

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

**Análise de adequação de sistema de produção
condicionado ao planejamento de curto prazo em minas
subterrâneas**

Camila Körbes Hauschild

Porto Alegre
2023

Camila Körbes Hauschild

**Análise de adequação de sistema de produção
condicionado ao planejamento de curto prazo em minas
subterrâneas**

Documento submetido ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS para a obtenção ao título de Mestre em Engenharia.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre

2023

Camila Körbes Hauschild

Análise de adequação de sistema de produção condicionado ao planejamento de curto prazo em minas subterrâneas/ Camila Körbes Hauschild. – Porto Alegre, 2023-

71 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais,
2023.

1. Dimensionamento de frotas; 2. Planejamento de curto prazo; 3. Indicadores operacionais; 4. Mineração subterrânea; 5. Equipamentos de mineração.

I. Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Faculdade de Engenharia. IV. Integração de Planejamento de Curto Prazo considerando análise de desempenho e dimensionamento de frotas decarregamento e transporte em mineração subterrânea

CDU 02:141:005.7

Camila Körbes Hauschild

**Análise de adequação de sistema de produção
condicionado ao planejamento de curto prazo em minas
subterrâneas**

Documento submetido ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS para a obtenção ao título de Mestre em Engenharia.

Trabalho aprovado. Porto Alegre, 04 de setembro de 2023:

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Orientador

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti
DEMIN - UFRGS

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski
PPGE3M - UFRGS

Dr. Bruno Tomasi Kuckartz
UFRGS

Porto Alegre
2023

A todos.

Agradecimentos

Nesse conjunto de momentos, em que nos conectamos e nos distanciamos de pessoas queridas, gostaria de agradecer a cada um que contribuiu como suporte para que essa Dissertação fosse desenvolvida, seja por meio do compartilhamento de conhecimento técnico, ou apoio emocional. Grata a todos os que contribuíram de alguma maneira e me incentivaram positivamente para a conclusão desta etapa. Gostaria, também, de expressar alguns agradecimentos especiais.

À minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente. Sem esse pilar não seria possível alcançar meus objetivos pessoais e profissionais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni, por acreditar no meu potencial, pela paciência e por todo o apoio despendido durante esta etapa.

Aos meus colegas do LPM, pelas trocas de conhecimento e companheirismo.

Aos meus colegas da Jaguar Mining Inc, em especial às equipes de Serviços Técnicos e Operação, com quem compartilhei momentos diários.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) e do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) pela experiência e conhecimento compartilhado durante a realização das disciplinas.

Finalmente, aos membros da banca, Prof. Dr. Paulo Salvadoretti, Prof. Dr. Jorge Gavronski e Dr. Bruno Kuckartz por aceitarem o convite para avaliar este trabalho.

*“É preciso sair da ilha para ver a ilha.
Não nos vemos se não saímos de nós.”*

(José Saramago)

Resumo

Devido à redução de reservas minerais e às variações significativas dos preços das commodities no cenário global, a indústria mineral tende a buscar cada dia mais novas ferramentas capazes de aumentar a eficiência de cada processo. No setor de planejamento da mineração, considera-se que o processo de concepção dos planos e projetos ocorra de forma dinâmica, através de resultados que possam ser rapidamente analisados e validados pelos gestores. Na elaboração de planos trimestrais e mensais, há uma componente de risco intrínseco que por vez é responsável pela falta de aderência entre as metas de produção e os recursos efetivamente disponíveis para executar esses planos. Cabe ao planejador, analisar e questionar os indicadores de desempenho dos equipamentos e adequar o plano de produção à realidade operacional. Em mineração subterrânea é usual a existência de diversas frentes de produção operando simultaneamente, onde cada frente apresenta diferentes características sob o ponto de vista operacional, entre elas, taxas de produtividade muito distintas entre os equipamentos na frota. Esse estudo analisa a adequação da frota de transporte para diferentes cenários de planejamento de curto prazo em uma mina que opera pelo método de lavra de realce por subníveis. Para tanto, foi avaliada a distribuição dos dados coletados no sistema de gestão de frotas para determinação dos indicadores de desempenho operacional. Por meio da metodologia aplicada no estudo, que considera as produtividades por subnível, é apresentada de forma analítica a frota necessária para realização de três diferentes alternativas de planos de produção. Foram ainda realizadas análises de sensibilidade sobre o caso base que evidenciaram que a produtividade dos equipamentos de transporte, é um dos parâmetros mais relevantes do processo. A partir das análises dos indicadores, o estudo possibilitou quantificar os recursos necessários para realização do plano em um período semanal, permitindo-se concluir que a metodologia utilizada neste estudo proporciona um aumento da aderência ao plano de produção de curto prazo.

Palavras-chaves: Planejamento de curto prazo; Indicadores operacionais; Dimensionamento de frotas; Mineração subterrânea; Equipamentos de mineração.

Abstract

Due to the reduction of mineral reserves and significant variations in commodity prices on the global context, the mineral industry tends to seek every day new tools capable of increasing the efficiency of each process. In the mining planning sector, it is considered that the process of designing plans and projects occurs dynamically, through results that can be quickly analyzed and validated by managers. In the preparation of the quarterly and monthly plans, there is an intrinsic risk component related to the lack of adherence among the production goals and the existing resources in the enterprise. So that it is the planner duty to analyze and question the operational indicators of the equipment and adjust the production plan to reality. In underground mining is usually operates with several production fronts simultaneously, which each front has different characteristics from an operational point of view, among them, the transport fleet can present productivity rates very variable. This study analyzes the suitability of the transport fleet for different short-term planning scenarios in a mine that operates by the mining method of sublevel stoping. For this purpose, the distribution of data collected in the fleet management system was evaluated to supervise operational performance indicators. Through the methodology applied in the study, which considers productivity by each level, it is analytically presented the fleet necessary to carry out three different production plan alternatives. In addition, sensitivity analyzes were carried out on the base case showing that, of the parameters considered, the most impacting is the productivity of transport equipment. Based on the analyzes of the indicators, the study allowed quantify the resources needed to carry out the plan in a weekly period, allowing to conclude that the methodology used in this study allows the increase of adherence to the short-term production plan.

Key-words: Short-term planning; Operational indicators; Fleet sizing; Underground mining; Mining equipment.

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Processo iterativo intrínseco ao planejamento de lavra. | 19 |
| Figura 2 – Distribuição dos métodos de lavra subterrâneos no mundo (MARTINO et al., 2021) | 22 |
| Figura 3 – Configuração característica de uma operação por método de realce por subníveis. Adaptado de Darling (2011) | 25 |
| Figura 4 – Ciclo de operações unitárias típicas de mina subterrânea | 26 |
| Figura 5 – Jumbo de perfuração com duas perfuratrizes | 27 |
| Figura 6 – Fandril de perfuração | 29 |
| Figura 7 – Carregamento de minério por meio do controle remoto Fonte: Hard-Line (2022) | 30 |
| Figura 8 – Análise da distância entre nível em comparação ao custo operacional. Fonte: Adaptado de Hartman (1987) | 31 |
| Figura 9 – Classificação dos custos operacionais de lavra em mina com sistema de transporte por trens e içamento do minério. Fonte: Adaptado de Gertsch & Bullock (1998) | 33 |
| Figura 10 – Classificação dos custos operacionais de lavra em mina com sistema de transporte por caminhões. Fonte: Adaptado de Hustrulid & Bullock (2001) | 33 |
| Figura 11 – Epiroc ST14 - carregadeira do tipo LHD com capacidade de carga útil de 14t (EPIROC, 2021) | 35 |
| Figura 12 – Caterpillar 950CG - pá carregadeira com capacidade da caçamba de 2,5 a 4,4m ³ (CATERPILLAR, 2021) | 35 |
| Figura 13 – Volvo A30G - caminhão articulado com capacidade de carga útil de 29t (VOLVO, 2021) | 36 |
| Figura 14 – Operações unitárias do ciclo operacional de transporte | 39 |
| Figura 15 – Fluxograma esquemático da metodologia proposta | 43 |
| Figura 16 – Vista sul-norte das principais lentes mineralizadas (à esquerda) e das galerias e regiões lavradas com os sólidos do cenário-referência (à direita) | 44 |
| Figura 17 – Estruturas existentes no plano de lavra | 47 |
| Figura 18 – Dependências entre as atividades | 47 |
| Figura 19 – Gráfico de Gantt para gerenciamento das atividades de desenvolvimento | 48 |
| Figura 20 – Gráfico de Gantt com a alocação dos equipamentos na atividade de perfuração de leques de detonação | 49 |
| Figura 21 – Histograma e sumário estatístico dos tempos fixos | 53 |
| Figura 22 – Histograma e sumário estatístico dos tempos no painel de lavra nível 8 | 54 |
| Figura 23 – Histograma e sumário estatístico dos tempos no painel de lavra nível 13 | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 – Exemplo de ciclo aberto (esquerda) e fechado (direita) | 55 |
| Figura 25 – Análise da produtividade por caminhão em função da DMT | 56 |
| Figura 26 – Análise da distância do ponto de carga em função do tempo de carregamento | 57 |
| Figura 27 – Número de caminhões por semana | 58 |
| Figura 28 – Número de caminhões por semana | 59 |
| Figura 29 – Número de caminhões por semana | 60 |
| Figura 30 – Comparativo entre os cenários de produção | 61 |
| Figura 31 – Número de caminhões por semana | 62 |
| Figura 32 – Gráfico de análise de sensibilidade para a produtividade | 62 |
| Figura 33 – Número de caminhões por semana | 63 |
| Figura 34 – Gráfico de análise de sensibilidade para a carga média | 64 |
| Figura 35 – Número de caminhões por semana | 64 |
| Figura 36 – Gráfico de análise de sensibilidade para a utilização | 65 |
| Figura 37 – Número de caminhões por semana | 66 |
| Figura 38 – Gráfico de análise de sensibilidade para a disponibilidade física | 67 |
| Figura 39 – Gráfico de análise dos fatores de sensibilidade do estudo | 67 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Principais empresas produtoras de ouro no ano de 2020. | 24 |
| Tabela 2 – Premissas de produção para elaboração dos cenários | 50 |
| Tabela 3 – Custos operacionais e taxas aplicados no estudo | 50 |
| Tabela 4 – Características do banco de dados | 52 |
| Tabela 5 – Resultados cenário 1 | 58 |
| Tabela 6 – Resultados cenário 2 | 59 |
| Tabela 7 – Resultados cenário 3 | 59 |
| Tabela 8 – Análise de sensibilidade para a produtividade (t/h) | 62 |
| Tabela 9 – Análise de sensibilidade para a carga média (t) dos caminhões | 63 |
| Tabela 10 – Análise de sensibilidade para a utilização (%) | 65 |
| Tabela 11 – Análise de sensibilidade para a disponibilidade física (%) | 66 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|--------|----------------------------------|
| DF | Disponibilidade física |
| UT | Utilização física efetiva |
| HO | Horas em operação |
| HP | Horas programadas |
| HM | Horas em manutenção |
| P | Produtividade |
| M | Massa movimentada |
| EO | Eficiência operacional |
| ROM | <i>Run of mine</i> |
| Prod.r | Produção realizada |
| Prod.p | Produção planejada |
| MTBF | <i>Mean time between failure</i> |
| MTTR | <i>Mean time to repair</i> |
| Nf | Número de falhas |
| VPL | Valor Presente Líquido |

Sumário

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Meta | 17 |
| 1.2 | Objetivos específicos | 17 |
| 1.3 | Justificativa | 17 |
| 1.4 | Estrutura da dissertação | 18 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 | Planejamento de lavra | 19 |
| 2.1.1 | Planejamento de Longo Prazo | 20 |
| 2.1.2 | Planejamento de Médio Prazo | 20 |
| 2.1.3 | Planejamento de Curto Prazo | 21 |
| 2.2 | Mineração subterrânea | 22 |
| 2.3 | Método de realce por subníveis | 24 |
| 2.3.1 | Operações Unitárias | 25 |
| 2.3.2 | Desenvolvimento | 26 |
| 2.3.3 | Lavra | 28 |
| 2.3.4 | Projetos dos acessos de mina | 30 |
| 2.3.5 | Custos Operacionais | 32 |
| 2.4 | Equipamentos de carregamento e transporte | 34 |
| 2.4.1 | <i>LHD (Load Haul Dumper)</i> | 34 |
| 2.4.2 | Equipamento escavador carregador | 35 |
| 2.4.3 | Equipamento de transporte em minas subterrâneas | 36 |
| 2.5 | Dimensionamento de Frotas | 36 |
| 2.5.1 | Sistemas de gestão de frotas | 37 |
| 2.5.2 | Indicadores de transporte de mina | 38 |
| 2.5.2.1 | Tempos de Ciclo do caminhão | 38 |
| 2.5.2.2 | Disponibilidade Física (DF) | 39 |
| 2.5.2.3 | Utilização Física Efetiva (UT) | 39 |
| 2.5.2.4 | Produtividade (P) | 40 |
| 2.5.2.5 | Eficiência Operacional (EO) | 40 |
| 2.5.2.6 | <i>Mean time between failures</i> | 40 |
| 2.5.2.7 | <i>Mean time to repair</i> | 41 |
| 2.6 | Valor econômico dos blocos | 41 |
| 3 | METODOLOGIA | 43 |
| 3.1 | Estudo de caso | 44 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.2 | Coleta de dados | 45 |
| 3.3 | Análise estatística dos tempos de ciclo | 45 |
| 3.4 | Sequenciamento das atividades | 46 |
| 3.5 | Elaboração dos cenários | 49 |
| 3.6 | Análise de sensibilidade | 51 |
| 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 4.1 | Análise estatística dos tempos de ciclo | 52 |
| 4.1.1 | Tempos Fixos | 52 |
| 4.1.2 | Tempos Variáveis | 53 |
| 4.1.3 | Análise de desempenho dos equipamentos | 55 |
| 4.1.4 | Impacto da distância ao ponto de carga | 57 |
| 4.2 | Teste de cenários | 57 |
| 4.2.1 | Cenário 1 | 58 |
| 4.2.2 | Cenário 2 | 58 |
| 4.2.3 | Cenário 3 | 59 |
| 4.2.4 | Comparativo entre os cenários | 60 |
| 4.3 | Análises de sensibilidade | 61 |
| 4.3.1 | Produtividade | 61 |
| 4.3.2 | Carga média | 63 |
| 4.3.3 | Utilização Física | 64 |
| 4.3.4 | Disponibilidade Física | 65 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 68 |
| 5.1 | Conclusões | 68 |
| 5.2 | Trabalhos futuros | 69 |
| | REFERÊNCIAS | 70 |

1 Introdução

Diante do acelerado desenvolvimento da tecnologia, a indústria da mineração tem sido beneficiada pelo surgimento de sistemas versáteis que permitem melhorar o gerenciamento dos processos operacionais. Estas ferramentas computacionais, por meio da integração de dados de diferentes áreas, automatizam atividades consideradas repetitivas e, conseqüentemente, aumentam o tempo disponível para que os engenheiros possam desenvolver soluções técnicas para melhoria de eficiência dos processos produtivos (HEBERLE, 2013). Em um contexto de redução de disponibilidade de recursos minerais e variações significativas dos preços das commodities, destaca-se ainda mais a relevância de investimentos no gerenciamento de processos que possam aumentar a eficiência das operações e reduzir custos de produção dos empreendimentos mineiros.

