.000 horas, outro de 3.001 a 6.000, e assim por diante até o final da vida. Estes valores e faixas de horas trabalhadas são definidos preferencialmente em estudos realizados em conjunto com a equipe de manutenção, contemplando todas as despesas de manutenção da frota. Como ao longo do dimensionamento dos períodos temos o horímetro estimado dos equipamentos e a quantidade de horas que eles trabalham, basta multiplicar pelo valor horário de manutenção para obtermos o gasto estimado da frota.

Caso seja um cenário com frota locada, onde não temos gastos com manutenção, podemos substituir o valor horário de manutenção pelo valor horário de locação. Neste caso é necessário informar também eventuais valores de mobilização/desmobilização, e observar valores mínimos ou fixos de acordo com as negociações contratuais.

Os gastos com equipe de operação são realizados com base na quantidade de equipamentos dimensionados para cada período e sua disponibilidade física estimada. De modo a absorver flutuações de disponibilidade física, o responsável do dimensionamento tem a possibilidade de informar um percentual adicional na disponibilidade para incrementar a capacidade operacional. Esse aumento muitas vezes se faz necessário, pois a disponibilidade é uma média de equipamentos disponíveis. Caso a quantidade de operadores esteja dimensionada para a média de disponibilidade, em períodos de disponibilidade abaixo da média a capacidade de produção fica reduzida por falta de equipamentos, e em períodos de disponibilidade acima da média não conseguiremos recuperar a produção, pois não haverá operadores disponíveis. Esse percentual adicional deve ser estimado com base na confiabilidade que a manutenção determinar para a frota. Outros fatores para o cálculo da quantidade de operadores são o

absenteísmo esperado para a operação e a quantidade de turmas, que depende do regime de trabalho adotado. De posse do cálculo da quantidade de operadores e do valor estimado de desembolso por operador para o período analisado, é possível calcular o gasto com a equipe de operação. Gastos com equipes de apoio e administrativos devem ser incluídos à parte.

Há também a flexibilidade de inserir outros cenários de gastos como contratos tarifados por movimentação realizada, seja por massa ou volume. Nestes casos, os fatores determinantes para os gastos são os parâmetros do plano de produção como massa, volume, distância de transporte, densidade, etc. Para esses cenários é possível realizar o cálculo do diesel, se necessário, e estimar os valores para a movimentação com base nas tarifas contratuais.

Com essa base de dados consolidada é possível customizar diversos relatórios para realizar as análises necessárias para a tomada de decisão.

4.3 Análise de sensibilidade

Com base nos resultados obtidos na consolidação dos gastos de cada cenário, é possível calcular o respectivo custo unitário. O custo unitário pode ser decomposto detalhadamente em todas as parcelas que o compõe. A partir da decomposição do custo é possível realizar a análise de sensibilidade, considerando a variação de valores em dois fatores simultaneamente. A seleção dos fatores que irão sofrer variação pode variar em cada estudo, e devem ocorrer conforme o contexto da análise.

A ferramenta foi desenvolvida de modo que as variações possam ser realizadas para análise em um único cenário ou para comparação de dois cenários. Para variações em um único cenário é possível realizar a variação de dois fatores e observar o impacto no resultado deste cenário. Para análise em dois cenários simultaneamente, o objetivo é avaliar como a variação em um fator de cada cenário irá interferir na diferença de resultado entre os cenários.

A Tabela V apresenta uma análise de sensibilidade da diferença de custo unitário de minério a partir da variação dos gastos de manutenção em dois cenários. Os cabeçalhos de linha e coluna mostram a variação percentual aplicada no gasto de manutenção em cada cenário. A variação do cenário 01 está representada pelos valores dos cabeçalhos de linha, e do cenário 02 nos cabeçalhos de coluna. Neste exemplo o resultado se dá pela diferença entre o custo do cenário 01 e o custo do cenário 02. Sendo que, valores negativos (em vermelho) favorecem o

cenário 01 e valores positivos (em azul) favorecem o cenário 02. Sendo assim, os valores da parte superior direita são mais favoráveis ao cenário 02. Isso ocorre porque é aplicada uma redução de 50% no seu gasto de manutenção e o valor de manutenção do cenário 02 recebe um acréscimo de 50%. Na região inferior esquerda da tabela ocorre o contrário, sendo mais favorável ao cenário 01.

Tabela V. Exemplo de Tabela de Análise de Sensibilidade de Custo Unitário

	-50%	-45%	-40%	-35%	-30%	-25%	-20%	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
-50%	0.56	0.64	0.73	0.81	0.89	0.98	1.06	1.15	1.23	1.32	1.40	1.49	1.57	1.66	1.74	1.83	1.91	1.99	2.08	2.16	2.25
-45%	0.40	0.49	0.57	0.66	0.74	0.83	0.91	0.99	1.08	1.16	1.25	1.33	1.42	1.50	1.59	1.67	1.76	1.84	1.93	2.01	2.09
-40%	0.25	0.33	0.42	0.50	0.59	0.67	0.76	0.84	0.93	1.01	1.09	1.18	1.26	1.35	1.43	1.52	1.60	1.69	1.77	1.86	1.94
-35%	0.09	0.18	0.26	0.35	0.43	0.52	0.60	0.69	0.77	0.86	0.94	1.02	1.11	1.19	1.28	1.36	1.45	1.53	1.62	1.70	1.79
-30%	-0.06	0.03	0.11	0.19	0.28	0.36	0.45	0.53	0.62	0.70	0.79	0.87	0.96	1.04	1.12	1.21	1.29	1.38	1.46	1.55	1.63
-25%	-0.21	-0.13	-0.04	0.04	0.12	0.21	0.29	0.38	0.46	0.55	0.63	0.72	0.80	0.89	0.97	1.06	1.14	1.22	1.31	1.39	1.48
-20%	-0.37	-0.28	-0.20	-0.11	-0.03	0.06	0.14	0.22	0.31	0.39	0.48	0.56	0.65	0.73	0.82	0.90	0.99	1.07	1.15	1.24	1.32
-15%	-0.52	-0.44	-0.35	-0.27	-0.18	-0.10	-0.01	0.07	0.16	0.24	0.32	0.41	0.49	0.58	0.66	0.75	0.83	0.92	1.00	1.09	1.17
-10%	-0.68	-0.59	-0.51	-0.42	-0.34	-0.25	-0.17	-0.08	0.00	0.09	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.85	0.93	1.02
-5%	-0.83	-0.75	-0.66	-0.58	-0.49	-0.41	-0.32	-0.24	-0.15	-0.07	0.02	0.10	0.19	0.27	0.35	0.44	0.52	0.61	0.69	0.78	0.86
0%	-0.98	-0.90	-0.81	-0.73	-0.65	-0.56	-0.48	-0.39	-0.31	-0.22	-0.14	-0.05	0.03	0.12	0.20	0.28	0.37	0.45	0.54	0.62	0.71
5%	-1.14	-1.05	-0.97	-0.88	-0.80	-0.71	-0.63	-0.55	-0.46	-0.38	-0.29	-0.21	-0.12	-0.04	0.05	0.13	0.22	0.30	0.38	0.47	0.55
10%	-1.29	-1.21	-1.12	-1.04	-0.95	-0.87	-0.78	-0.70	-0.62	-0.53	-0.45	-0.36	-0.28	-0.19	-0.11	-0.02	0.06	0.15	0.23	0.32	0.40
15%	-1.45	-1.36	-1.28	-1.19	-1.11	-1.02	-0.94	-0.85	-0.77	-0.68	-0.60	-0.52	-0.43	-0.35	-0.26	-0.18	-0.09	-0.01	0.08	0.16	0.25
20%	-1.60	-1.52	-1.43	-1.35	-1.26	-1.18	-1.09	-1.01	-0.92	-0.84	-0.75	-0.67	-0.58	-0.50	-0.42	-0.33	-0.25	-0.16	-0.08	0.01	0.09
25%	-1.75	-1.67	-1.58	-1.50	-1.42	-1.33	-1.25	-1.16	-1.08	-0.99	-0.91	-0.82	-0.74	-0.65	-0.57	-0.49	-0.40	-0.32	-0.23	-0.15	-0.06
30%	-1.91	-1.82	-1.74	-1.65	-1.57	-1.49	-1.40	-1.32	-1.23	-1.15	-1.06	-0.98	-0.89	-0.81	-0.72	-0.64	-0.55	-0.47	-0.39	-0.30	-0.22
35%	-2.06	-1.98	-1.89	-1.81	-1.72	-1.64	-1.55	-1.47	-1.39	-1.30	-1.22	-1.13	-1.05	-0.96	-0.88	-0.79	-0.71	-0.62	-0.54	-0.46	-0.37
40%	-2.22	-2.13	-2.05	-1.96	-1.88	-1.79	-1.71	-1.62	-1.54	-1.45	-1.37	-1.29	-1.20	-1.12	-1.03	-0.95	-0.86	-0.78	-0.69	-0.61	-0.52
45%	-2.37	-2.29	-2.20	-2.12	-2.03	-1.95	-1.86	-1.78	-1.69	-1.61	-1.52	-1.44	-1.36	-1.27	-1.19	-1.10	-1.02	-0.93	-0.85	-0.76	-0.68
50%	-2.52	-2.44	-2.35	-2.27	-2.19	-2.10	-2.02	-1.93	-1.85	-1.76	-1.68	-1.59	-1.51	-1.42	-1.34	-1.26	-1.17	-1.09	-1.00	-0.92	-0.83