Nesse cenário econômico competitivo, a quantificação e o dimensionamento de recursos necessários para atingir uma determinada capacidade produtiva, é um ponto fundamental para garantir o sucesso do empreendimento. É no âmbito do planejamento de lavra que são realizadas previsões de escala de produção e estimativas de custos. Os planos gerados nesta etapa devem considerar as restrições operacionais e os recursos disponíveis para determinar metas exequíveis. A execução das metas definidas nos planos de lavra depende das etapas de desagregação do material *in situ* e posterior carregamento e transporte do material para pilhas e/ou planta de beneficiamento. Sinteticamente, estas atividades compõem os processos de operação de lavra.

Dadas as estratégias de otimização de custos, o acompanhamento assíduo da eficiência dos processos por meio de indicadores de desempenho é fundamental para desenvolver melhorias e garantir o aperfeiçoamento contínuo (NADER et al., 2012). Os sistemas de gestão de frotas promovem vantagem competitiva por meio de soluções que permitem elevar o controle operacional dos processos. Indicadores coesos, que representem assertivamente a realidade dos processos estão diretamente relacionados à aderência dos planos de produção.

Sistemas de despacho são utilizados para alocação de equipamentos de produção e fornecimento de dados para avaliar os indicadores de gestão de frotas de transporte, carga, serviços auxiliares, entre outros. O desenvolvimento na área de tecnologia de informação permitiu um grande avanço nestes sistemas desde os anos 70. Atualmente, o mercado apresenta uma variedade significativa desses sistemas em termos de custo, possibilidade de incorporar sensores e complexidade dos algoritmos de alocação, entre outras funcionalidades. Ademais, o avanço da tecnologia no âmbito do planejamento de lavra permitiu que os softwares de planejamento incorporassem ferramentas capazes de absorver as premissas de

diferentes métodos de lavra, ciclos de operações e, conseqüentemente, planos de produção. Considerando as rotinas de elaboração dos planos de produção trimestrais e mensais, há uma necessidade de dinamizar a metodologia de avaliação da capacidade dos recursos existentes em um determinado plano de produção.

1.1 Meta

Analisar a adequação de frota para cenários de planejamento de curto prazo em mineração subterrânea com restrições operacionais condicionadas às metas de produção e avaliar o resultado de aderência dos planos.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos principais do trabalho são:

- (i) Avaliar a distribuição dos dados para determinação dos indicadores de desempenho operacional dos equipamentos de produção.
- (ii) Analisar a produtividade dos equipamentos de transporte de modo a quantificar o impacto causado pelas condições operacionais relacionadas à distância média de transporte.
- (iii) Desenvolver uma metodologia de dimensionamento dinâmico de equipamentos móveis adequando os planos de curto prazo aos indicadores de desempenho e realidade operacional para cumprimento de metas de produção e, conseqüentemente, melhorar a aderência dos planos de curto prazo.

1.3 Justificativa

Discrepâncias de resultados operacionais em relação às metas estabelecidas nos planos são frequentes em mineração. As dificuldades operacionais relacionadas com as frentes de lavra e suas características intrínsecas de teores e distância de transporte exigem que primeiramente sejam propostos planos equilibrados e compatíveis com a frota de equipamentos disponível e, em segundo lugar, que eles sejam adequados à realidade dos indicadores operacionais.

A geração de planos desequilibrados já nasce com um potencial de insucesso na medida em que os recursos operacionais disponíveis podem não ser suficientes para executar as metas propostas, configurando uma situação de subdimensionamento de equipamentos em relação ao plano. Por outro lado a proposição de planos "mágicos" com distâncias curtas

podem subutilizar a frota de equipamentos em determinados instantes ou, pior, podem ainda comprometer a possibilidade de compatibilizar planos futuros.

Baseado em um estudo de caso de uma mina subterrânea localizada no estado de Minas Gerais - Brasil, este trabalho propõe uma metodologia de análise e elaboração do plano de produção de curto prazo em detrimento aos equipamentos de transporte disponíveis de modo a compatibilizar as metas e os recursos operacionais.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. Neste primeiro capítulo o tema principal é apresentado por uma breve introdução, descrição dos objetivos e das justificativas do trabalho, além de um resumo da metodologia aplicada. Nos capítulos que seguem serão descritos os seguintes tópicos:

- Capítulo 2: revisão do estado da arte referente aos conteúdos: planejamento de lavra, sistema de carregamento e transporte e indicadores operacionais, e apresentação de conceitos fundamentais com relação ao tema proposto;
- Capítulo 3: descrição detalhada da metodologia aplicada;
- Capítulo 4: apresentação dos resultados por meio de análises e discussões;
- Capítulo 5: exposição dos resultados e sugestões para trabalhos futuros;

2 Fundamentação teórica

2.1 Planejamento de lavra

O planejamento estratégico de um empreendimento, em qualquer setor, visa à elaboração de planos e metas, que contemplem os objetivos da empresa no longo prazo. As estratégias de negócio podem estar relacionadas a fatores econômicos, sociais e ambientais. Objetivos comumente traçados pelos planos estratégicos são: maximização de benefícios, redução de custos, redução de riscos, fortalecimento da marca e absorção de mão de obra.

O planejamento de um empreendimento da indústria mineral não é um processo de fluxo contínuo, é um processo iterativo e dinâmico em que faz-se necessárias suposições iniciais para determinação de parâmetros, por exemplo, ritmos de produção, custos de capital e operacionais e disponibilidade de recursos conforme mostra a Figura 1. Ao avaliar os resultados encontrados, determina-se a conformidade destes com o objetivo inicial do projeto.

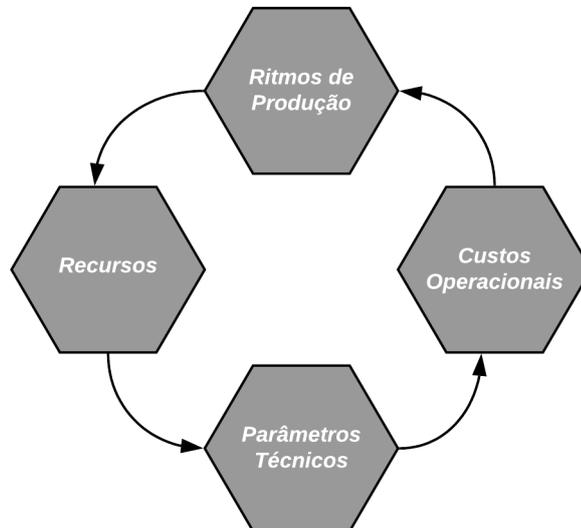


Figura 1 – Processo iterativo intrínseco ao planejamento de lavra.

Couzens (1979 apud HUSTRULID et al., 2013) propôs cinco regras para orientar um planejador:

- (i) Manter o foco nos objetivos pré-definidos levando em conta que se trata de estimativas de teor, projeções e geologia, e previsões econômicas. Estar sempre aberto a mudanças.

- (ii) Manter uma comunicação clara e objetiva durante a apresentação do plano. Se o plano não estiver claro para aqueles que tomam decisões e aqueles que devem executá-lo, o plano poderá ser mal interpretado ou ignorado.
- (iii) Lembrar que se trata de volumes de material que devem ser movimentados em uma sequência definida. A quantificação dos materiais é tão importante quanto a ordem dos eventos.
- (iv) Lembrar que se trata de tempo. Volumes são movimentados no tempo para atingir metas de produção. A produtividade determinará a eficiência e o custo do processo.
- (v) Buscar aceitação do plano, evidenciando a relação entre as premissas consideradas no plano e os objetivos do empreendimento.

O planejamento de lavra é fundamental na definição das estratégias da empresa e no detalhamento das atividades a serem realizadas. As atividades de planejamento se definem em três níveis distintos: planejamento de longo, médio e curto prazos.

2.1.1 Planejamento de Longo Prazo

Segundo Thorley (2012), é no planejamento de longo prazo que se define a vida útil da mina (*Life of Mine plan - LoMP*). A tomada de decisão tática é iniciada nesta etapa. Conforme Peroni (2011), no planejamento de longo prazo, temos como grande objetivo a definição dos limites lavráveis do depósito, determinando as reservas a partir da capacidade técnica, econômica e ambiental de extração dos recursos minerais disponíveis.

Segundo o mesmo autor, planos de longo prazo são normalmente desenvolvidos sobre informações exploratórias em uma densidade que permita realizar a classificação dos recursos em medidos, indicados e inferidos. Consequentemente, há uma progressão desta classificação de recursos medidos e indicados para reservas provadas e prováveis, uma vez comprovada a capacidade técnica e econômica da lavra e do processamento de parcela significativa do depósito, de modo que justifique o investimento e a viabilidade do projeto. Segundo Rossi & Deutsch (2014), modelos de longo prazo são geralmente atualizados uma vez ao ano, a partir das informações coletadas de novos furos de sondagem.

2.1.2 Planejamento de Médio Prazo

Conforme Peroni (2011), o planejamento de médio prazo é tradicionalmente aplicado sobre projetos em andamento, pois são diretrizes de prazos tipicamente de um a três anos. Nesse nível, são feitas as projeções de avanço fundamentadas em informações mais adensadas, pois sobre esses planos são feitas previsões orçamentárias, decisões sobre necessidades de liberação de áreas oneradas por limites de qualquer espécie e definições estratégicas de projeção de investimentos.

2.1.3 Planejamento de Curto Prazo

O planejamento de lavra de curto prazo pode compreender planos de lavra semestrais, trimestrais, mensais, semanais e diários. Um plano mensal, por exemplo, deve apresentar uma sequência de detalhamento das atividades a serem realizadas no período, bem como a alocação dos recursos necessários para executar cada uma das atividades no tempo requerido. Neste ponto, vale ressaltar que planos de curto prazo apresentam maior complexidade quando comparados com planos de longo prazo com relação ao sequenciamento das atividades em vista do detalhamento das operações unitárias.

Conforme Dimitrakopoulos & Jewbali (2013), enquanto a longo prazo o sequenciamento é realizado para maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto, o sequenciamento da produção de curto prazo se concentra em atender a meta de produção do plano de médio e longo prazos, considerando a capacidade do processamento da usina e o gerenciamento da qualidade do minério processado.

O desempenho da produção em curto prazo também é dependente do adensamento das informações geológicas, dados as amostras e sondagem de curto prazo. Após o modelamento, é realizada a entrega de um modelo geológico final para elaboração do projeto de perfuração dos blocos a serem lavrados. Nesse processo, uma grande variação das informações do modelo geológico de longo e curto prazo representam um desafio que compromete a aderência do plano de produção, podendo inviabilizar o atingimento das metas.

Para a elaboração de um plano factível, é de fundamental importância que as equipes dos setores de operação e manutenção estejam igualmente comprometidas com os objetivos, uma vez que a execução das atividades programadas depende do estado atual das frentes de serviço e calendário de preventivas dos equipamentos, por exemplo.

Conforme Thorley (2012), engenheiros responsáveis pelos planos de curto prazo devem resistir à tendência de realizar decisões estratégicas isoladas que podem ter impacto negativo no projeto como um todo. Priorizar minério de alto teor para atingir metas de produção e reduzir a extração de estéril para evitar as restrições da planta, são dois exemplos de estratégias que podem aumentar o lucro em um curto prazo, porém, podem estar em inconformidade com as estratégias de longo prazo.

Na elaboração de um plano de lavra, é necessário considerar a oscilação (variabilidade) das distâncias e dos tempos que influenciam diretamente na produtividade horária dos equipamentos. O plano deve contemplar possíveis interferências que comprometem a sua exequibilidade, como, por exemplo, prováveis aumentos de DMT e oscilações do tempo de ciclo, aumentando, assim, a aderência entre a capacidade das frotas e as metas de qualidade e produção previstas no plano.

Para o sequenciamento das atividades, faz-se necessário a simulação, em que,

considerando premissas, por meio de um algoritmo, busca-se o atingimento das metas. Conforme Hustrulid & Bullock (2001), simulação pode ser entendida como uma estrutura para descrever um sistema operacional. Descrever um sistema utilizando esta estrutura pode ser muito benéfico mesmo se o modelo nunca foi utilizado para experimentos e poderia ainda ser muito benéfico se o modelo nunca foi implementado.

2.2 Mineração subterrânea

Uma das primeiras referências bibliográficas sobre a atividade de mineração subterrânea é o livro *De Re Metallica*, escrito por Agricola (1556). Agricola, considerado o pai da mineralogia, detalha neste livro a geologia dos corpos de minério, exploração, construção de mina, bombeamento e ventilação. O livro, originalmente escrito em latim, foi traduzido no ano de 1912 por Hebert Clark Hoover e Lou Henry Hoover. Segundo Hoover (1909), a atividade de desenvolvimento em uma mina subterrânea tinha duas funções: procurar por minério e estruturar as vias de extração do mesmo. Na época, no início do século XX, o processo de exploração mineral era extremamente custoso e gerava estimativas de grande incerteza.

Tendo em vista os diferentes métodos de lavra existentes, ainda que possa ser arriscado tentar prever tendências futuras, há um indicativo de aumento do número de minas subterrâneas. As causas incluem: aumento da profundidade dos depósitos, reduzida mobilidade de equipamentos de lavra a céu aberto, aumento das restrições ambientais e avanços promissores em equipamentos adaptados para mineração subterrânea (HARTMAN, 1987).

Conforme Martino et al. (2021), em se tratando da extração de metais básicos e ouro, a produção total de ROM (*Run of Mine*) das minas subterrâneas representa 12% da produção mundial, ao passo que, considerando o número total de minas no mundo, 43% operam por métodos subterrâneos. A Figura 2 apresenta a distribuição dos métodos de lavra subterrâneos segundo estas duas classificações.



Figura 2 – Distribuição dos métodos de lavra subterrâneos no mundo (MARTINO et al., 2021)

O processo de tomada de decisão do método de lavra está relacionado essencialmente à geologia do depósito mineral. O método escolhido é o correspondente ao de menor custo, e deve estar em conformidade com a segurança dos trabalhadores e os impactos ambientais. A escolha do método de lavra tem alto impacto no futuro do projeto, pois está diretamente relacionada à viabilidade econômica do empreendimento. É a partir da escolha do método de lavra que é possível estabelecer a configuração da mina, escolher os equipamentos e realizar a avaliação econômica do projeto.

Hartman (1987) menciona que os fatores que devem ser analisados para definição do método de lavra podem ser divididos em seis tópicos:

- (i) Características espaciais do depósito: tamanho (dimensões), forma, inclinação e profundidade.
- (ii) Condições geológicas e hidrológicas: mineralogia, composição química, estrutura do depósito (dobras, falhas, descontinuidades e intrusões), planos de fraqueza (juntas e fraturas), uniformidade da rocha (intemperismo) e presença de água.
- (iii) Propriedades geomecânicas: propriedades elásticas, comportamento plástico ou viscoso, estado de estresse, consolidação, compactação e competência e outras propriedades físicas (permeabilidade, porosidade, etc).
- (iv) Fatores econômicos: reservas (massa e teor), taxa de produção, tempo de vida da mina e custos.
- (v) Limitações tecnológicas: recuperação de lavra, diluição da planta, flexibilidade de alteração do método, seletividade, capacidade de operar frentes simultaneamente e capacidade de automatizar e mecanizar as operações.
- (vi) Restrições ambientais e sociais: controle de subsidência do solo, controle da qualidade do ar, disponibilidade de mão de obra, políticas de saúde e segurança ocupacional.

A Tabela 1 apresenta as principais empresas produtoras de ouro do Brasil em 2020 considerando a participação percentual da empresa no valor total da comercialização da produção mineral desta substância, segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2021, publicado pela Agência Nacional de Mineração (ANM):

Tabela 1 – Principais empresas produtoras de ouro no ano de 2020.

| Empresa | Método | Participação (%) | Cidade |
|---|---|------------------|------------------------------|
| Kinross Brasil Mineração | Céu aberto | 20.9 | Paracatu - MG |
| Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S.A. | Realce por subníveis | 14.7 | Santa Bárbara - MG |
| Jacobina Mineração Comércio LTDA | Realce por subníveis | 6.81 | Jacobina - BA |
| Mineração Aurizona S.A. | Céu aberto | 5.06 | Godofredo Viana - MA |
| Mina Tucano LTDA | Céu aberto | 4.79 | Pedra Branca do Amapari - AP |
| Mineração Serra Grande S.A. | Realce por subníveis / Corte e enchimento / Câmaras e pilares | 4.68 | Crixás - GO |

Segundo Nery & Silva (2001), o método de lavra de realce por subníveis é um dos métodos predominantes nas minas subterrâneas brasileiras. Este método é utilizado para lavar depósitos minerais com as seguintes características: ângulo de mergulho variando entre 45° e 90°, rocha estável no *footwall* e *hanging wall* (encaixantes), rocha do minério competente (resistente) e limites regulares com as rochas encaixantes (HUSTRULID; BULLOCK, 2001).

2.3 Método de realce por subníveis

De acordo com Darling (2011), o método de realces por subníveis destaca-se por ser favorável a altas taxas de produção, uma vez que é apropriado à mecanização e podem ser operados vários subníveis simultaneamente. Ademais, é considerado um método seguro condicionado pela resistência das rochas do depósito. Uma configuração comumente encontrada nas minas que utilizam este método está apresentada na Figura 3, de acordo com este exemplo, galerias posicionadas dentro da lente de minério são necessárias para o posicionamento dos equipamentos de perfuração radial (*Fandrill*). Após a perfuração e detonação, o material é carregado e transportado em galerias que estão localizadas no subnível de base do painel.

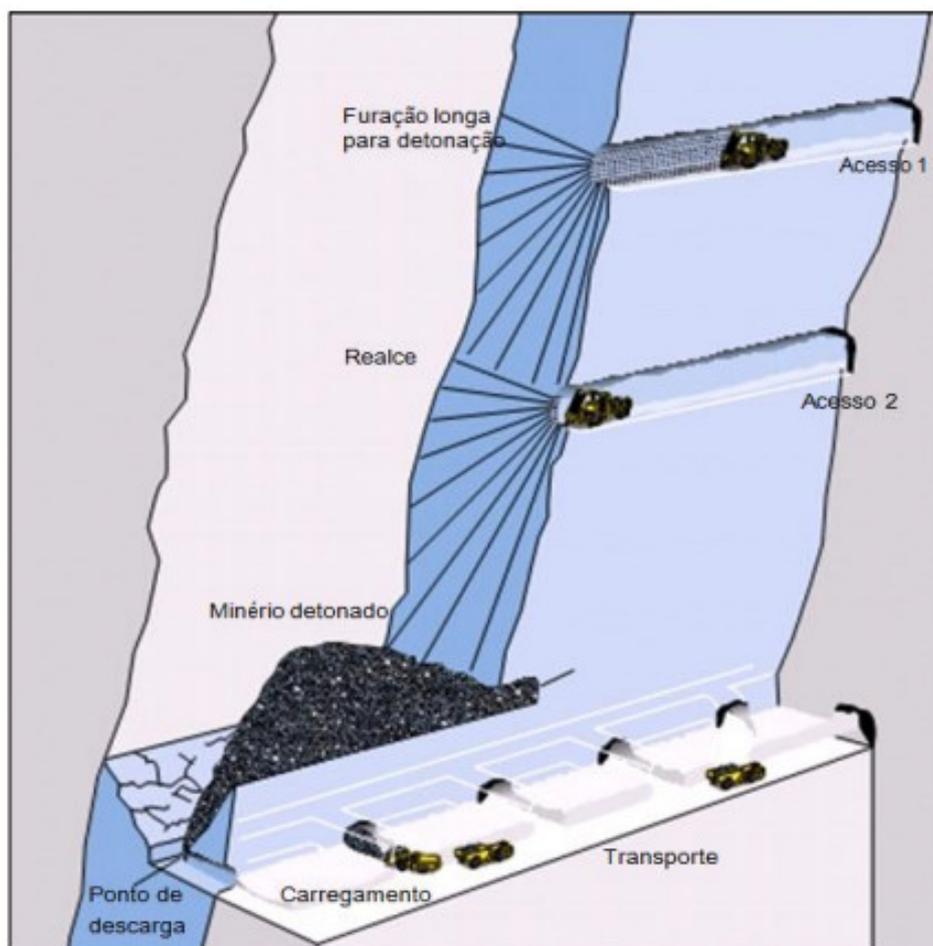


Figura 3 – Configuração característica de uma operação por método de realce por subníveis. Adaptado de Darling (2011)

Conforme Gertsch & Bullock (1998) a produção de minério em cada subnível é realizada quase que exclusivamente por perfuração longa, a partir de leques (perfuração radial). Em locais em que a lente de minério apresenta-se em veios estreitos, a galeria pode estar completamente encaixada, e assim, fornecer a superfície necessária para perfuração de furos paralelos.

2.3.1 Operações Unitárias

Os avanços em uma mineração subterrânea geralmente são realizados por meio do método perfuração-desmonte e podem ser classificadas entre desenvolvimento e lavra. De modo geral, a sequência de operações é composta por perfuração, desmonte com explosivos, carregamento e transporte, saneamento (abatimento de choço), contenção e medição topográfica, como mostra a Figura 4. Esta seção detalha as atividades realizadas nos ciclos de desenvolvimento e lavra em uma mina que opera pelo método de realce por subníveis. Tal ciclo não é único e pode ser realizado de formas distintas entre as minas que operam por esse método.

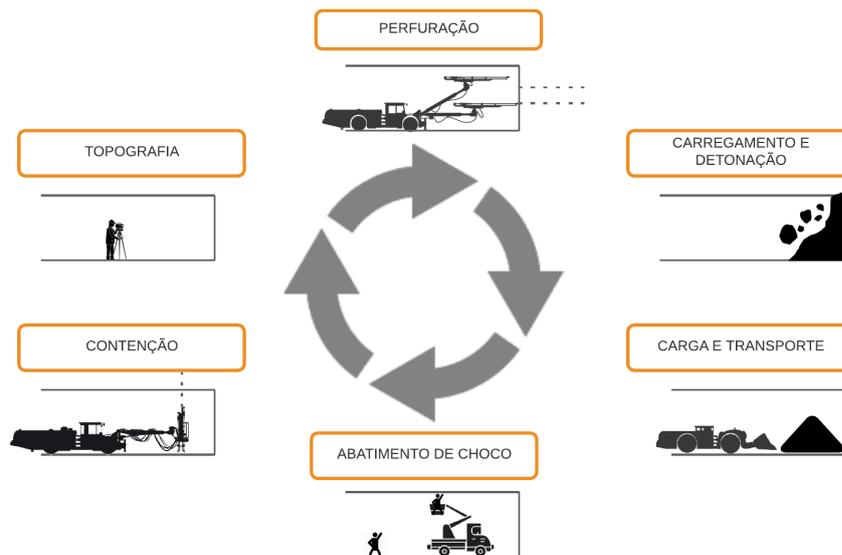


Figura 4 – Ciclo de operações unitárias típicas de mina subterrânea

2.3.2 Desenvolvimento

As operações de desenvolvimento são realizadas para escavar as aberturas que dão acesso ao corpo de minério. Estas estruturas podem ser classificadas em desenvolvimento primário, que são aquelas consideradas permanentes e que requerem alto nível de segurança, como por exemplo rampas e poços de ventilação, e desenvolvimento secundário, que são as estruturas de acesso ao corpo de minério nos níveis e subníveis (DARLING, 2011). Existem também as galerias destinadas às áreas de apoio à atividade de exploração, que são as estruturas de subestações de energia elétrica, poços coletores e pontos de carga, por exemplo. Estas, podem ser classificadas como desenvolvimento primário e secundário, dependendo da sua alocação.

O processo de desenvolvimento de uma frente se inicia com a perfuração frontal. Esta operação é executada por jumbos, equipamentos que possuem uma a três perfuratrizes rotoperçussivas. As perfuratrizes são acopladas a braços hidráulicos com uma lança capaz de avançar e recuar as hastes em direção à frente de serviço conforme pode ser observado na Figura 5.

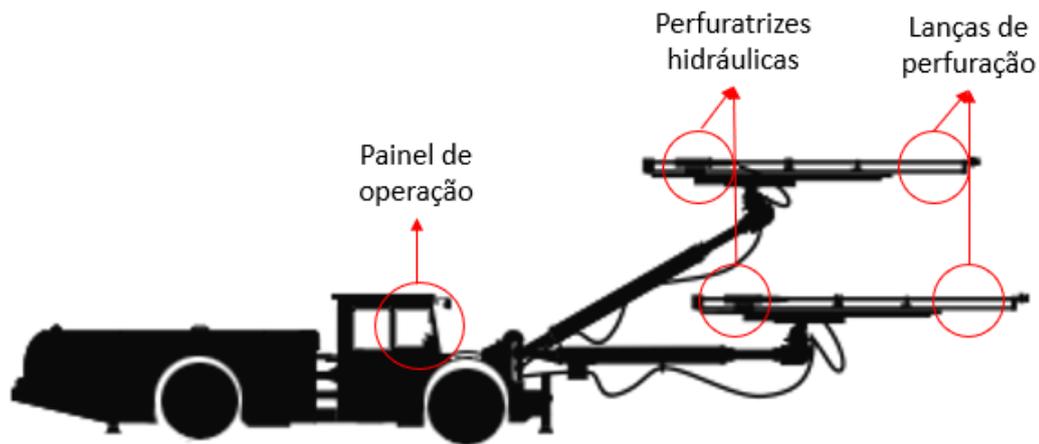


Figura 5 – Jumbo de perfuração com duas perfuratrizes

Após a perfuração da face, é realizado o carregamento dos furos com explosivos. Para o carregamento dos furos na parte superior da frente, faz-se necessária a utilização de um equipamento com um cesto acoplado para elevação do operador. Esta etapa do processo é realizada por *blasters*, profissionais que possuem habilitação para o manuseio e detonação de explosivos. Após a detonação, a galeria permanece sem atividade durante, no mínimo, uma hora para que ocorra a exaustão dos gases.

Finalizada a detonação, inicia-se o carregamento do material desmontado por carregadeiras do modelo LHD (*Load-Haul-Dump*) em caminhões. Os caminhões basculantes transportam o material até as pilhas de estéril ou minério, dependendo do teor do material. Posteriormente, as rochas que compõem a galeria são umidificadas com água de modo a aumentar a visibilidade do maciço e inicia-se a etapa de saneamento de blocos instáveis no teto e nas laterais da galeria. Esta instabilidade é causada pela detonação e pelo relaxamento natural do maciço, por segurança este procedimento deve ser realizado de forma que o operador mantenha uma distância mínima dos blocos, distância esta definida previamente.

Esta etapa pode ser realizada manualmente, em que o operador do piso ou elevado pelo cesto de uma plataforma realiza o abatimento de chocho com alavanca, e pode ser realizada de forma mecanizada com equipamento chamado *scaler*. Este é dotado de um braço mecânico longo, o que permite o distanciamento maior entre o operador e os blocos instáveis, conseqüentemente concedendo maior segurança à atividade.

É iniciada então a etapa de contenção da galeria, em que, seguindo o projeto elaborado pela equipe de geomecânica, o operador de jumbo realiza a perfuração do teto e da lateral da galeria para a instalação das contenções previstas. O encerramento do ciclo é marcado pela atuação das equipes de topografia e geologia. A equipe de topografia efetua o levantamento topográfico e/ou escaneamento, que possibilita a obtenção da geometria

pós-detonação da galeria. Estas informações são importantes para avaliar se a direção, o ângulo e a distância de avanço da frente estão em concordância com o projeto. A equipe de geologia realiza a coleta das amostras de galerias classificadas como regiões de desenvolvimento produtivo.

2.3.3 Lavra

As operações de lavra estão diretamente ligadas à extração de minério do corpo mineralizado. Os realces que estão disponíveis para o início das atividades de lavra, ou seja, que não dependem mais do desenvolvimento de galerias, compõem o minério liberado da mina. Conforme Fontoura (2017), durante o processo de sequenciamento de lavra deve ser considerada uma quantidade mínima de minério liberado para garantir, até certo ponto, a flexibilidade das operações. Em caso de eventos em que há uma repentina redução da disponibilidade física de uma frota de desenvolvimento, por exemplo, a produção pode não ser impactada se a quantidade de minério liberado for suficiente para suprir o período.

O processo de lavra se inicia com o cabeamento, que consiste na perfuração, instalação e injeção de cabos na região do bloco a ser lavrado. Esta operação garante maior estabilidade das rochas encaixantes, reduzindo a possibilidade de diluição do minério.

Em seguida, é realizada a perfuração dos furos que darão origem à face livre (*slot*) e dos leques de detonação, podendo ser de furos ascendentes, quando o equipamento está posicionado em galeria inferior ao bloco a ser lavrado, ou por furos descendentes, quando o equipamento está posicionado sobre o bloco a ser lavrado.

Os *fandrills* são os equipamentos utilizados para realizar a perfuração de blocos de lavra no método de realce por subníveis. Estas máquinas, montadas sobre trilhos ou pneus, possuem conjuntos de unidades de perfuração com flexibilidade de rotação, grande inclinação e ângulos de giro, capazes de realizar a perfuração radial dos leques conforme mostrado na Figura 6.