Fonte: Acervo do Próprio Autor

4.4 Análise de VPL

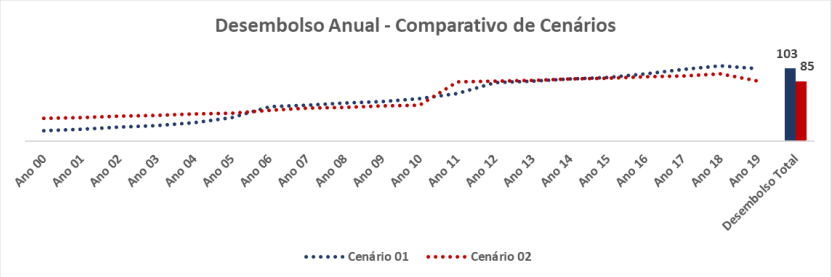
Uma outra visão de análise financeira apresentada como resultado dos cenários é a comparação do VPL de cada cenário. Como se trata da avaliação de desembolso com as frotas, sem considerar entradas de caixa, é esperado que os resultados de VPL sejam negativos nos cenários avaliados. Como é considerado o mesmo plano de produção para os cenários avaliados, o que obtiver o maior VPL (menos negativo) é o que possui melhor performance neste indicador.

Esta análise é de suma importância, pois além de se analisar o valor total de desembolso ao longo dos períodos avaliados é necessário analisar o valor presente líquido destes valores. Mesmo para valores totais de desembolso similares, os montantes podem ser executados em períodos diferentes gerando diferentes resultados.

De modo a exemplificar, foram simulados 02 cenários de dimensionamento com frotas distintas na ferramenta e serão apresentados os resultados de desembolso e VPL por cenário.

A figura 40 demonstra o desembolso total com frota de carregamento e transporte, e o cenário 01 possui um desembolso total maior que o cenário 02.

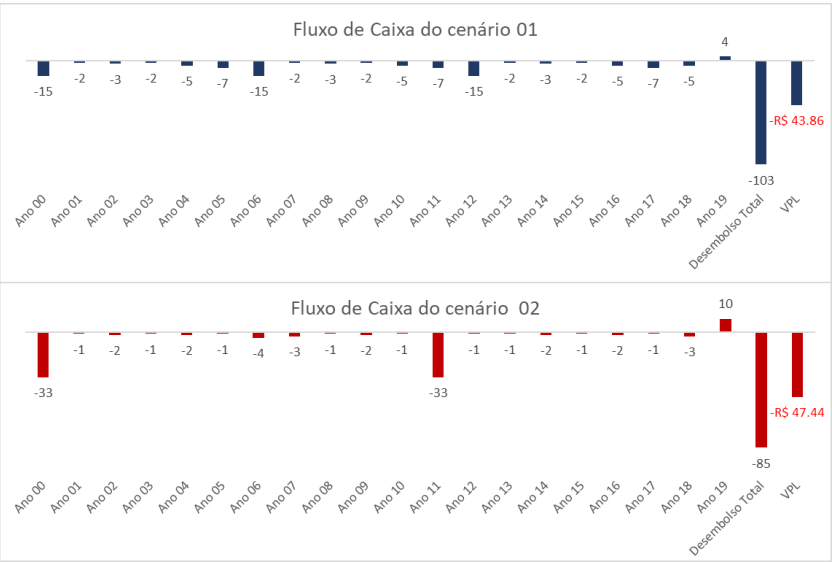
Figura 40. Comparativo de Desembolso Total por Cenário



Fonte: Acervo do próprio autor

A figura 41 exibe os gráficos com dados de fluxo de caixa e VPL por cenário. Analisando esses dados observa-se que, apesar do desembolso total do cenário 01 ser maior, tendendo a demonstrar uma desvantagem em relação ao cenário 02, o seu VPL é maior, demonstrando uma vantagem nesse indicador.

Figura 41. Fluxo de Caixa e VPL por cenário



Fonte: Acervo do próprio autor

É importante levar em consideração que a análise do VPL não é um fator que individualmente define qual cenário é mais vantajoso. Essa definição deve ser feita levando-se em conta também todos os demais aspectos incluídos na análise.

4.5 Ferramenta para simulação de Cenários

O dimensionamento é realizado com valores absolutos, contudo é sabido que ao longo do processo produtivo ocorrem variações nos resultados que podem impactar nos resultados. De modo a considerar tais variações na análise comparativa dos custos dos cenários, foi implementada na ferramenta uma funcionalidade para criação de cenários adjacentes ao cenário inicial de valores absolutos. Esta funcionalidade utiliza os princípios da simulação de Monte Carlo, realizando variações simultâneas e aleatórias nos índices de hora trabalhada e produtividade dos equipamentos. Para isso é utilizado o inverso da distribuição cumulativa normal para a média específica e o desvio-padrão informado para cada índice, construindo um banco de dados que representa um panorama geral de uma rotina de operação de cada cenário. A Figura 42 ilustra os campos de entrada de dados para as premissas de cálculo das variações.

Figura 42 - Exemplo de Tela para Inserção de dados de Variação de Cenários

Cenário:	Cenário 01				Cenário 02			
Match Frota:								
Massa Planejada (Ton):								
x ROM								
DMT (km):								
Hora Calendário Período:								
Quantidade de Períodos:								
Aplicação da Frota:	Carga		Transporte		Carga		Transporte	
Quantidade Eqpto:								
Vida Útil (horas):								
Valor Equipamento (R$):								
Indicador:	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão
UF (%):								
DF (%):								
Hora Trabalhada Unitária (h):								
HTMP (%):								
Atraso Ciclo (%):								
Carga Média (Ton):								
Velocidade Média (km/h):								
DMT (km):								
T. Carreg. + Manob. (min):								
Demais T. Fixos (min):								
Produtiv. Horaria (t/h)								
Movimentação (ton):								
Qtd Turmas								
Absenteismo								
R$ Unit. Operador Período:								
Qtd Opeadores								
R$ Total Operadores								
R$/Litro Diesel:								
Litros/HT de Diesel:								
R$ Total de Diesel:								
R$/HT de Pneus:								
R$ Total de Pneus:								
R$/HT de Manutenção:								
R$ Total de Manutenção:								
R$/HT de Locação:								
R$ Fixo por Equipamento:								
R$ Fixo Geral:								
R$/Ton Geral:								
R$/Ton/km Geral:								
R$/Ton/(km-l) Geral:								
Quantidade Aquisições:								
R$ Total de Aquisições:								
R$ Demais CAPEX adicionais:								
Gasto Total OPEX:								
Gasto Total CAPEX:								
Gasto Total:								
Total Geral:								

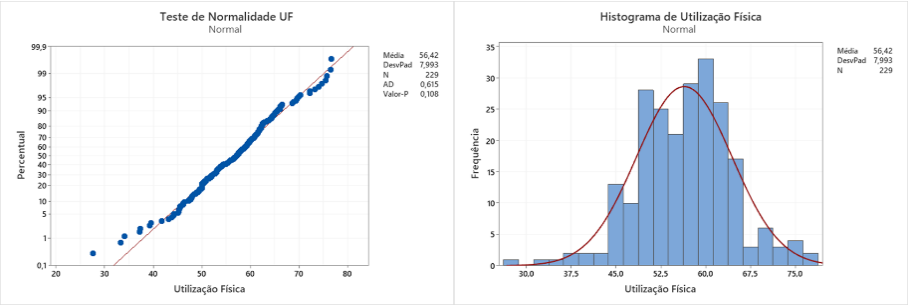
Fonte: Acervo do Próprio Autor

Para a comparação dos cenários é necessária a utilização do mesmo plano de produção, associando a frota utilizada em cada cenário e seus respectivos índices operacionais conforme o *match* de equipamentos e características da operação.