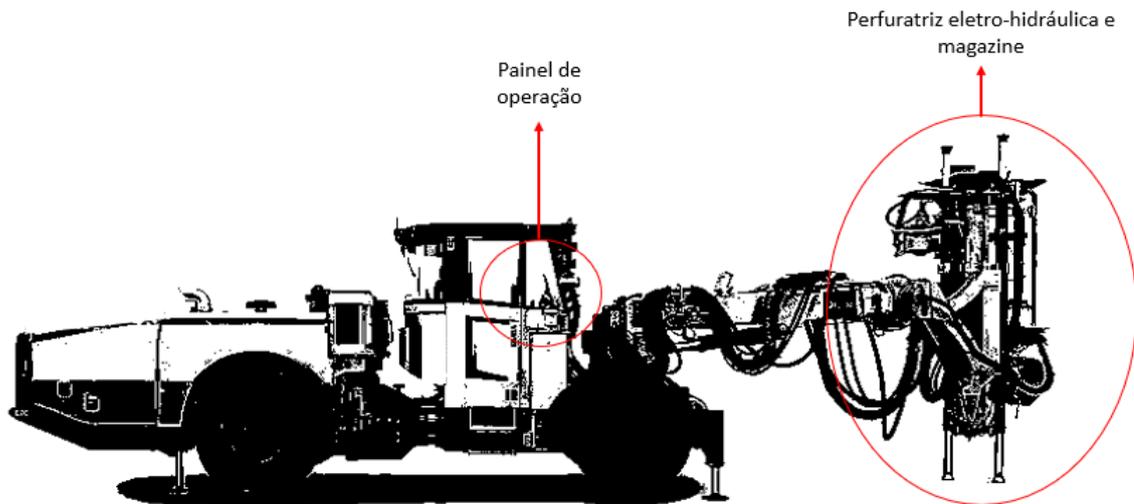


Figura 6 – Fandrill de perfuração

Após a perfuração dos leques é realizado o carregamento dos furos com explosivo. No caso de furos descendentes é necessário criar uma superfície de retenção do explosivo (emulsão) no fundo do furo, o que geralmente é feito com o uso de explosivo encartuchado.

Semelhante ao que ocorre em operações de desenvolvimento, posteriormente à detonação, as rochas próximas ao desmonte de rocha são umidificadas e é realizado o saneamento dos blocos instáveis. O saneamento é realizado considerando uma distância previamente definida, de modo que não ocorra a entrada de pessoas em realce aberto, devido à falta de contenção e instabilidade das rochas neste local.

É iniciado então o carregamento do material por meio de carregadeiras do tipo LHD. Conforme mostra a Figura 7, em um carregamento convencional, o operador de carregadeira se mantém posicionado sob galeria contida e utiliza um controle remoto para acessar e carregar o material dentro do realce, à distância, e ao aproximar o equipamento da sua posição, entra na cabine para realizar o basculamento da carga no caminhão.



Figura 7 – Carregamento de minério por meio do controle remoto
Fonte: Hard-Line (2022)

Após o carregamento do minério, é realizada a atividade de escaneamento da região do realce lavrado. É a partir deste escaneamento que são realizadas as estimativas de recuperação e diluição do bloco lavrado. A última etapa do ciclo de lavra, está relacionada ao enchimento do realce. O enchimento pode ser realizado com *rockfill* (material estéril), originado das operações de desenvolvimento, ou com o uso de *pastefill*. Este, é constituído por uma mistura de cimento e rejeito do processo de beneficiamento. A escolha do material de enchimento depende, principalmente, das condições geomecânicas do local, e da sequência de lavra.

2.3.4 Projetos dos acessos de mina

Distintamente de uma mina a céu aberto, em uma mina subterrânea o fluxo de equipamentos e pessoas tem diversas restrições, considerando o posicionamento e a dimensão das galerias e dos realces. A alteração do posicionamento de rampas e acessos requer períodos de tempo longos, e essa reduzida flexibilidade gera um aumento da complexidade com relação à tomada de decisão dos projetos de médio e longo prazo. Portanto, com a configuração das estruturas definidas, é mais simples readequar o tipo e número de equipamentos que acessam as galerias e dos realces do que reestruturá-los.

Conforme Hartman (1987), no projeto de uma mina subterrânea, o número de acessos principais é função, primeiramente, dos requisitos legais relacionados à segurança e ventilação, e em segundo plano da adequação da estrutura à atividade, considerando taxa de produção e a relação espacial do depósito mineral. Se o depósito será lavrado em múltiplos níveis, a distância entre níveis deve ser determinada de modo que a produção

esteja relacionada com o menor custo operacional segundo Lewis & Clark (1964 apud HARTMAN, 1987).

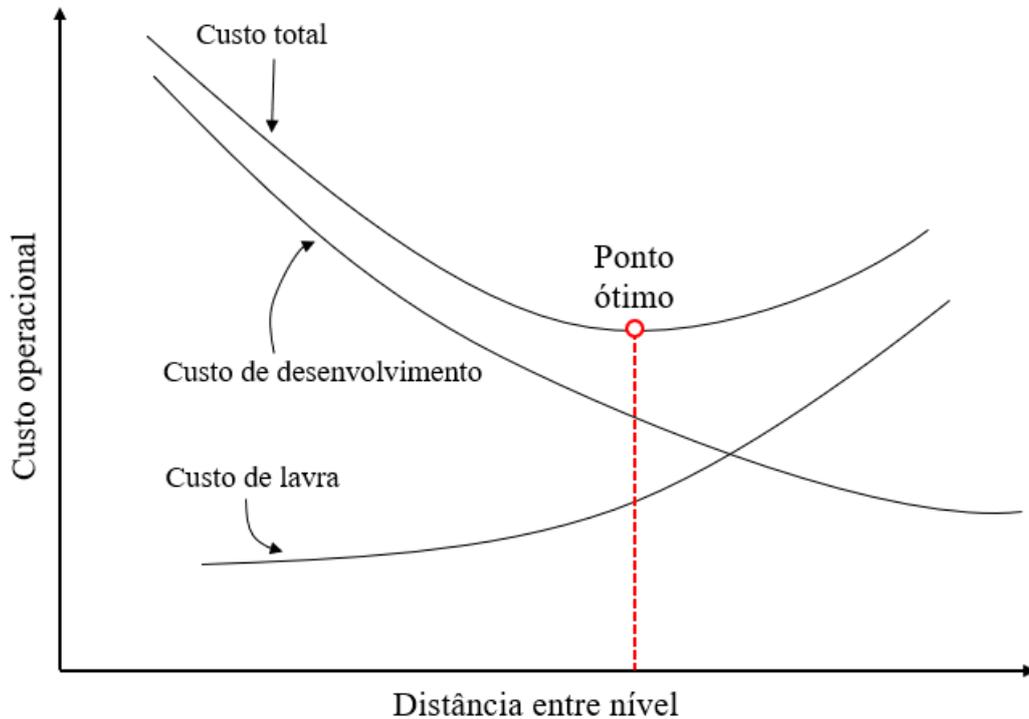


Figura 8 – Análise da distância entre nível em comparação ao custo operacional. Fonte: Adaptado de Hartman (1987)

Como pode ser observado na Figura 8, os custos de desenvolvimento (construção e equipagem) aumentam proporcionalmente ao número de níveis requeridos. Por outro lado, os custos de lavra (produção e escoamento do minério e fornecimento de operações auxiliares como ventilação, drenagem e energia elétrica) diminuem com o aumento do número de níveis requeridos de acordo com Lewis & Clark (1964 apud HARTMAN, 1987).

O minério é perfurado e detonado a partir dos acessos nos subníveis posicionados dentro do corpo de minério. Quebrado em grandes fatias verticais, o minério cai ao fundo do realce, onde pode ser recuperado e transportado para fora da mina (GERTSCH; BULLOCK, 1998).

Conforme Gertsch & Bullock (1998), são necessários os seguintes desenvolvimentos no método de realces por subníveis:

- (i) O acesso de transporte deve ser desenvolvido abaixo da superfície do realce no nível principal.
- (ii) Poços de ventilação devem ser desenvolvidos para fornecer acesso aos subníveis e subsequentes desenvolvimentos daqueles subníveis.

- (iii) Acessos para perfuração devem estar posicionados através do corpo de minério nos subníveis.
- (iv) O pré-corte deve ser realizado na superfície inferior do realce.
- (v) O sistema dos pontos de carregamento deve ser desenvolvido para permitir que a etapa de carregamento e transporte seja realizada em segurança.
- (vi) O slot deve ser perfurado no realce pois é a abertura de face livre que auxiliará na detonação do bloco.

Conforme Hartman (1987), neste método de lavra de alargamentos autossuportantes as pessoas não ficam expostas próximas ao realce, uma vez que as equipes de carregamento de explosivo e detonação trabalham em uma área contida nos acessos dos subníveis e as operações de carregamento e transporte trabalham em segurança na galeria de transporte. Segundo Hustrulid & Bullock (2001), por razões de segurança, o carregamento do material é conduzido dentro do realce por controle remoto por um operador que fica posicionado dentro da galeria de acesso.

Podem ser construídas galerias de pontos de carga, estas são galerias com seção de maiores dimensões, pois as dimensões devem possibilitar o basculamento de um caminhão. Tais galerias ficam posicionadas, geralmente, nos acessos ao corpo de minério, próximas à galeria de transporte deste material. São estruturas importantes na etapa de carregamento e transporte, uma vez que permitem a redução do tempo de carregamento do caminhão, consequentemente, aumentando a produtividade destes equipamentos.

2.3.5 Custos Operacionais

As operações de desenvolvimento neste método são consideradas lentas e complexas, ocasionando um custo operacional elevado. Entretanto, uma porcentagem significativa das operações de desenvolvimento pode ser realizada dentro da estrutura do corpo de minério.

A proporção do custo de transporte com relação ao custo operacional total pode variar amplamente devido a alguns fatores como método de lavra, profundidade da mina e distância em que os materiais são transportados com cada tipo de equipamento. Porém, é conhecido que os custos de transporte representam uma porção significativa dos custos operacionais. Gertsch & Bullock (1998) citam o exemplo de uma mina que opera pelo método de realce por subníveis, e apresenta a distribuição dos custos de lavra conforme a Figura 9. Neste exemplo, o minério é transportado até a planta metalúrgica por trens, poços de elevação e correias transportadoras e o custo de carregamento e transporte representa 20% do total do custo referente às atividades de lavra.

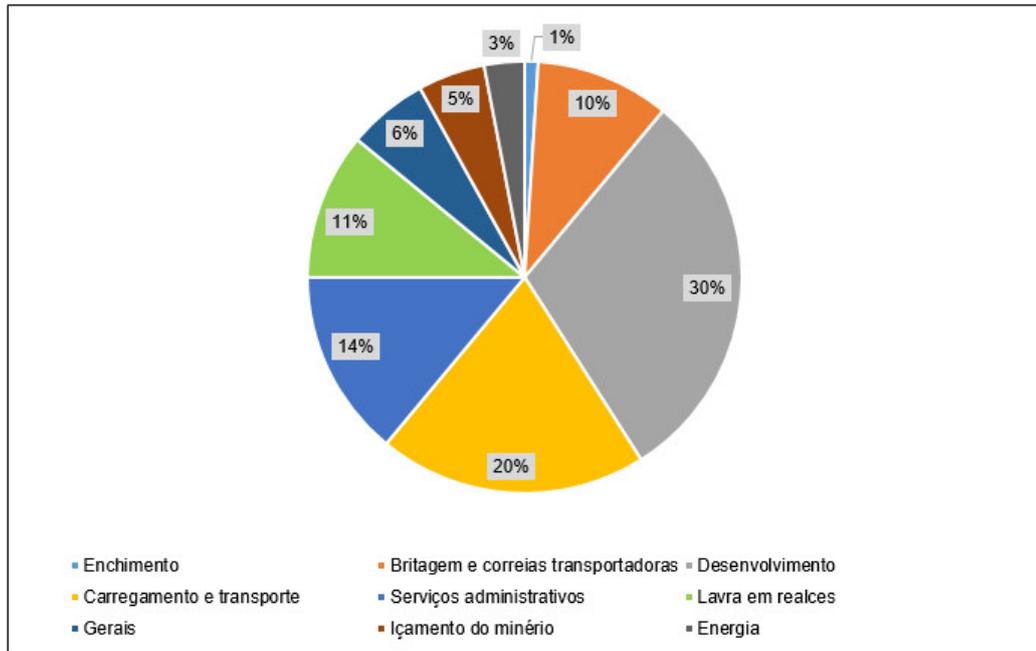


Figura 9 – Classificação dos custos operacionais de lavra em mina com sistema de transporte por trens e içamento do minério. Fonte: Adaptado de Gertsch & Bullock (1998)

Hustrulid & Bullock (2001) apresentam outro exemplo de uma mina localizada no Chile que opera pelo método de realce por subníveis em que o transporte de minério é realizado por caminhões de 50 toneladas e o custo de transporte representa 11% dos custos operacionais. A classificação dos custos operacionais por setor desta mina é mostrada na Figura 10.

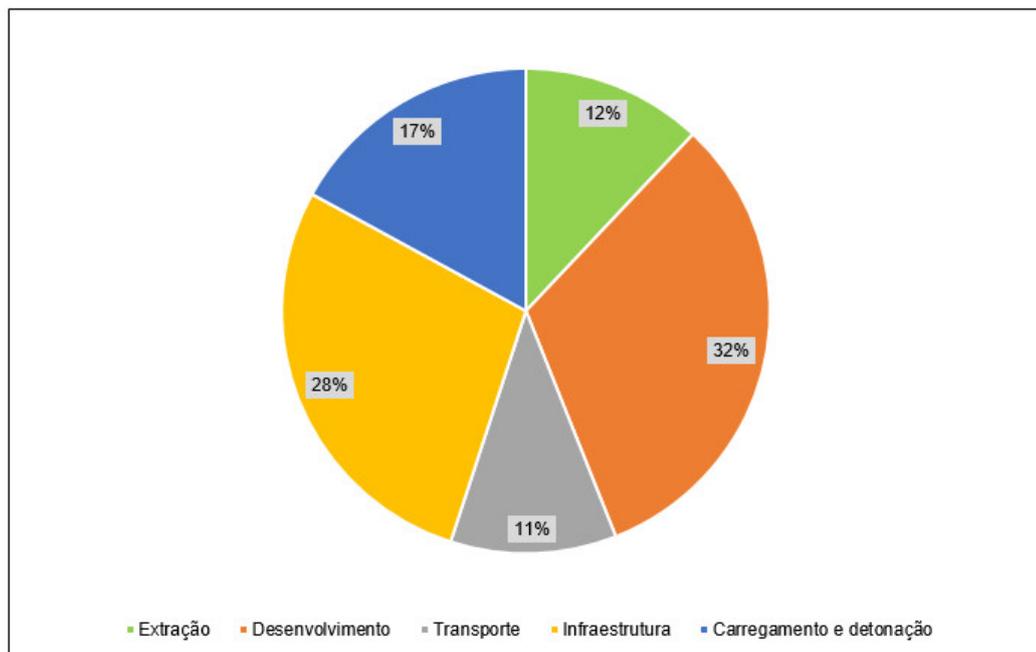


Figura 10 – Classificação dos custos operacionais de lavra em mina com sistema de transporte por caminhões. Fonte: Adaptado de Hustrulid & Bullock (2001)

É importante destacar que o perfil de custos de cada mina depende de diversos fatores como por exemplo, equipamentos utilizados e localização da mina, no entanto, pode-se comparar os custos aplicados de modo a buscar o entendimento da representatividade deste no custo operacional total do empreendimento. Tendo em vista os diversos desafios do setor e por se tratar de equipamentos com altos custos de investimento e de operação, muitas empresas têm buscado aplicar intensivamente programas de melhoria contínua, de modo a alcançar ganhos em segurança, aumento de produção, redução de custos e redução do impacto ambiental (COUTINHO, 2017).