De modo a garantir que o método de projeção e variação dos dados seja aderente às características reais de operação, foi realizado levantamento de dados históricos de operação de janeiro de 2019 a abril de 2022, bem como acompanhamento da rotina de campo. De posse desses dados foi realizada a análise dos mesmos, de modo a se realizar o saneamento da base de dados para eliminar apontamentos incorretos e desvios nos processos de controle. Foi realizado também o teste de normalidade nos dados a serem utilizados para a variação, com base na média e desvio padrão.

- Utilização Física;

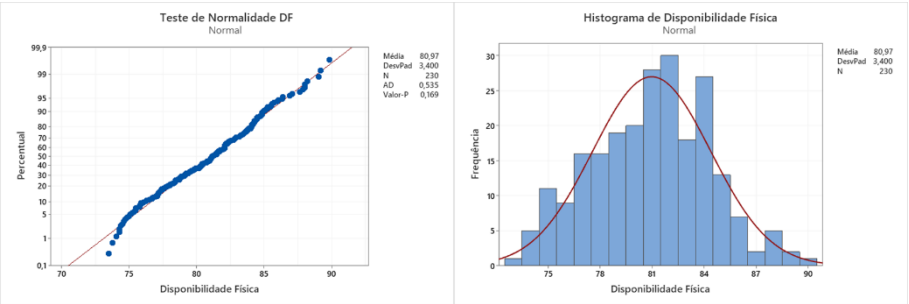
Figura 43. Teste de Normalidade e Histograma de Utilização Física



Fonte: Acervo do Próprio Autor

- Disponibilidade Física;

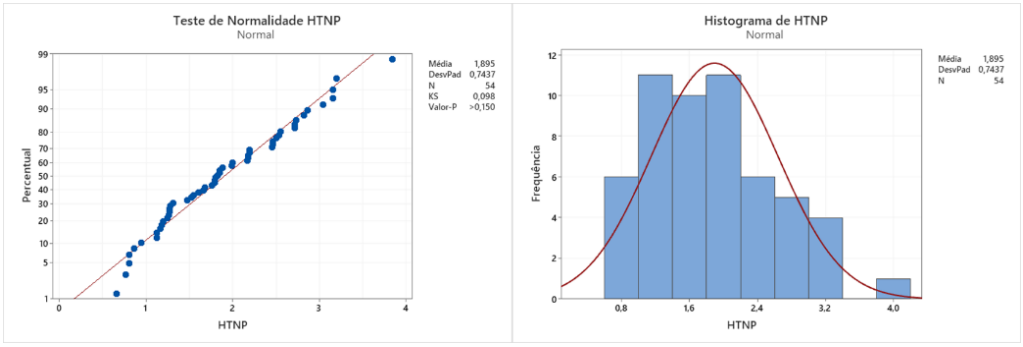
Figura 44. Teste de Normalidade e Histograma de Disponibilidade Física



Fonte: Acervo do Próprio Autor

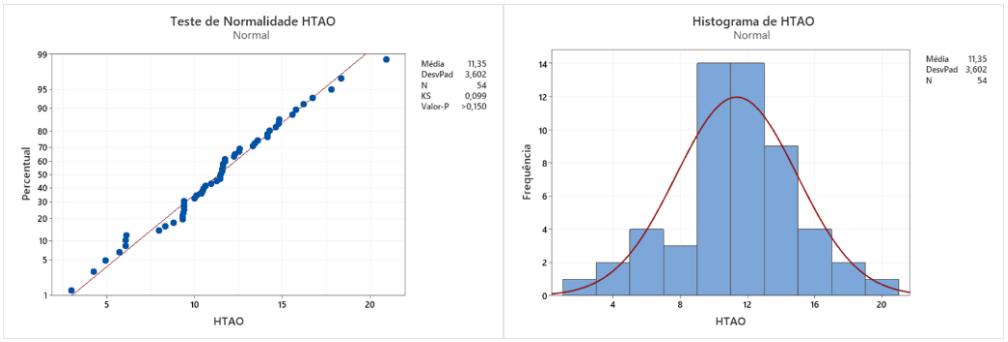
- Percentual de Improdutividade do Ciclo;

Figura 45. Teste de Normalidade e Histograma de Horas Trabalhadas Não Produtivas



Fonte: Acervo do Próprio Autor

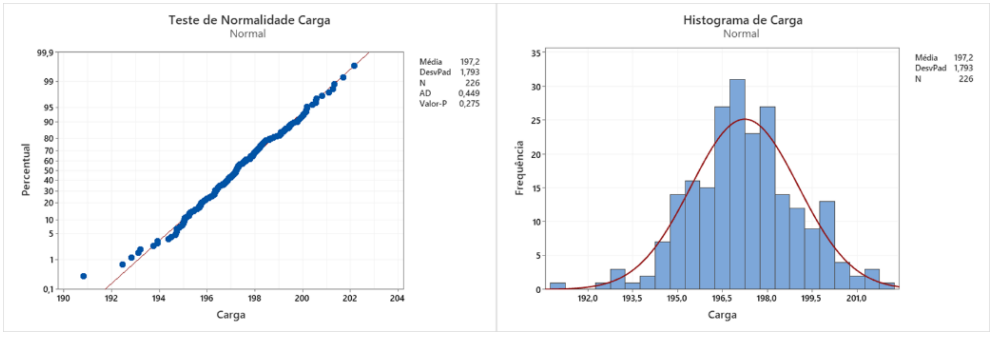
Figura 46. Teste de Normalidade e Histograma de Horas Trabalhadas em Atraso Operacional



Fonte: Acervo do Próprio Autor

- Carga Média;

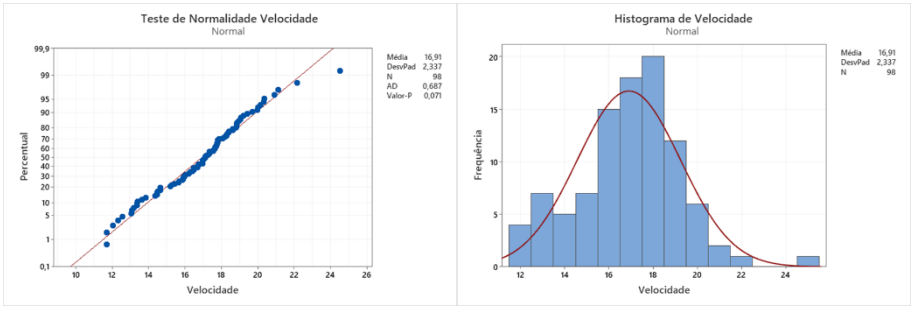
Figura 47. Teste de Normalidade e Histograma de Carga



Fonte: Acervo do Próprio Autor

- Velocidade Média;

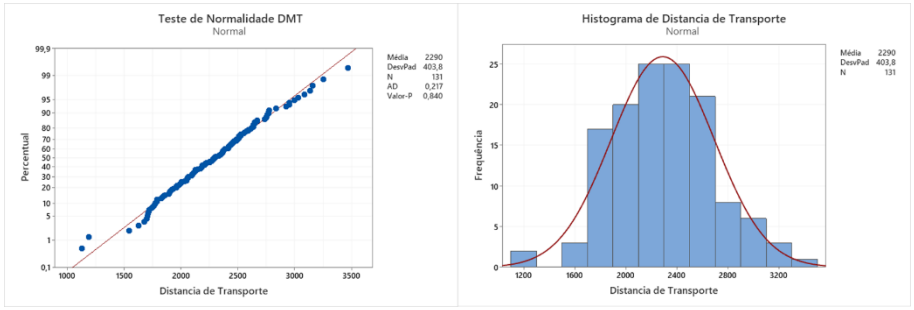
Figura 48. Teste de Normalidade e Histograma de Velocidade



Fonte: Acervo do Próprio Autor

- Distância Média de Transporte;

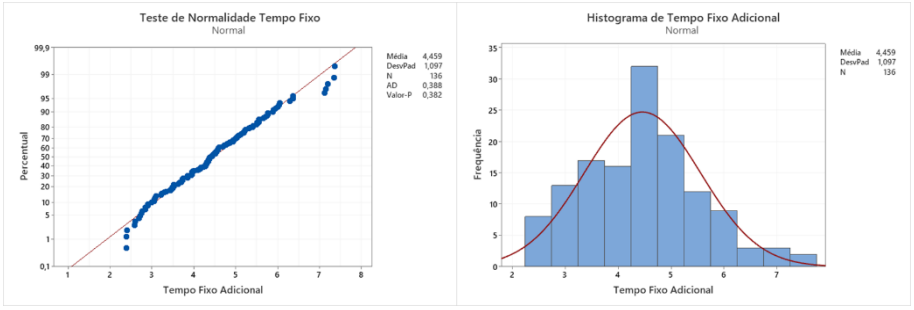
Figura 49. Teste de Normalidade e Histograma de Distância de Transporte



Fonte: Acervo do Próprio Autor

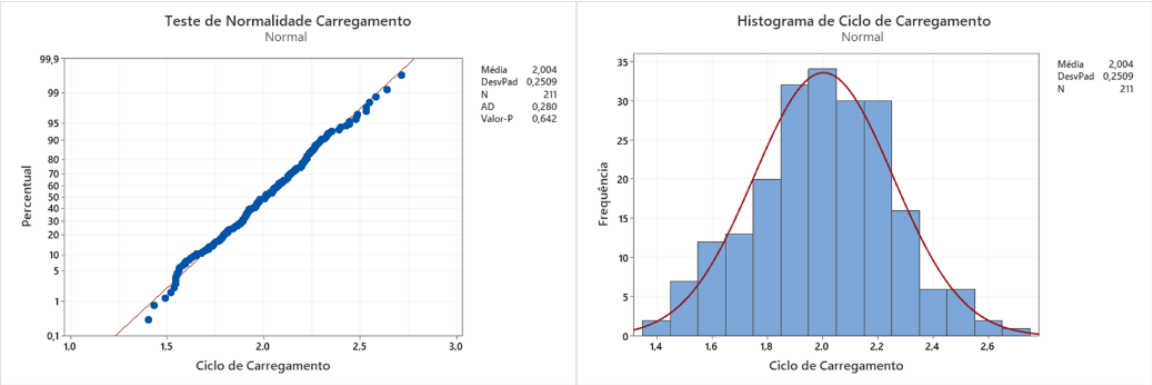
- Tempos Fixos;

Figura 50. Teste de Normalidade e Histograma de Tempos Fixos (exceto Tempo de Carregamento)



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Figura 51. Teste de Normalidade e Histograma de Tempo de Carregamento



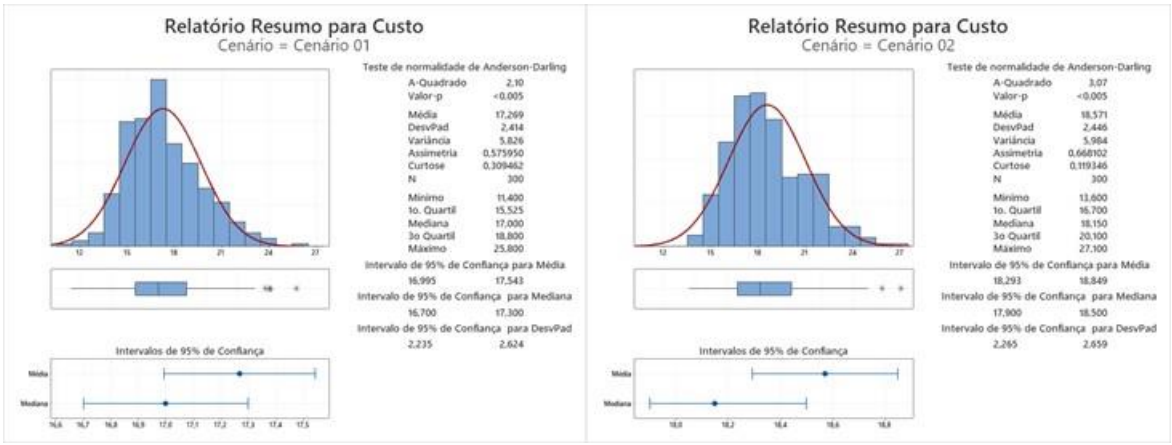
Fonte: Acervo do Próprio Autor

4.6 Análise Comparativa de Cenários

A partir da simulação dos cenários com os índices, a base de dados é gerada e é utilizada para se realizar a análise comparativa dos cenários. A análise é realizada através de resultados estatísticos sustentados na base de dados da simulação.

A figura 52 apresenta as estatísticas descritivas dos dois cenários.

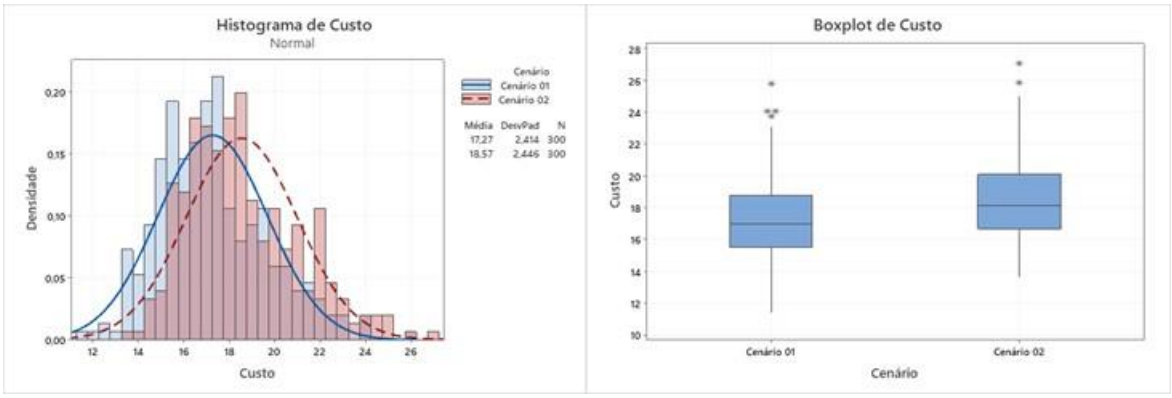
Figura 52 - Resumo Gráfico e Descritivo das Estatísticas Básicas dos Cenários



Fonte: Acervo do Próprio Autor

A figura 53 apresenta os gráficos de histograma e *boxplot*.

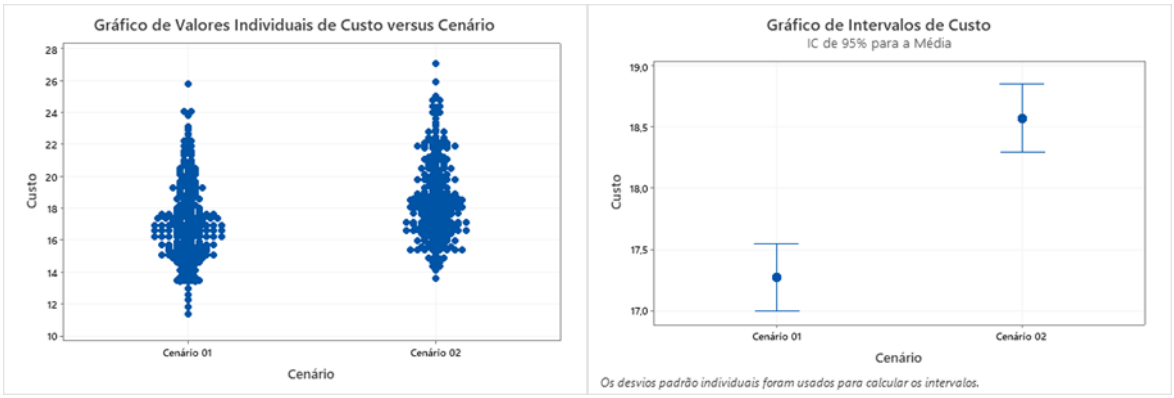
Figura 53 - Gráficos Histograma e *Boxplot* dos Cenários



Fonte: Acervo do Próprio Autor

A Figura 54 apresenta os gráficos de valores individuais e intervalos de custo.