Além da combinação correta dos equipamentos, estes devem ser compatíveis com o ambiente em que serão inseridos e devem ter, em conjunto, capacidade de satisfazer as metas de produção. A compatibilidade entre o equipamento e o ambiente de operação está diretamente relacionada com as dimensões do equipamento e as características mecânicas. Fazem parte das restrições operacionais de equipamentos de minas subterrâneas, por exemplo, o raio de curvatura do equipamento e a tração necessária para transportar cargas em rampas de alta inclinação.

2.4 Equipamentos de carregamento e transporte

2.4.1 *LHD (Load Haul Dumper)*

LHD são equipamentos com capacidade para carregar, transportar e descarregar o material. Como mostra a Figura 11, devido à característica de carregadeira rebaixada e ao recurso de articulação central, a máquina tem alta capacidade de manobra e um pequeno raio de giro, e, por esse motivo, é considerada um equipamento de carregamento mais adequado às restrições dimensionais de galerias subterrâneas.

De acordo com as características da mina, a carregadeira do tipo *LHD* pode utilizar o movimento de basculamento da concha para descarregar o material em pontos de estocagem ou em caminhões que realizam o transporte através de rampas. A capacidade da concha pode variar de 10 a 21 toneladas.

Conforme Paiva (2016), algumas alternativas para agregar segurança, produtividade e controle sobre o processo são: controle remoto para operação à distância em linha de visão, tele operação mediante infraestrutura de comunicação de dados e até mesmo operação autônoma.



Figura 11 – Epiroc ST14 - carregadeira do tipo LHD com capacidade de carga útil de 14t (EPIROC, 2021)

De acordo com MineWiki (2019), os pneus podem representar 10% a 20% do custo total de operação devido à frequência de substituição, que geralmente está entre 75 a 1000 horas. É essencial que a superfície de trabalho seja lisa, nivelada e seca para o ideal desempenho deste equipamento. A drenagem e a manutenção das estradas são necessárias para mitigar os danos nos pneus e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais.

2.4.2 Equipamento escavador carregador

Equipamentos escavadores carregadores são equipamentos sobre rodas ou esteiras com caçamba frontal para escavar e carregar o material. A caçamba pode ser elevada por meio de um sistema de braços articulados possibilitando o despejo do material em equipamento de transporte.

Devido às suas dimensões, este equipamento é mais comumente utilizado em minas a céu aberto, entretanto, pode ser utilizado em locais específicos das minas subterrâneas, onde há alteamento do teto.



Figura 12 – Caterpillar 950CG - pá carregadeira com capacidade da caçamba de 2,5 a 4,4m³ (CATERPILLAR, 2021)

2.4.3 Equipamento de transporte em minas subterrâneas

Conforme MineWiki (2019), existem três principais tipos de caminhões comumente utilizados em mineração: caminhões articulados, caminhões rígidos e caminhões de reboque com sistema de basculamento lateral. Os caminhões articulados são os mais utilizados em ambiente subterrâneo devido a sua adaptabilidade em solo irregular e raios de giros menores. A Figura 13 mostra um exemplo de caminhão articulado.



Figura 13 – Volvo A30G - caminhão articulado com capacidade de carga útil de 29t (VOLVO, 2021)

2.5 Dimensionamento de Frotas

É fundamental que no dimensionamento dos equipamentos cada equipamento seja compreendido como peça única de um sistema em que a sua eficiência em determinada função depende diretamente das interações que ocorrem entre todos os equipamentos. Conforme Gertsch & Bullock (1998), a versatilidade, flexibilidade, e a grande potência dos equipamentos da mineração e construção não apenas cria uma variedade de possibilidades para o dimensionamento de equipamentos com relação a tamanhos e marcas, mas também uma aplicação para cada atividade específica que deve ser realizada. Sempre existiram níveis de flexibilidade na mineração sem transporte sobre trilhos, e esta é a primeira razão pela qual isto se desenvolveu.

Considerando a alta produtividade do método de realce por subníveis, é importante considerar a compatibilidade e flexibilidade operacional. No caso de uma frota não homogênea, os equipamentos poderão apresentar baixa produtividade devido à impossibilidade de operar em determinadas frentes.

Segundo Darling (2011), tipicamente a meta para carregamento de um caminhão é de 3 a 5 passes do equipamento de carregamento. Com escavadeiras hidráulicas e pás carregadeiras, o intervalo é de 4 a 7 passes. Com escavadeiras elétricas a cabo, o intervalo

é de 3 a 4 passes. Se o equipamento de transporte é carregado com menos passes, a grande quantidade de material despejado em uma única vez pode causar estresse excessivo nos pneus e componentes estruturais do caminhão. Se este for carregado com mais passes, há um tempo de carregamento excessivo, gerando ineficiência.

De acordo com Gertsch & Bullock (1998), ainda que o equipamento foi selecionado e tem sido utilizado, as condições da mina mudam no tempo, devido a uma constante variação do comprimento dos acessos e também da disposição do corpo de minério. Conforme Lopes (2010), observa-se que para se manter uma produção constante requerida ao longo do tempo de vida das minas pode-se lançar mão de duas ações: aumentar o número de caminhões da frota ou alterar o modelo por capacidades maiores mantendo o mesmo número de caminhões anteriores. O tamanho do equipamento de carga poderá ou não acompanhar o aumento da capacidade dos caminhões.

Segundo Gertsch & Bullock (1998), para qualquer condição do sistema de carregamento e transporte, isto é, distância, declividade, condições da rampa, técnica do operador, etc., existe apenas um método de baixo custo. Portanto, para que este método seja planejado e executado, é fundamental que todas as informações relacionadas aos indicadores operacionais dos equipamentos de carregamento e transporte estejam disponíveis em um banco de dados e possam ser analisados.

2.5.1 Sistemas de gestão de frotas

Segundo Junior (2014), a primeira instalação de um sistema computadorizado de despacho registrado ocorreu em 1979, na mina de cobre chamada Tyrone, próxima à cidade de Silver City, estado do Novo México, nos Estados Unidos. Inicialmente, devido ao alto custo de implementação, estes sistemas eram acessíveis apenas a minas de grande porte, entretanto, com o desenvolvimento da indústria de tecnologia e automação, estes sistemas se tornaram mais acessíveis aos empreendimentos de médio e pequeno porte.

Atualmente o mercado apresenta uma ampla variedade de sistemas de gestão de frotas, e a decisão pelo software mais adequado requer um estudo de viabilidade detalhado para avaliação dos custos de aquisição e manutenção do sistema em comparação com os ganhos esperados por meio da otimização dos processos. O presente projeto é aplicado a uma mina subterrânea que utiliza o software de despacho *Mining Control* para obter os indicadores de operação. Dentre os métodos de alocação de equipamentos, este sistema de despacho é classificado como um sistema que depende basicamente da atuação manual do operador (do equipamento e/ou operador de sala de controle).

Conforme Pinto (2007), trata-se de uma prática padrão de alocações de caminhões, no qual o controlador de despacho, que fica localizado em um ponto estratégico da mina (onde possa ter uma visão abrangente da mina), toma decisões com base na situação por

ele presenciada e também com base em sua experiência e envia as instruções por rádios transmissores aos equipamentos de carga e transporte. Em uma mineração subterrânea sem rede de comunicação *Wi-Fi*, onde a visão do controlador é limitada, as informações em tempo real são limitadas aos rádios transmissores.

2.5.2 Indicadores de transporte de mina

Os indicadores são fundamentais para quantificar a eficiência dos recursos e, consequentemente, mensurar a necessidade desses ativos no sistema de produção. *KPI* é uma sigla para o termo em inglês *Key Performance Indicator*, conhecida como Indicador Chave de Desempenho, que se refere à quantificação do desempenho de um processo com relação as estratégias pré-definidas.

Esses indicadores são a base para o gerenciamento das atividades facilitando a tomada de decisão em busca do atingimento das metas. Conforme Caldeira (2012), o gestor que não é capaz de medir o seu desempenho também não é capaz de geri-lo e, desde logo, estará impedido de melhorar o seu desempenho.

No método de realce por subníveis, as operações de perfuração, detonação e transporte são independentes e a utilização física dos equipamentos é alta. Bons resultados podem ser obtidos com poucas unidades de equipamentos e baixo quadro de pessoal, em comparação com outros métodos de lavra (GERTSCH; BULLOCK, 1998).

É importante salientar que os dados utilizados para calcular todos os indicadores devem ser obtidos com alto índice de confiabilidade. Dados inadequados, que não refletem a realidade da operação podem gerar planos de ação errôneos e/ou com metas ineficazes.

2.5.2.1 Tempos de Ciclo do caminhão

O ciclo de um caminhão é composto por oito etapas. Quatro são classificadas como tempos fixos, são elas: manobra de carregamento, carregamento, manobra de basculamento e basculamento. Os tempos variáveis são relacionados ao deslocamento do equipamento, etapas conhecidas como trânsito vazio e trânsito cheio e as filas de carregamento e basculamento.

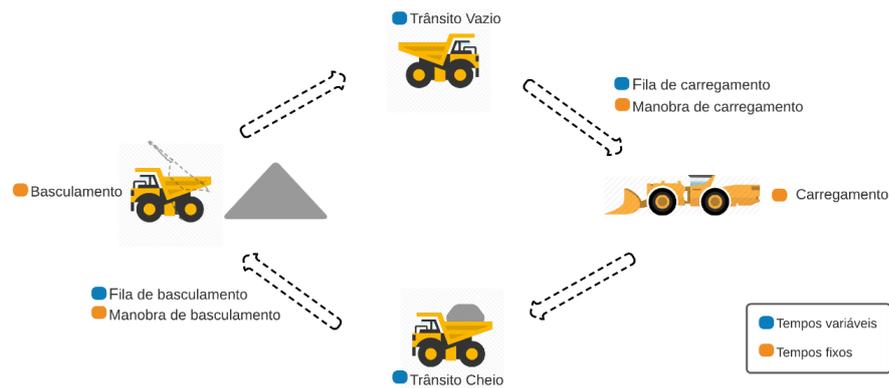


Figura 14 – Operações unitárias do ciclo operacional de transporte

De forma geral, em uma mineração subterrânea, o tempo de ciclo total dos caminhões é significativamente maior do que em mineração à céu aberto, principalmente devido à distância percorrida pelos equipamentos de transporte entre as frentes de carregamento e os pátios de minério e estéril. Tempos fixos como manobra de carregamento também tendem a ser maiores em subsolo, uma vez que o espaço operacional é limitado.

O ciclo de uma escavadeira ou pá carregadeira em um sistema de carregamento convencional é dividido em duas etapas: tempo ocioso e tempo de carregamento. O tempo ocioso é o período em que o equipamento de carga aguarda a chegada de um caminhão, porém, no caso de carregamento de minério, nesse período o material pode ser movimentado até o ponto de carga, reduzindo a ociosidade da carregadeira, tempo de carregamento e DMT do caminhão.

2.5.2.2 Disponibilidade Física (DF)

É o indicador que corresponde ao valor percentual de tempo que um equipamento esteve disponível para operar, sem intervenções mecânicas. Portanto, o tempo para realizar a manutenção preventiva e ajustar componentes impactam diretamente neste indicador.

$$DF = \frac{HP - HM}{HP} \quad (2.1)$$

Onde:

HP: Horas programadas

HM: Horas em manutenção

2.5.2.3 Utilização Física Efetiva (UT)

É o indicador que corresponde ao valor percentual de tempo que um equipamento operou em relação ao intervalo de tempo que estava mecanicamente disponível para operar. Paradas operacionais gerenciáveis como tempo para abastecimento, refeição e troca de

turno, e não gerenciáveis como tempo em parada por mau tempo reduzem a utilização física.

$$UT = \frac{HO}{HP - HM} \quad (2.2)$$

Onde:

HO: Horas em operação

2.5.2.4 Produtividade (P)

É o indicador que corresponde à quantidade de massa movimentada em relação às horas de operação de um equipamento. Para caminhões, por exemplo, tempos de transporte (vazio e cheio) altos reduzem a produtividade dos equipamentos, enquanto que, para equipamentos de carga, o tempo aguardando caminhões impacta negativamente neste indicador.

$$P = \frac{M}{HO} \quad (2.3)$$

Onde:

M: Massa movimentada (t)

2.5.2.5 Eficiência Operacional (EO)

É o indicador que combina os fatores de disponibilidade, utilização efetiva e produção para avaliar o desempenho dos equipamentos móveis. Por meio deste indicador é possível identificar as perdas operacionais e elaborar um plano de ação para minimizar estes impactos.

$$EO = DF * UT * \frac{Prod.r}{Prod.p} \quad (2.4)$$

Onde:

Prod.r: Produção realizada

Prod.p: Produção planejada

2.5.2.6 Mean time between failures

MTBF é uma sigla do inglês para o termo *mean time between failures* (tempo médio entre falhas). Esse indicador é utilizado para quantificar a média do tempo transcorrido entre uma parada por irregularidade e o colapso seguinte.

$$MTBF = \frac{HP - HM}{N_f} \quad (2.5)$$

Onde:

N_f : Número de falhas

Com o objetivo de avaliar o tempo que um equipamento opera sem falha, atualmente alguns especialistas sugerem a utilização de uma variante do indicador de MTBF, em que as horas em parada operacional são suprimidas das horas programadas, restando apenas as horas em operação. Neste caso, é possível analisar o tempo real que um equipamento operou sem interrompimento devido a uma falha.

2.5.2.7 Mean time to repair

MTTR é uma sigla do inglês para o termo *mean time to repair* (tempo médio para reparo). Esse indicador quantifica o tempo médio para realizar a correção do equipamento.

$$MTTR = \frac{HM}{N_f} \quad (2.6)$$

2.6 Valor econômico dos blocos

Na etapa de elaboração do plano de lavra, faz-se necessário a obtenção do valor econômico de cada um dos blocos. Este, representa a contribuição financeira de acordo com os custos, teor do bloco, recuperação e preço de venda da *commodity*.

$$F_{benef} = Lucro - Custos \quad (2.7)$$

$$F_{benef} = (R * t * P) - (Custo_{Op} + Custo_{Proc} + Custo_{G\&A}) \quad (2.8)$$

Sendo:

F_{benef} : Valor do benefício do bloco;

R: Recuperação global do processo de beneficiamento;

t: Teor do bloco;

P: Preço de venda do concentrado;

$Custo_{Op}$: Custos operacionais;

$Custo_{Proc}$: Custos de processo;

$Custo_{G\&A}$: Custos administrativos;

Considerando que o teor de corte é utilizado para classificar os blocos com teor igual ou superior a esse índice como minério, e os de teor inferior a esse índice como estéril, o cálculo deste índice é realizado segundo as equações:

$$F_{benef} = 0 \quad (2.9)$$

$$Lucro = Custo \quad (2.10)$$

$$Tc = \frac{Custo_{Op} + Custo_{Proc} + Custo_{G\&A}}{R * P} \quad (2.11)$$

A definição do teor de corte deve ser realizada a partir de estudo cauteloso, pois impacta diretamente na viabilidade econômica e no tempo de vida útil do empreendimento. O teor de corte varia de acordo com os custos operacionais e as incertezas de teores por exemplo, e por isso, deve ser analisado de forma independente em cada bloco. No entanto, uma vez definido o objetivo do presente estudo, serão considerados teores de corte fixos para as duas diferentes regiões da mina.