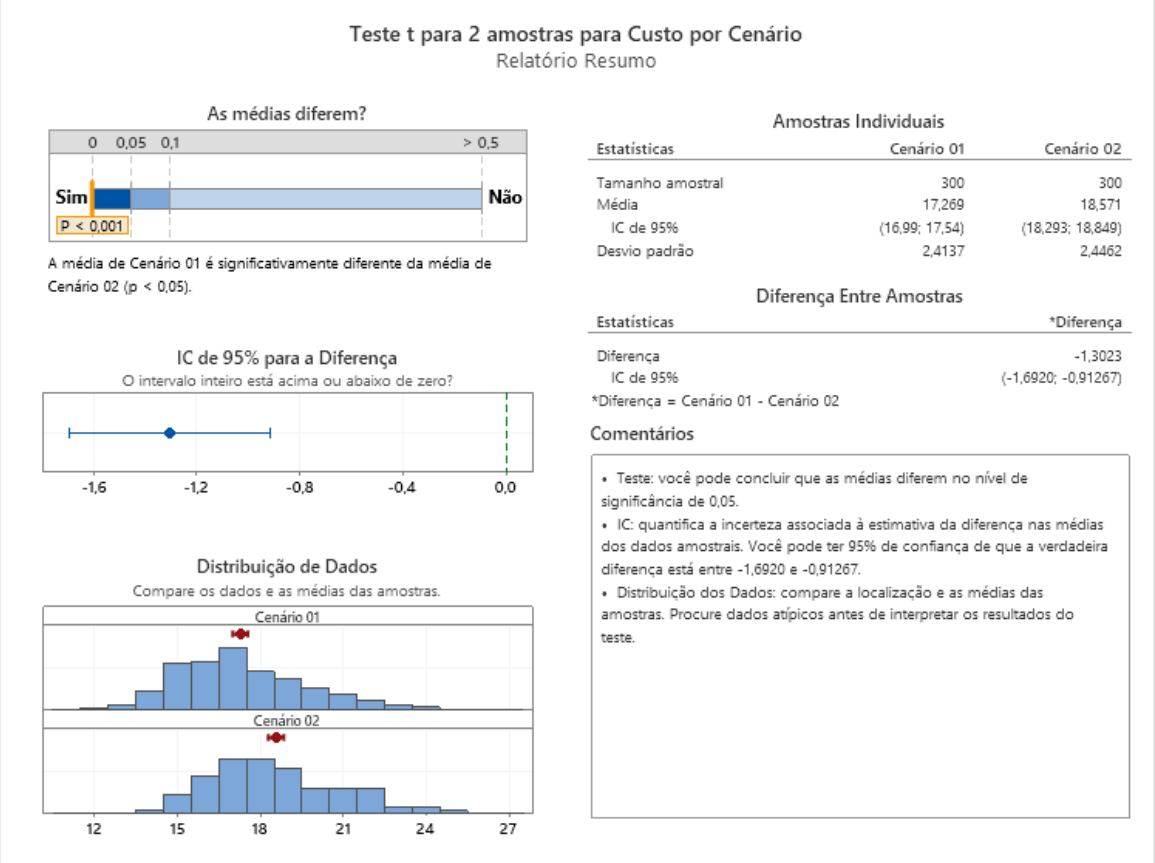
Figura 54 - Gráficos de Valores Individuais e de Intervalos de Custo dos Cenários



Fonte: Acervo do Próprio Autor

A Figura 55 mostra o teste T para duas amostras, considerando como variável de resposta o custo em cada cenário.

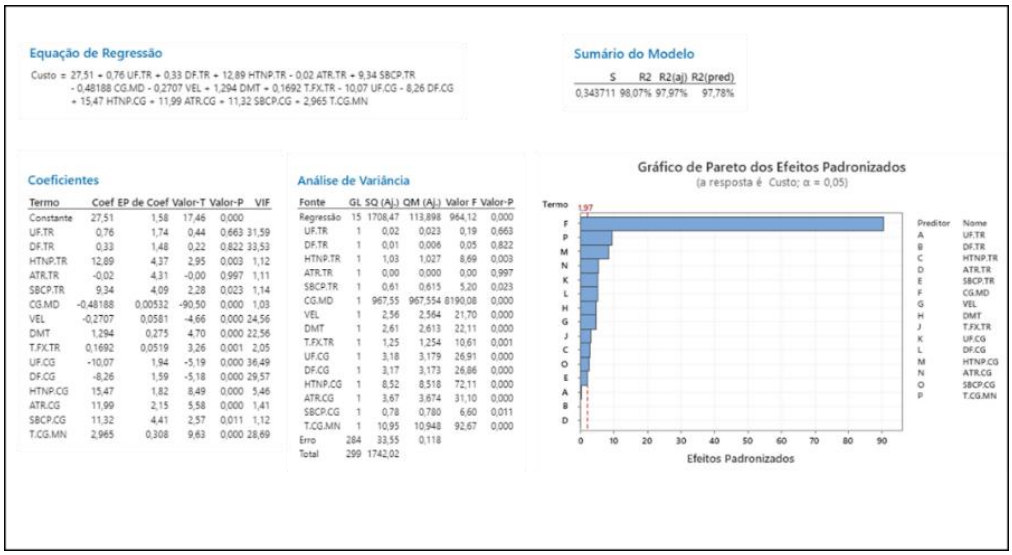
Figura 55 - Resultado do Teste T para 2 amostras de comparativo dos Cenários



Fonte: Acervo do Próprio Autor

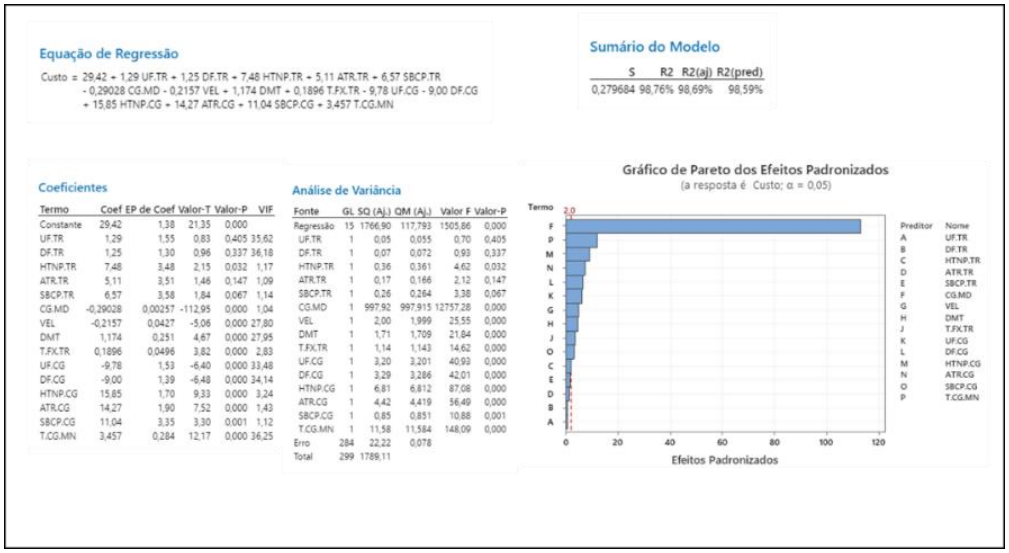
A partir da massa de dados com a variação dos cenários, procedeu-se ainda a regressão linear múltipla de forma a obter um modelo matemático que relacionasse as variáveis preditoras e o custo (variável resposta). Uma vez obtido o modelo de regressão linear múltipla pôde-se, a partir da tabela de ANOVA, mensurar a contribuição percentual de cada variável preditora no custo. A tabela nos mostra, com base nas premissas utilizadas, qual(is) variável(is) mais influencia (m) sobre a variável resposta em cada cenário conforme mostrado nas Figuras 56 e 57.