Para analisar o valor atual do retorno de um investimento, faz-se necessário o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL). Este, é calculado por meio do fluxo de caixa do empreendimento, transformando os valores futuros em valores no presente a partir da aplicação de uma taxa de desconto, que pode ser a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), conforme a fórmula abaixo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - \text{Investimento inicial} \quad (2.12)$$

A TMA é a taxa de juros que representa a rentabilidade mínima esperada pelo investidor. Sendo assim, pode-se afirmar que um VPL positivo está relacionado a um investimento rentável, e, ao contrário, um VPL negativo está relacionado a um investimento não-rentável.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta um estudo de caso relacionado à análise de adequação de um sistema de carregamento e transporte a partir da aplicação de conceitos mencionados nos capítulos anteriores em uma base de dados de um depósito de ouro localizado na região sudeste do Brasil. Inicialmente, são apresentadas as premissas do estudo, com as características operacionais da mina, e posteriormente são apresentados os dados e as técnicas aplicadas no desenvolvimento deste trabalho. O fluxograma das etapas desta dissertação é mostrado pela Figura 15.

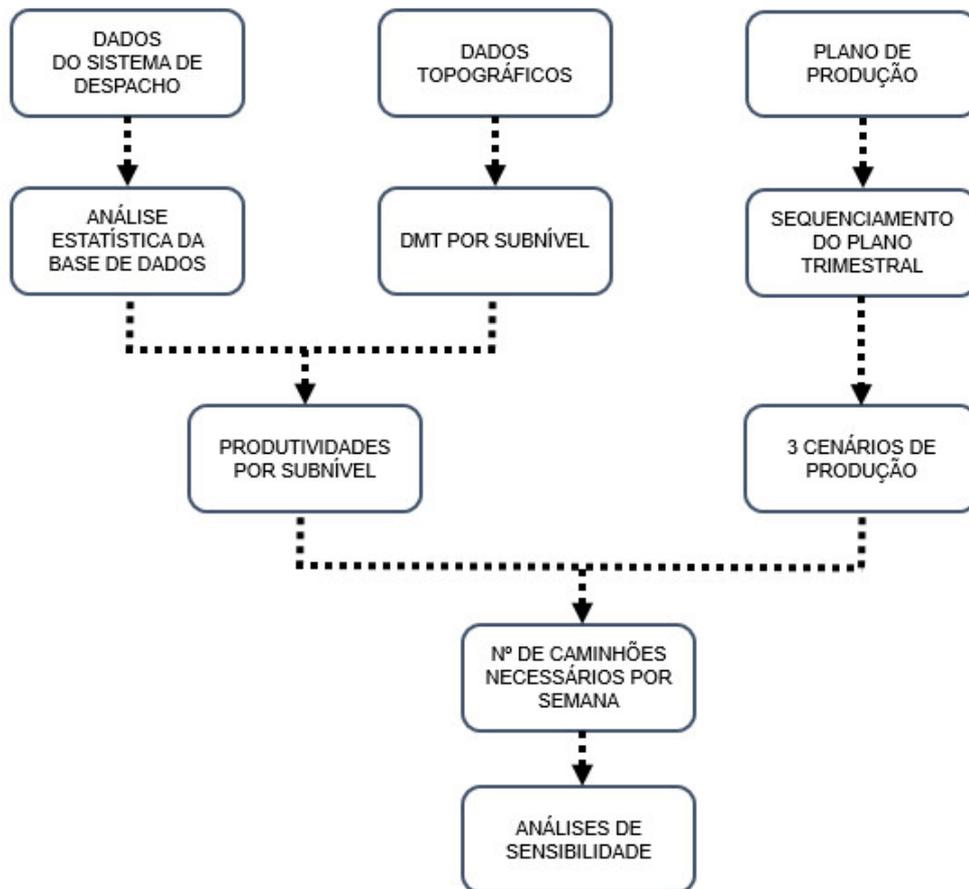


Figura 15 – Fluxograma esquemático da metodologia proposta

Primeiramente, os dados coletados do sistema de gestão de frotas foram analisados com base em conceitos estatísticos. Com o objetivo de obter as produtividades médias por subníveis, as distâncias médias de transporte oriundas de medidas topográficas foram relacionadas aos tempos de ciclos médios de cada subnível. Considerando diferentes premissas para o plano de produção, foram gerados três cenários distintos para um período trimestral. Associando as produtividades por subnível às massas movimentadas dos cenários de produção, foi definido o número de equipamentos de transporte necessários em cada

semana. De modo a avaliar a capacidade de variação do dimensionamento de frota causada pela oscilação dos dados coletados no sistema de despacho foram realizadas análises de sensibilidade.

3.1 Estudo de caso

O presente estudo de caso está relacionado a um depósito aurífero formado por diferentes lentes mineralizadas. A figura 16 mostra os dois principais corpos mineralizados considerados para elaboração do plano de lavra deste estudo. O corpo 1 (em vermelho) é o mais profundo e possui sua cota de elevação variando de 720m até -900m, esta última sendo a cota mais profunda do depósito. O ângulo de mergulho deste corpo é de aproximadamente 56° e a espessura varia de 2m a 12m. Além de apresentar as maiores espessuras, este corpo de minério contém os maiores teores do depósito. O corpo 2 (em azul) é o menos profundo e possui sua cota de elevação variando de 800m até -220m. O ângulo de mergulho médio é de 52° e a espessura varia de 1m a 5m.

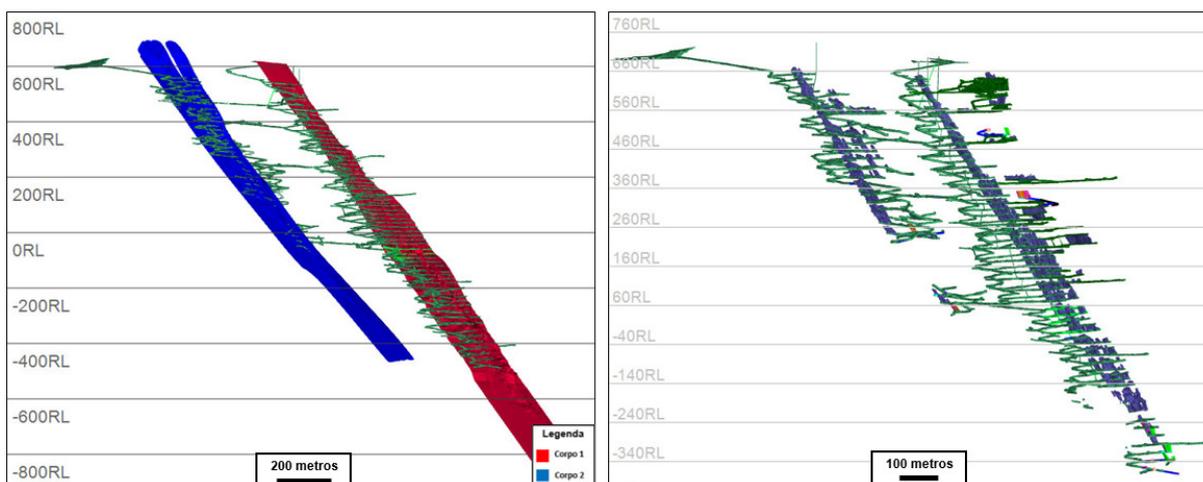


Figura 16 – Vista sul-norte das principais lentes mineralizadas (à esquerda) e das galerias e regiões lavradas com os sólidos do cenário-referência (à direita)

O acesso aos corpos é feito por duas rampas independentes, que também são usadas para escoamento do material até a planta de beneficiamento. As rampas possuem apenas uma via para trânsito dos equipamentos e, por este motivo, estruturas secundárias (acessos inativos, ponto de sondagem antigos, etc) são frequentemente utilizadas para ponto de manobra e liberação da rampa. As rampas possuem 3 acessos de conexão entre os corpos de minério principais, e estes funcionam como estruturas auxiliares para o transporte de material.

Para este estudo de caso, consideram-se as seguintes premissas:

- (i) O método de lavra da mina é de realce por subníveis;

- (ii) O regime de operação é de quatro turnos de seis horas;
- (iii) O tempo para detonação é de 1 hora e são destinados dois períodos do dia para as detonações;
- (iv) Todos os equipamentos são compatíveis entre si (carregamento e transporte) e podem ser alocados em todas as frentes;
- (v) Não são considerados equipamentos auxiliares, tais como equipamentos terceirizados ou de porte menor;
- (vi) Alguns realces lavrados podem ser preenchidos e o enchimento pode ser realizado com estéril e/ou *paste-fill*;

3.2 Coleta de dados

As informações obtidas pelo sistema de gestão de frotas são armazenadas em um banco de dados, e, a partir deste, é possível gerar diversos relatórios analíticos em que pode-se identificar as perdas e os impactos sobre os resultados de produção em relação aos planos. O gerenciamento da base de dados é essencial para que os indicadores resultantes sejam fidedignos à realidade dos equipamentos. Para realizar esta gestão, é necessário que, em um período de implantação do software, seja realizado um acompanhamento contínuo do processo de criação dos dados, avaliando-se comparativamente os dados obtidos e os eventos reais.

O período considerado na coleta de dados dos ciclos de 7 equipamentos de transporte foi de 273 dias entre 1º de julho de 2021 e 31 de março de 2022. Os ciclos que tiveram alguma edição pelos operadores da sala de controle foram expurgados da análise, de modo que apenas ciclos oriundos dos apontamentos dos operadores em campo fossem considerados no estudo.

3.3 Análise estatística dos tempos de ciclo

Antes de realizar um estudo com relação a produtividade dos equipamentos a partir de um banco de dados de um sistema de gestão de frotas desconhecido, considera-se uma avaliação estatística dos dados. Para tanto, foram realizadas análises estatísticas com relação a alguns indicadores, como por exemplo, tempos de ciclo dos equipamentos carregados e tempos de ciclo total para diferentes painéis de lavra.

Nesse contexto, a estatística descritiva tem por objetivo descrever os dados amostrados, utilizando-se de métodos numéricos e gráficos a fim de enfatizar as informações relevantes da caracterização dos dados. Quanto à estatística descritiva dos dados, os valores

considerados foram: média, moda, mediana, quartis, distância interquartil, amplitude, variância, desvio padrão, coeficiente de assimetria e coeficiente de variação.

Os tempos fixos e os tempos variáveis dos ciclos de transporte foram avaliados separadamente a partir de histogramas de distribuição de dados. Nestas análises, alguns valores extremos foram identificados e desconsiderados para cálculo da média. Para cada subnível da mina deste estudo de caso foi determinada a produtividade média. No Capítulo 4 são apresentados os histogramas dos tempos fixos de todos os ciclos do banco de dados, e, para exemplificar a determinação dos tempos variáveis dos ciclos de transporte serão apresentados as análises dos níveis 8 e 13. A seleção destes níveis nas análises deve-se ao fato de apresentar a maior quantidade de ciclos de transporte no período com DMT distintas.

Para avaliar a variação da produtividade em função da DMT foi elaborado um gráfico com todos os ciclos do banco de dados deste projeto, em que as frentes de cada subnível foram relacionadas com um valor de DMT único, considerado a média do subnível. O valor de referência da DMT utilizado nesta análise é oriundo de medidas topográficas.

Com o objetivo de quantificar o impacto da distância do ponto de carga sobre a produtividade dos equipamentos de transporte, foram comparados os tempos de carregamento dos caminhões com relação à distância entre o material desmontado e o ponto de carga dos subníveis.

3.4 Sequenciamento das atividades

O projeto do plano de lavra e o sequenciamento das atividades foi realizado no software Deswik. Os dados de entrada são os sólidos do plano de médio prazo, as taxas de desenvolvimento e lavra e as premissas para elaboração dos diferentes cenários, estas, são detalhadas na seção 3.5. Desse modo, os sólidos são formados pelas estruturas a serem desenvolvidas e lavradas em um período de, no máximo, dois anos, que, devem ser novamente sequenciados com maior detalhamento para compor o plano trimestral.

No plano de lavra os painéis podem ter 3 a 4 subníveis, e os realces têm o seu comprimento variando de 20m a 30m e a altura de 15m a 20m. Na maioria dos painéis, os pilares verticais têm 5m de comprimento e os pilares horizontais variam de 5m a 8m. A figura 17 mostra a configuração das estruturas de desenvolvimento e lavra de uma determinada região do depósito.

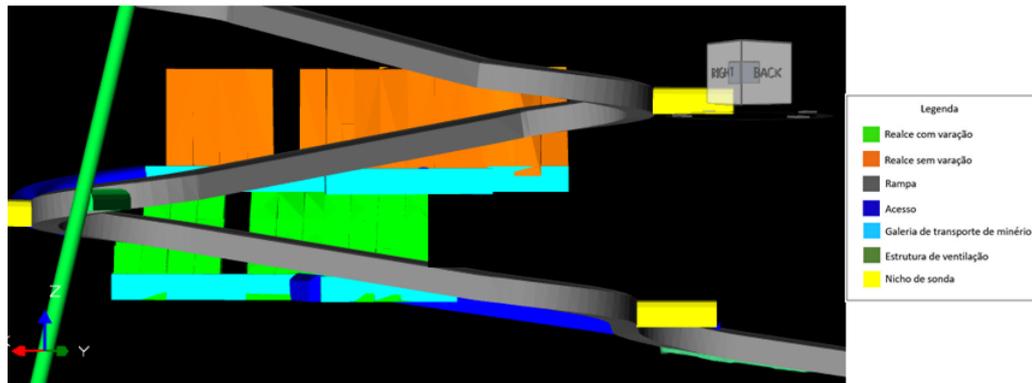


Figura 17 – Estruturas existentes no plano de lavra

A programação das atividades está relacionada à determinação dos eventos que irão ocorrer durante cada período, bem como as respectivas precedências e sucessão de eventos, ou seja, a identificar quais regiões serão desenvolvidas e lavradas primeiro e quais serão desenvolvidas e lavradas na sequência. Para que seja possível identificar uma ordem lógica destas atividades, é necessária a configuração de dependência entre estas estruturas, conforme exemplificado na Figura 18, onde as setas apresentam a sequência de execução e eventualmente a possibilidade de desenvolvimento simultâneo.

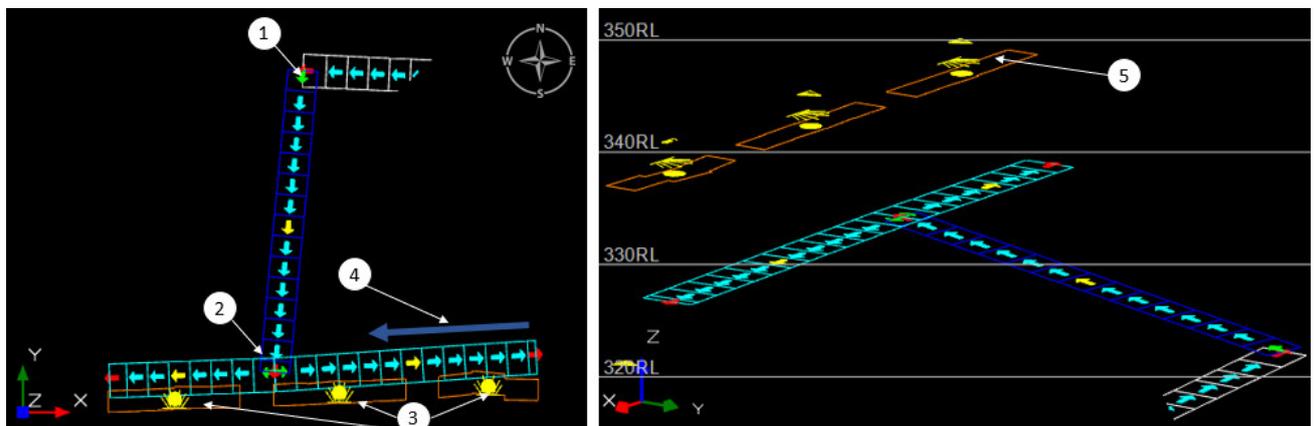


Figura 18 – Dependências entre as atividades

As estruturas da mina como rampas, galerias de acesso e realces são relacionadas de forma a apresentar uma ordem, identificando qual atividade deve ser sucessora e qual deve ser a predecessora em cada painel. Na Figura 18, pode-se identificar as seguintes dependências das atividades:

1. Quando o desenvolvimento da rampa atingir este ponto, poderá ser iniciado o desenvolvimento do acesso;
2. Quando o desenvolvimento da galeria de acesso finalizar, poderá ser iniciado o desenvolvimento da galeria de transporte;

3. Quando a galeria de transporte de minério for finalizada, poderá ser iniciada a perfuração do bloco de lavra;
4. Indica a direção da lavra em recuo dos realces
5. Com relação aos realces, cada símbolo indica uma atividade, podendo ser: cabeamento, perfuração de slot, perfuração de leques de detonação, desmonte, carregamento e transporte e enchimento. Estas atividades derivadas também são configuradas para que ocorram em uma determinada sequência durante a lavra do realce.

As dependências lógicas entre as atividades não são suficientes para determinação do sequenciamento, uma vez que não levam em consideração aspectos operacionais como, por exemplo, número de equipamentos e taxas de produtividade. Para as atividades de desenvolvimento considera-se uma taxa de priorização para cada seção de galeria (acesso, rampa, etc), em metros por mês. Já para os sólidos de lavra são aplicadas as taxas dos equipamentos de perfuração e transporte que estão relacionadas a cada uma das atividades derivadas.

Para facilitar o gerenciamento das atividades de acordo com as premissas do plano, é ideal que a alocação dos equipamentos e a sequência de atividades seja analisada e manipulada por meio de um gráfico de Gantt. Conforme mostra a Figura 19 e 20, é possível verificar a sequência das atividades, bem como a ordem das frentes que cada equipamento irá atuar no período. Na Figura 19, é possível verificar a sequência de perfuração do jumbo, em que, ao finalizar a galeria de acesso (azul escuro), nomeada frente 5, é iniciada a perfuração da galeria de transporte de minério (azul claro), nomeada frente 6. A Figura 20 mostra a ordem de prioridade do fandrill 37, bem como a metragem em perfuração de leques de detonação a ser realizada em cada um dos realces.

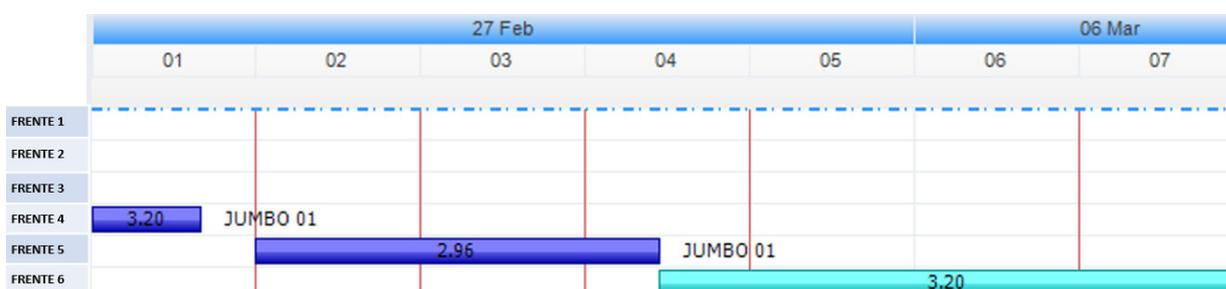


Figura 19 – Gráfico de Gantt para gerenciamento das atividades de desenvolvimento

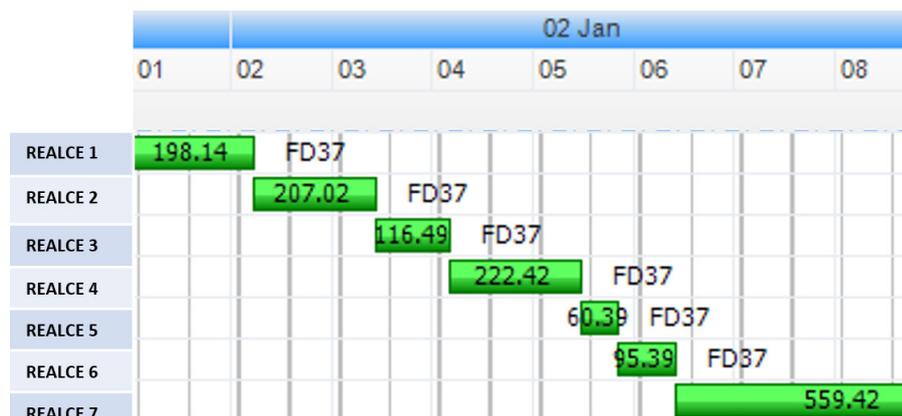


Figura 20 – Gráfico de Gantt com a alocação dos equipamentos na atividade de perfuração de leques de detonação

Os turnos de operação aplicados ao projeto são segmentados em quatro períodos de seis horas. Dois horários do dia são designados, exclusivamente, para as atividades de detonações das frentes de lavra e desenvolvimento.

Neste estudo, o sequenciamento é realizado sobre um plano de produção de um trimestre, em que a programação das atividades deve ser diarizada dentro de um período de três meses. Em um sequenciamento diário, com a inserção das taxas de produtividade de cada equipamento, faz-se necessário especificar a alocação dos equipamentos por frente em todo o período.

3.5 Elaboração dos cenários

Considerando metas do plano de produção trimestral exequíveis para o plano de lavra em questão, foi definido um caso-referência nomeado “Cenário 1”. A partir deste, foram elaborados cenários com a variação das prioridades no sequenciamento entre as frentes, alterando-se assim, a distância média de transporte e conseqüentemente o número de equipamentos necessários para realizar cada plano de produção. Os diferentes cenários gerados a partir do caso-referência apresentam variação de alguns fatores no período, como, por exemplo, teor e massa de minério.

As premissas do plano inseridas para alocação dos equipamentos no caso base deste projeto estão relacionadas com aspectos como: movimentação máxima de minério por dia em toneladas, movimentação total máxima por dia em toneladas e metragem máxima de desenvolvimento por dia e por mês conforme apresentado na Tabela 2. Todas estas premissas devem ser configuradas com uma ordem de prioridade. No cenário 1, definido como o caso referência, o sequenciamento é realizado buscando a maior massa de minério independentemente da origem, ao passo que, para os cenários 2 e 3 foi adicionada uma quarta premissa com o objetivo de reduzir a massa proveniente do Corpo 1 e conseqüentemente, aumentar a massa oriunda do Corpo 2.

e conseqüentemente, aumentar a massa oriunda do Corpo 2 para os cenários 2 e 3.

Tabela 2 – Premissas de produção para elaboração dos cenários

| Premissas | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| ROM lavra por dia (t/dia) | 850 | 850 | 850 |
| Metros desenvolvidos por mês (m/mês) | 560 | 560 | 560 |
| Metros desenvolvidos por dia (m/dia) | 18 | 18 | 18 |
| Movimentação total do Corpo 1 por mês (t/mês) | - | 33.000 | 25.000 |

A meta de ROM oriundo das atividades de lavra foi configurada no modo "próximo ao limite", o que sugere ao sequenciador buscar resultados que estejam em média próximos a 850 toneladas por dia. As demais metas foram configuradas no modo "não exceder o limite", o que impede o sequenciador de considerar resultados que estejam além dos limites estabelecidos para cada uma das metas.

Com o objetivo de avaliar os resultados sobre o ponto de vista econômico, foram considerados a receita e os custos necessários para realização das atividades de cada mês e, ao final foi possível obter o VPL correspondente de cada cenário. Para o estudo de caso em questão, foram aplicados os custos operacionais conforme Tabela 3. O custo operacional de lavra está relacionado a todas as atividades ligadas à extração do minério. Neste estudo, o custo de transporte, denominado de custo caminhão por dia, apresenta-se segmentado do custo operacional de lavra, para que seja possível quantificar o efeito deste, sobre o VPL do projeto. O custo caminhão por dia é composto pelos custos de mão de obra e manutenção relacionados ao período de operação efetiva destes equipamentos.

Tabela 3 – Custos operacionais e taxas aplicados no estudo

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Preço de venda (US\$/Oz) | 1800 |
| CAPEX (US\$) | 4.000.000 |
| Custo operacional de lavra (US\$/Oz) | 300 |
| Custo de processo (US\$/Oz) | 450 |
| Custo administrativo (US\$/Oz) | 80 |
| Custo caminhão por dia (US\$/dia) | 500 |
| Recuperação global (%) | 92 |
| TMA mensal (%) | 0.8 |

O impacto econômico do custo de transporte sobre o projeto está diretamente relacionado à produtividade destes equipamentos, uma vez que quanto menos produtivos eles forem, menor é a massa movimentada (receita). Como descrito nos tópicos anteriores, a produtividade, dentre outros fatores, varia de acordo com a distância média de transporte (combustível, desgaste de componentes mecânicos, pneus, etc.). Portanto, busca-se a minimização da distância média de transporte para garantir o maior VPL para

o empreendimento. Para que este objetivo seja alcançado, faz-se necessário a simulação de diferentes cenários. Estes, podem ser testados a partir dos seguintes dados:

- (i) Sequenciamento das atividades
- (ii) Características detalhadas dos equipamentos de transporte
- (iii) Configuração das rotas de transporte

Os equipamentos de transporte considerados neste estudo são 7 caminhões articulados dos modelos Volvo A30E e Volvo A30G, que apresentam uma capacidade de carga de 25 toneladas. Em uma análise diária dos indicadores de disponibilidade física (DF) e utilização (UT), alguns eventos podem apresentar valor zero para estes indicadores no caso em que o equipamento está em manutenção preventiva ou corretiva que perdure por mais de um turno. Para elaboração do plano de lavra para um período maior do que um mês, sugere-se considerar valor médio histórico destes indicadores. Para as simulações deste estudo, têm-se os indicadores de disponibilidade física (DF) de 80% e utilização (UT) de 65%.

3.6 Análise de sensibilidade

A avaliação dos riscos inerentes aos diferentes cenários é fundamental para o planejamento estratégico do empreendimento, pois por meio destas análises é possível quantificar os principais fatores que podem comprometer a execução do plano. Análises de sensibilidade a determinados parâmetros são realizadas para avaliar o impacto financeiro sobre um projeto mantendo todas as demais variáveis fixas e variando-se uma das variáveis por vez. É um processo que permite uma avaliação da relevância que cada variável tem sobre o resultado econômico do projeto. Alguns exemplos de variáveis são: impostos, receitas, custos, depreciação, etc. Neste estudo foram avaliados, no fluxo de caixa, os impactos de uma variação dos seguintes parâmetros: produtividade, carga média, utilização e disponibilidade dos equipamentos de transporte.

Neste caso, optou-se por avaliar a sensibilidade dos fatores relativos ao cenário 1 (caso-referência). Para analisar a sensibilidade foram criados quatro cenários em que o desvio padrão foi variado para mais e para menos de um (+/-1D) e dois (+/-2D) desvios padrão para cada distribuição amostral, no caso dos fatores de produtividade e carga média, ao passo que, para os parâmetros utilização e disponibilidade foi variado em 10% e 20% em relação ao valor do cenário de referência adotado neste estudo. Considerando uma meta de produção fixa do caso-referência conforme apresentada pela Tabela 5, e os custos mostrados na Tabela 3, foi avaliado o impacto econômico gerado pela variação no número de recursos necessários para alcançar tal meta.

4 Análise dos resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados gerados a partir das análises estatísticas, do sequenciamento das atividades e das análises de sensibilidade conforme descrição do capítulo 3.

4.1 Análise estatística dos tempos de ciclo

Uma breve descrição do conteúdo do banco de dados com os ciclos de transporte de minério é apresentada na Tabela 4. Estes dados serão expostos estatisticamente nas próximas subseções. Os ciclos de transporte de estéril não são considerados nestas análises uma vez que apresentam alta variabilidade relacionadas às atividades de enchimento de realces. Assume-se que a produtividade dos equipamentos no transporte de estéril é de 40 t/h.

Tabela 4 – Características do banco de dados

| | |
|----------------------------------|------|
| Nº de ciclos | 4834 |
| Nº de frentes de desenvolvimento | 34 |
| Nº de frentes de lavra | 38 |
| Nº de operadores | 35 |
| Nº de subníveis | 21 |

4.1.1 Tempos Fixos

A Figura 21 apresenta os histogramas com respectivos sumários estatísticos classificando a distribuição dos tempos fixos de todos os ciclos do banco de dados deste estudo.