Figura 56 - Resumo da Análise de Regressão Linear Múltipla do Cenário 01



Fonte: Acervo do Próprio Autor

Figura 57 - Resumo da Análise de Regressão Linear Múltipla do Cenário 02



Fonte: Acervo do Próprio Autor

4.7 Preparação e acompanhamento dos dados de entrada

Resultados consistentes das análises de dimensionamento obtidas com a ferramenta pressupõe qualidade dos dados de entrada utilizados como premissa para a operação. Sendo

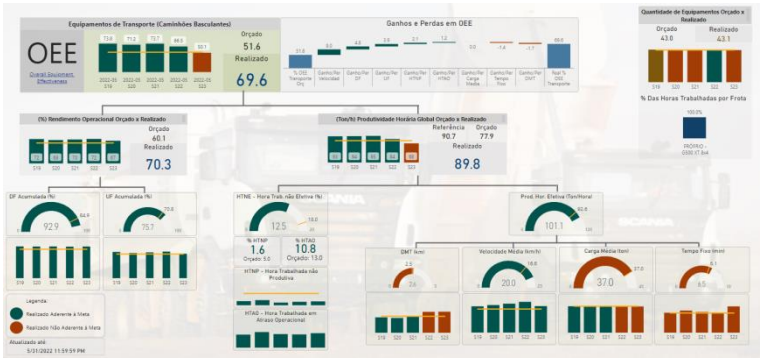
assim, é fundamental que exista segurança de que as informações sejam aplicáveis ao processo que está sendo avaliado.

Para análise de processos que ainda irão entrar em operação, o ideal é considerar dados de processos similares, em conjunto com as capacidades nominais dos equipamentos informadas pelos fornecedores. Para processos que já estão em operação, além dos fatores já citados, deve-se também observar o histórico desta operação.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi implementado um controle dos indicadores base para a elaboração dos estudos de dimensionamento de frotas em cada processo. O controle foi implementado com foco no indicador de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), realizando o detalhamento de suas parcelas e controlando os índices que compõem as horas trabalhadas e produtividade da frota. Tais indicadores foram aprimorados ao longo da implantação da ferramenta de dimensionamento, proporcionando ganhos de OEE nas frotas acompanhadas e redução de seus custos de operação.

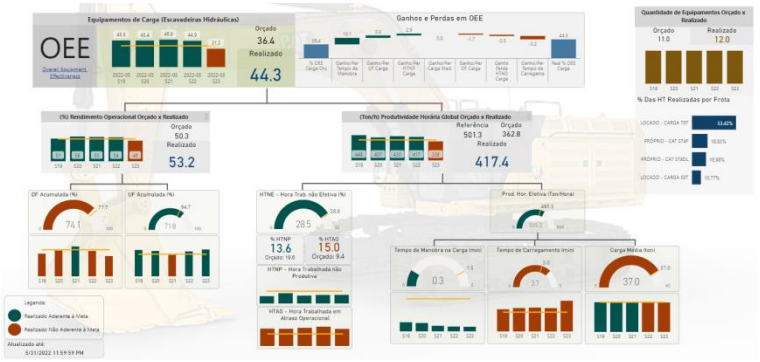
As figuras a seguir demonstram alguns dos acompanhamentos implementados para verificação da eficácia dos índices utilizados para o dimensionamento das frotas de carregamento e transporte.

Figura 58. Modelo de estratificação de OEE para a frota de Transporte



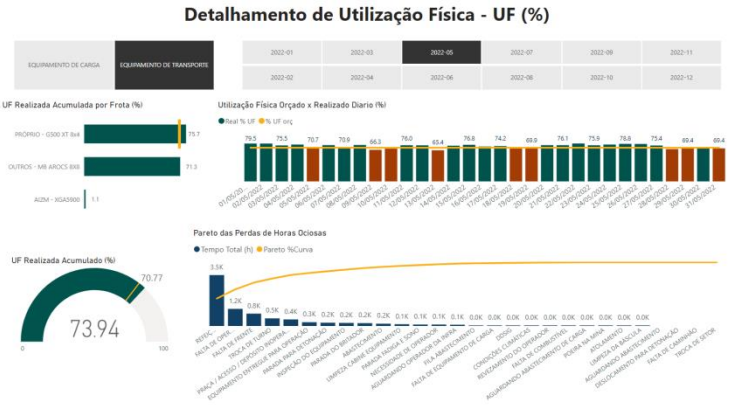
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 59. Modelo de estratificação de OEE para a frota de Carregamento



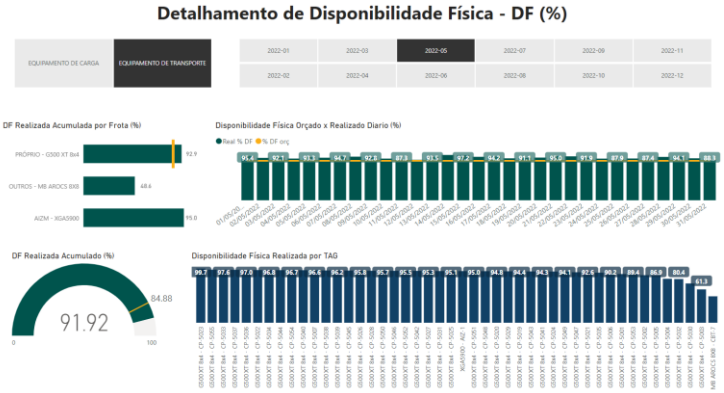
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 60. Acompanhamento de Utilização Física de frota



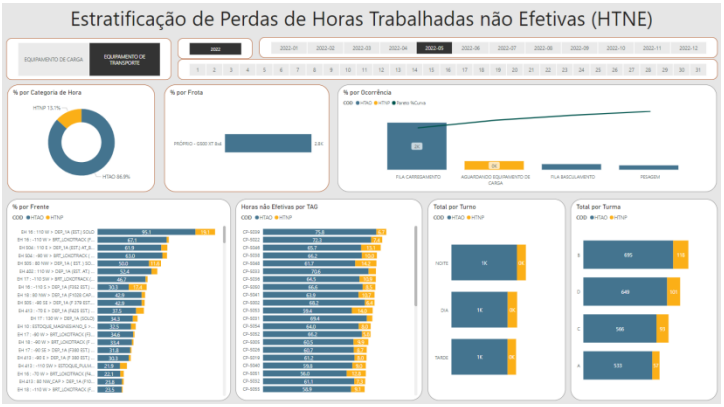
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 61. Acompanhamento de Disponibilidade Física de Frota



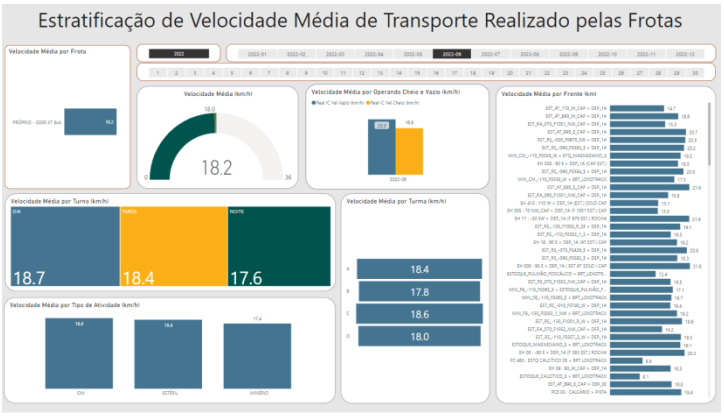
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 62. Acompanhamento de Horas Trabalhadas não Efetivas de Frota



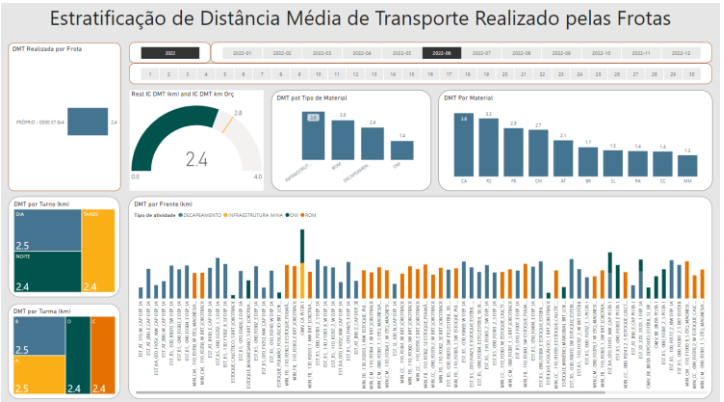
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 63. Acompanhamento de Velocidade Média de Frota de Transporte



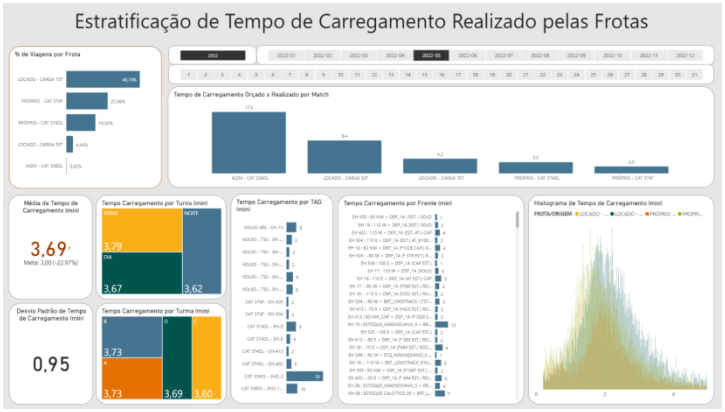
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 64. Acompanhamento de Distância de Transporte de Frota



Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 65. Acompanhamento de Tempo de Carregamento de Frotas



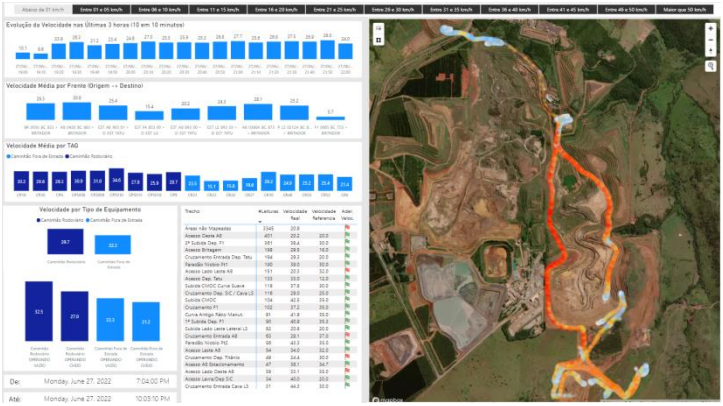
Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 66. Acompanhamento de Carga de Equipamentos de Transporte



Fonte: Acervo do próprio autor

Figura 67. Mapa de Velocidade das Vias da Mina



Fonte: Acervo do próprio autor

4.8 Apuração de Ganhos

Com a implantação metodologia de acompanhamento dos índices de frota, e utilização da ferramenta para elaboração de estudos de dimensionamento, foram observados ganhos na rotina de operação, nas atividades de dimensionamento e nos resultados operacionais.

Houve redução significativa no tempo gasto para elaboração dos estudos de dimensionamento, possibilitando maior tempo para análise dos resultados e tomadas de decisão. Essa redução é observada tanto nas tarefas de preparação dos dados para elaboração dos estudos quanto na tratativa e desenvolvimento efetivo do estudo. Tal redução se deve a alguns fatores implantados ao longo do trabalho tais como:

- Padronização da elaboração dos estudos;
- Padronização dos dados a serem utilizados;
- Eliminação de tarefas e cálculos manuais;
- Automatização das rotinas de validação de premissas e identificação de inconsistências;
- Definição do modelo de entrega da conclusão dos estudos;
- Ferramenta acessível e aplicável a todos os níveis da operação.

Também é possível observar os ganhos em relação à aderência dos gastos orçados nas operações com base nos resultados dos dimensionamentos elaborados através a ferramenta desenvolvida. Tal aderência é observada nos consumos absolutos dos itens, que são calculados com base em premissas técnicas. Ainda se observa oportunidades de melhorias na construção das premissas de preços unitários dos insumos necessários à operação. Essas oportunidades de melhorias se devem principalmente ao fato de que esses preços estão sujeitos a variações de mercado e fatores econômicos externos à organização.

Os ganhos em relação aos gastos orçados se devem a fatores implementados ao longo do trabalho, tais como:

- Estudos contemplando variáveis determinísticas e aleatórias, possibilitando mensurar as incertezas dos cenários para a tomada de decisão;
- Intervalo de desvios admissíveis estimados e validados com base no histórico da operação objeto do estudo, ou operações similares;

- Aplicação de técnicas estatísticas e análise computacional padronizada para a tomada de decisão.

4.9 Ganhos Adicionais

Além da implantação da ferramenta de dimensionamento, foram realizadas melhorias na rotina de gestão da operação. Estas melhorias são focadas na definição e acompanhamento de indicadores chave para o processo de operação, bem como acompanhamento de itens que irão compor o custo total.

Desta forma, os principais ganhos adicionais são:

- Maior detalhamento para controle dos índices que afetam a produtividade das frotas;
- Padronização da gestão e controles de eficiência global das frotas de carregamento e transporte;
- Memória de cálculo robusta para rastrear pontos de desvio dos custos e performance planejados;
- Maior confiabilidade nas informações com a eliminação da transposição manual de dados entre cálculos e bases de dados diferentes,
- Eliminação da subjetividade na definição de premissas operacionais de frota para o dimensionamento;
- Maior alinhamento e entendimento das equipes quanto à correlação dos indicadores, resultados e rotina operacional;
- Desenvolvimento das equipes operacionais;
- Ganhos de produtividade da frota resultando em redução de horas trabalhadas, redução de custos e redução de emissão de CO_2;
- Redução de tempo gasto com atividades manuais na elaboração de estudos de dimensionamento de frotas.

5 CONCLUSÕES

A utilização da metodologia de análise de custos de cenários de dimensionamento de frotas desenvolvida neste trabalho mostrou-se satisfatória. Foram observadas melhorias sistemáticas que possibilitaram ganhos, desde a coleta dos dados de entrada para elaboração dos estudos até o acompanhamento da implementação dos resultados com apuração de sua aderência. Tais melhorias possibilitam rastrear quais fatores estão impactando os custos de forma positiva ou negativa, desde o planejamento até a operação. Tanto a ferramenta para elaboração dos estudos de dimensionamento quanto as ferramentas para acompanhamento dos resultados na rotina são totalmente disponíveis e acessíveis a todos os níveis da organização. Essa facilidade de acesso possibilita uma rápida identificação de gargalos e oportunidades de melhoria, o que facilita uma correta tomada de decisão para priorização de cenários ou tomada de medidas corretivas. A implantação da ferramenta para dimensionamento de frotas reduziu o tempo de trabalho manual, disponibilizando os recursos para focar nas atividades de análise e desenvolvimento de soluções que geram maior valor ao negócio. As estimativas de custos realizadas pela ferramenta possibilitam rastreabilidade dos gastos, correlacionando-os com os índices de controle da operação, direcionando a tomada de decisão e refinamento das informações para próximos estudos.

A implantação do trabalho demonstrou uma redução de 70% no tempo elaboração de estudos de dimensionamento de frotas, considerando os prazos de coleta de dados e tratativa das informações. Além disso, observou-se aderência superior a 95% nos consumos específicos dos itens orçados através da ferramenta de dimensionamento para as frotas de carregamento e transporte nas operações. Adicionalmente, a utilização e tratativa dos controles para acompanhamento da implementação dos índices dimensionados, possibilitou ganhos em produtividade das frotas. As frotas de carregamento alvo do estudo apresentaram ganho médio de 8,3% na produtividade horária global considerando o mesmo período em 2021 e 2022. O mesmo comparativo para as frotas de caminhões basculantes apresenta ganho médio de 9,7%, descontando variações de distância média de transporte. Tais melhorias de produtividade se refletem em redução de horas trabalhadas, o que gera economia direta nos gastos com diesel, manutenção, pneus e locação de equipamento. Esta economia chega a 8% dos gastos totais com as frotas. Além disso, o gasto a menor de diesel se reflete também em uma menor emissão de CO_2 na atmosfera, com melhor queima de combustível.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento e implantação desse trabalho, foi possível identificar outros temas que podem ser desenvolvidos de forma mais aprofundada, tais como:

- Ampliação deste estudo para frotas de infraestrutura e apoio no processo de operação;
- Definição de cenários ótimos de operação de mina com a implementação de modelos matemáticos de pesquisa operacional;
- Maior rastreabilidade e detalhamento do impacto da disponibilidade e confiabilidade de manutenção das frotas nos custos de produção da mina;
- Desenvolvimento de metodologia e ferramenta para otimização dos tempos de atraso de equipamentos de carregamento e transporte para uma operação sem sistema de despacho com alocação dinâmica de equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABBAS, K.; GONÇALVES, M. N.; LEONCINE, M. Os Métodos de Custeio: Vantagens, Desvantagens e sua Aplicabilidade nos diversos Tipos de Organizações Apresentadas pela Literatura. **ConTexto**, v. 12, n. 2, p. 145–159, 2012.

ALI, L.; REZA, S. A. Statistical approach to determination of overhaul and maintenance cost of loading equipment in surface mining. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 11, n. 6, p. 54–60, 2013.

ALMEIDA, W. E. **Uma análise da importância do plano de aproveitamento econômico no processo de tomada de decisão na mineração.** 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

AMARAL, M. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ANDRADE, E. L. **Introdução a pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisões.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2004.

AUSIMM. **Cost Estimation Handbook - Monograph 27.** 2. ed. Austrália, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012.

BASCETIN, A.; OZTAS, O.; KANLI, A. I. A new development software for equipment selection in mining engineering. **South-African Institute of Mining and Metallurgy**, South-Africa, p. 16 - 44, 2006.

BERNARDI, H. A. **Dimensionamento de Equipamentos para as Operações Unitárias de Lavra de Mina a Céu Aberto.** 2015. 83 f. Monografia (Engenharia de Minas) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2015.

BORGES, T. C. **Análise dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração.** 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BOTELHO, A. H. **Influência da operação de desmonte de rochas no carregamento de material fragmentado**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BOZORGEBRAHIMI, E.; HALL, R. A.; BLACKWELL, G. H. "Equipment size effects on open pit mining performance". **Institute of Materials, Minerals and Mining in association with AusIMM**. Canadá, v. 112, p. 93 - 171. 2003.

BURT, C. N,; CACCETTA, L. **Equipment Selection for Mining: with Case Studies.** ebook, Austrália, Springer International Publishing, 2018.

CAMPELO, A. C. de M. M.; MARIN, T.; TOMI, G. F. C. Utilização de dados do sistema de despacho para estimativa de produtividade de transporte no plano de lavra de curto prazo. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, v. 15, n. 2, p. 86–90, 2018.

CATERPILLAR. **Caterpillar Performance Handbook.** 49 ed. Illinois: Caterpillar Inc., Janeiro 2019.

CAVALCANTE, M. S. Influência do Porte da Escavadeira na Viabilidade Econômica de uma Mineração de Agregados. **Engenharias: metodologias e práticas de caráter Multidisciplinar 2**, p. 145–158, 2020.

COELHO, C. F.; MORALES, G. Comparação de Modais de Transporte para Escoamento de Minério: Indicadores de Sustentabilidade. **VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, 2012.

COLPO, I.; WEISE, A. D.; OLIVEIRA NETO R. Aplicação do Método de Custo Baseado em Atividades na Cadeia Produtiva Mineral. **XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO**, 2013.

CORONADO, P. P. V.; TENORIO, V. O. Optimization of Open Pit Haulage Cycle Using a KPI Controlling Alert System and a Discrete-Event Operations Simulator. **37th International Symposium on the APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY**, v. 52, n. 1, p. 34 – 44, 2015.

COSTA, F. P. da. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

COUNTINHO, H. M. **Melhoria Contínua Aplicada para Carregamento e Transporte na Operação de Mina a Céu Aberto** 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CURI, A. **Lavra de Minas.** 1. ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2017.

CURI, A. **Minas a Céu Aberto: Planejamento de Lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DIDDENS, Z. M. **Integration of Fleet Production and Cost Analysis in Mine Design and Planning** 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Delft University of Technology, Rotterdan, 2019.

ERCELEBI, S. G.; BASCETIN, A. Optimization of shovel-truck system for surface mining. **South-African Institute of Mining and Metallurgy**, South-Africa, p. 433 - 439, 2009.

FISONGA M.; MUTAMBOV. Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement **Cogent Engineering**, Lusaka Zambia, 2017.

FILGUEIRA, N. C. **Análise do Método de Custeio Aplicado em uma Mineradora no Estado do Pará e Proposições de Melhoria** 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

HAFEMANN, A. C.; WIESE D.; BENATTI G. L.; MARCOMINI G.; MOROZINI J. F.; SILVA L. S.; PEREIRA M. A. **Engenharia Econômica.** 1. ed. DTCOM Comunicação e Educação, Belo Horizonte, 2017.

JESUS, L. **Dimensionamento de Equipamentos de Mina e Custos Operacionais.** 1. ed. São Paulo, Baraúna, 2013.

KOELLNER, W. G.; BROWN, G M.; RODRÍGUES, J.; PONTT, J.; CORTÉS, P.; MIRANDA, H. Recent Advances in Mining Haul Trucks. **IEEE Transactions on Industrial Eletronics**, v. 51, n. 2, p. 321–329, 2004.

KOMATSU. Specification and application handbook. 31 ed. Japão: Komatsu, Abril 2013

LAGES, A. R. **Estudo Preliminar da Influência do porte de Veículos de Carregamento e Transporte nos Custos Operacionais de Minas a Céu Aberto** 2018. 69 f. Monografia (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Palmas, 2018.

LOPES, S. D.; DIEHL, C. A.; LEITE, E. G. O campo de discussão do orçamento empresarial: uma análise das publicações no Brasil. **XXVII Congresso Brasileiro de Custos – Associação Brasileira de Custos**, 2020.

MAY, M, A. 2012. **Applications of Queuing Theory for Open-Pit Truck/Shovel Haulage Systems** 2012 79 f. Dissertação (Mestrado em Mining & Minerals Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Estados Unidos da América, 2012

MERSCHMANN, L. H. C. **Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. 2002.

MIRANDA-JUNIOR, I. S. **Diretrizes Fundamentais para um Estudo de Avaliação Econômica de Empreendimentos de Mineração: Um Estudo Bibliográfico** 2011. 275 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

MORAIS, J. L. **Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos** 2020. 224 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CESARIO NETO, E. D. **Os impactos da Industria 4.0 na mineração**2019. 78 f. Monografia (Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SILVA NETO, J. A. **Análise de Sensibilidade dos Limites da cava Final Ótima com Base na Variação do Preço de Mercado do Fosfato.** 2017. 78 f. Monografia (Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

MOREIRA NETO, T. C. **Aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida em uma Indústria de Mineração com Base na Gestão de Ativos** 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

NAHAS, M. **Mineração e Dinâmica Produtiva**2014. 233 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

NEWMAN, A. M. *et al*. **A review of operations research in mine planning**. **Interfaces**, v. 40, n. 3, p. 222–245, 2010.

QUAGLIO, O. A. **Adequação do índice de blastabilidade de modelos de fragmentação ao desmonte de rochas em pedreiras de brita** 2020. 235 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto** 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PERONI, R. L.; RACIA, I. M. Desenvolvimento de um Modelo de Dimensionamento de Equipamentos de Escavação e de Transporte em Mineração. **VIII Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique**, 2017.

PELLEGRIN, I.; ANTUNUES, J.; KLIPPEL, M.; BORTOLOTTO, P.; ALVAREZ, R. **Sistemas de Produção: Conceitos e Práticas para Projetos e Gestão da Produção Enxuta.** 1. ed. Porto Alegre, Bookman, 2007.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração** 2016. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RODOVALHO, E.C.; LIMA, H.M.; TOMI, G. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. **Journal of Environmental Management**, v. 172, p. 177-185, mar. 2016.

RYBA, A.; LENZI E. K.; LENZI M. K. **Elementos da Engenharia Econômica.** 1. ed. Intersaberes, Curitiba, 2012.

SOUZA-JUNIOR, W. T. DE **Seleção de Caminhões Rodoviários para Mineração Utilizando a Metodologia de Auxílio à Decisão. Estudo de Caso: Mineração de Bauxita** 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

TEIXEIRA, H. G. M. **Desenvolvimento de um sistema para dimensionamento, análise e otimização de circuitos de preparação de minérios** 2013. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

THUMS, A.; MARETH, T. Contribuição das Práticas de Engenharia Reversa para a Gestão Estratégica de Custos. **XXVII Congresso Brasileiro de Custos – Associação Brasileira de Custos**, 2020.