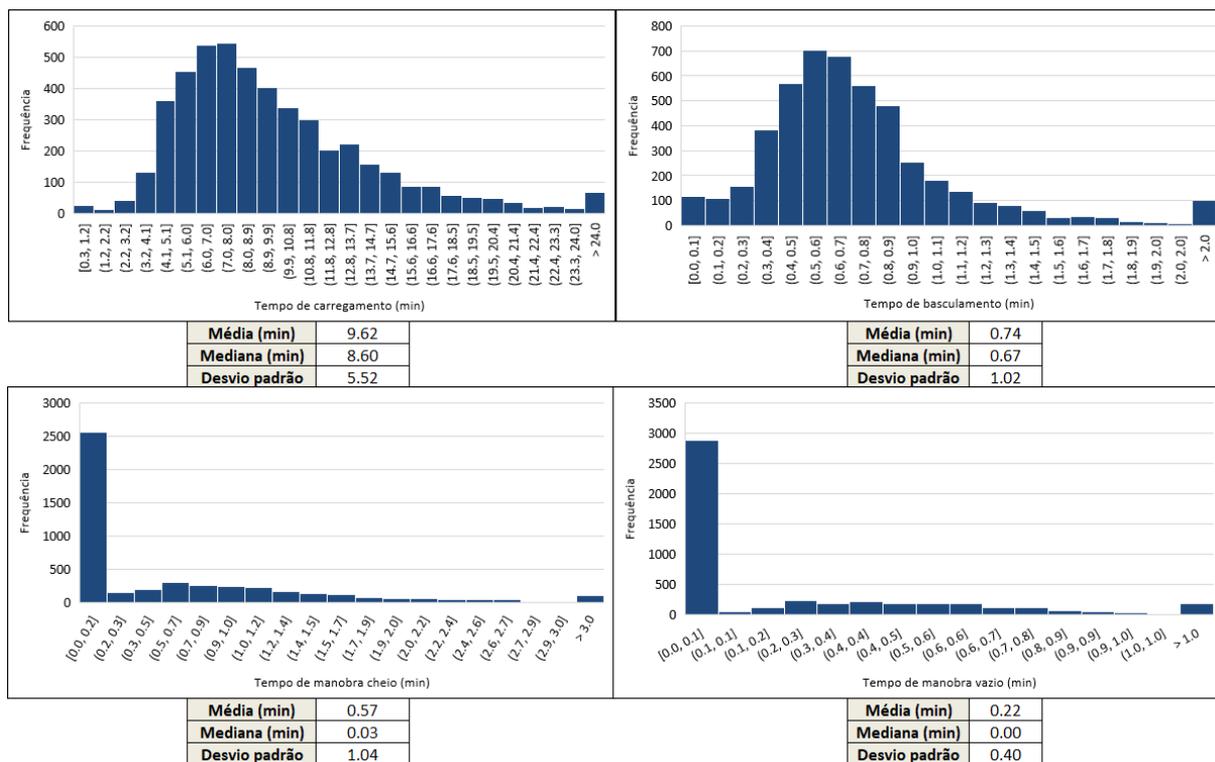


Figura 21 – Histograma e sumário estatístico dos tempos fixos

Observa-se que o tempo de carregamento médio é de 9,6 minutos, no entanto, o valor de desvio padrão aponta que esse parâmetro apresenta grande variação neste banco de dados. O tempo de manobra de carregamento indica que a atividade de posicionar o equipamento na galeria para carregar não é realizada com dificuldade. Considerando que os tempos de manobra para bascular e basculamento correspondem a menos de 0,8% do tempo total do ciclo, pode-se concluir que estes não tem grande representatividade no tempo de ciclo final do equipamento.

4.1.2 Tempos Variáveis

Inicialmente, os ciclos foram avaliados de modo a comparar os tempos de transporte dos equipamentos carregados, ou seja, tempo decorrido entre o ponto de carregamento (próximo ao realce) e basculamento (pátio de minério na superfície) e os tempos de transporte vazio, ou seja, tempo decorrido entre o pátio de minério e o ponto de carregamento.

Para o painel de lavra no nível 8, os ciclos de transporte com destino ao pátio de minério apresentam uma DMT média de aproximadamente 5.400 metros. Foram realizadas análises dos ciclos de transporte considerando 271 ciclos, e os resultados estão apresentados na Figura 22.

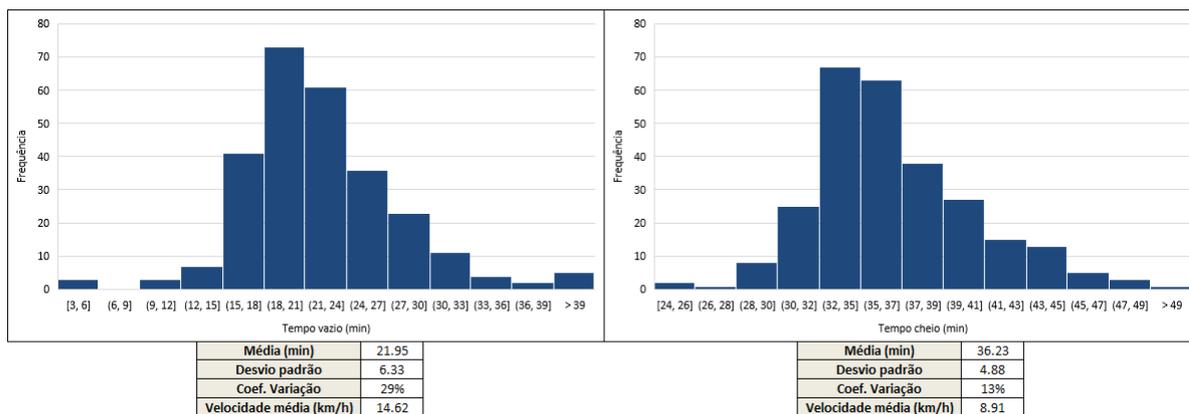


Figura 22 – Histograma e sumário estatístico dos tempos no painel de lavra nível 8

Para o painel de lavra no nível 13, os ciclos de transporte apresentam uma DMT de 7.350 metros. Foram realizadas análises dos ciclos de transporte considerando 548 ciclos, e os resultados estão apresentados na Figura 23.

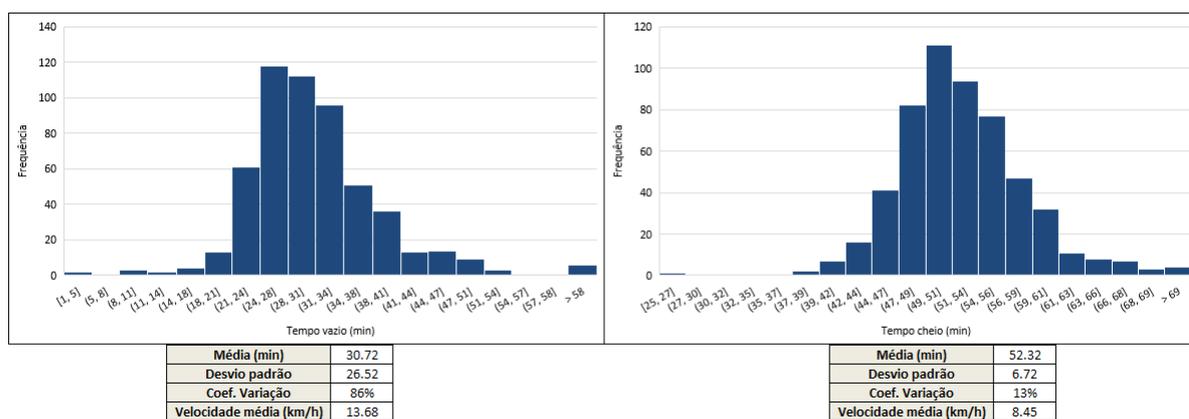


Figura 23 – Histograma e sumário estatístico dos tempos no painel de lavra nível 13

Assumindo-se que o coeficiente de variação maior que 30% está relacionado a dados com alta dispersão (heterogêneos), enquanto que um coeficiente de variação entre 15% a 30% está relacionado a dados de média dispersão, quando o coeficiente de variação for menor que 15% pode-se afirmar que os dados são homogêneos.

É possível observar que as análises estatísticas dos ciclos dos painéis do nível 8 e 13 apresentam coeficiente de variação menor no caso dos tempos de ciclo cheio em comparação aos tempos de ciclo vazio. Considerando a classificação citada no parágrafo acima, pode-se afirmar que os tempos de ciclo vazio são originados de dados heterogêneos, ao passo que o conjunto de tempos de ciclo cheio são classificados como dados homogêneos para os dois níveis.

Considerando a premissa de que os equipamentos de transporte são produtivos quando estão transportando material e os equipamentos de cargas são produtivos quando estiverem realizando o carregamento, é importante que os caminhões realizem ciclos "abertos", onde o ponto de basculamento esteja próximo do ponto de carga do ciclo

subsequente. A Figura 24 exibe um exemplo de ciclo aberto e fechado ocorrido para o período avaliado.

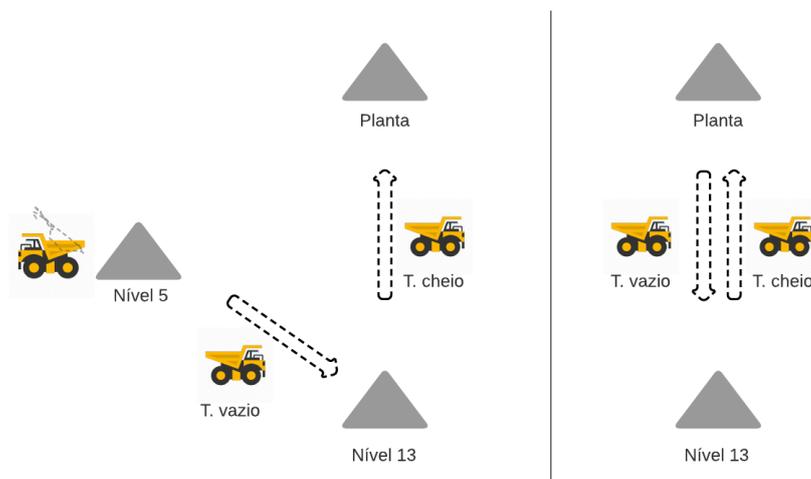


Figura 24 – Exemplo de ciclo aberto (esquerda) e fechado (direita)

No caso deste estudo, observa-se a dispersão elevada para os tempos de ciclo vazio, relacionada à dinâmica dos ciclos da mina, uma vez que os caminhões podem iniciar o trânsito vazio após o basculamento em pontos em superfície ou após basculamento em subsolo, no caso de transporte de material de estéril para enchimento de realces. Portanto, o coeficiente de variação relacionado aos tempos de trânsito vazio estão diretamente relacionados a dinâmica destes ciclos abertos. O mesmo não ocorre no período de trânsito cheio, pois os equipamentos possuem sempre o mesmo ponto de carregamento, localizados no nível 8 e 13, e basculamento, que está localizado no pátio de minério em superfície.

4.1.3 Análise de desempenho dos equipamentos

Neste estudo de caso, o material definido como minério, tem apenas uma possibilidade de destino, que é a planta metalúrgica, localizada na superfície. Já o material estéril tem a sua rota principal definida até a pilha, também localizada na superfície, e rotas alternativas, que são os realces definidos com possibilidade de enchimento com estéril. Neste estudo, as produtividades médias dos equipamentos de transporte de cada subnível foram determinadas a partir do histórico de ciclos armazenados na base de dados do sistema de gestão de frotas.

Considerando uma frota homogênea de caminhões articulados de carga média de 25 toneladas, os ciclos foram analisados para comparar a produtividade dos equipamentos com o aumento da distância média de transporte. Esta análise foi gerada a partir de 4834 ciclos de transporte e é apresentada pela Figura 25.

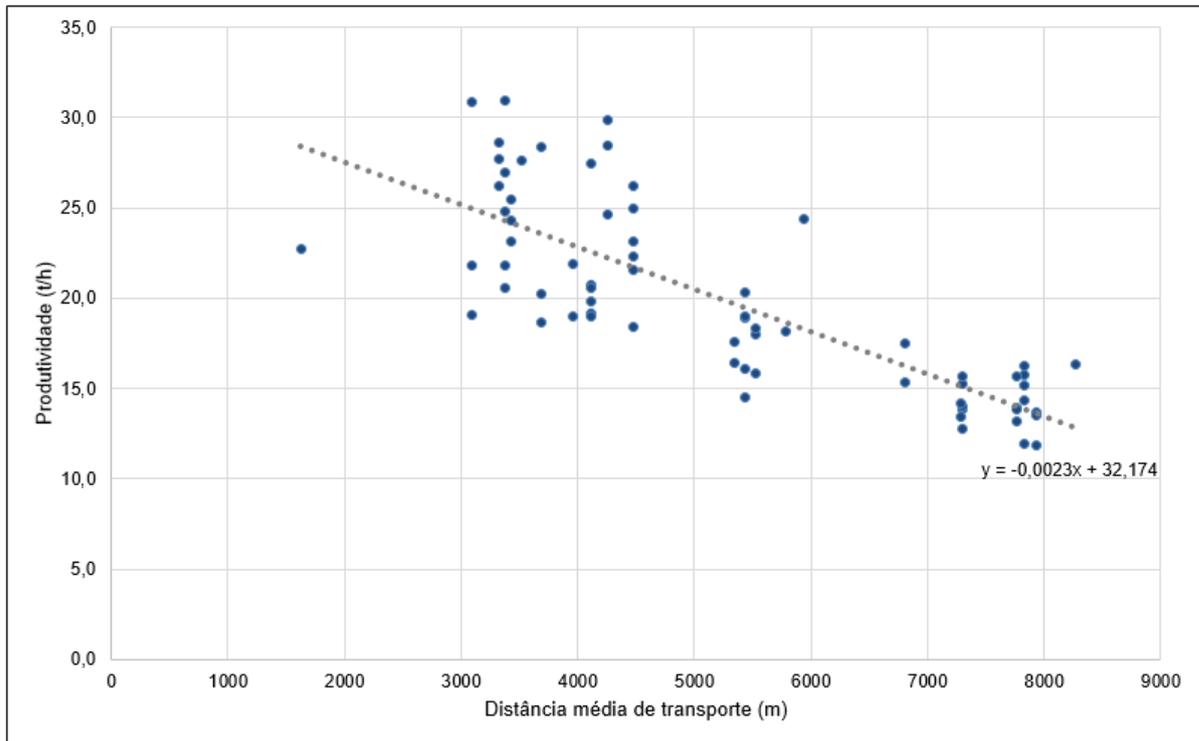


Figura 25 – Análise da produtividade por caminhão em função da DMT

A relação linear entre a DMT e a produtividade, definida pela equação da reta da Figura 25, apresenta um coeficiente de correlação de 0,8, que indica uma forte correlação. A análise evidencia a redução da produtividade em decorrência do aumento da DMT em uma taxa de aproximadamente $\frac{1}{400} \frac{t/h}{m}$, ou seja, a redução de uma produtividade de 1 t/h por caminhão está relacionada a um incremento de 400 metros da distância média de transporte. Considerando esse efeito na produção, a alocação de equipamentos deve ser realizada a partir da comparação entre diferentes cenários.

Conforme descrito nas seções anteriores e apresentado pelo gráfico da Figura 25, a produtividade média por frente depende, principalmente, da distância média de transporte, mas existem outros fatores que impactam negativamente neste indicador. Alguns fatores são: distância do ponto de carga, tempo de fila de carregamento, características da pista (resistência ao rolamento), dimensões da galeria, quantidade de equipamentos transitando em uma mesma via, etc.

Com relação ao sistema carregamento e transporte, quando a capacidade de transporte é menor do que a capacidade de carregamento, as carregadeiras permanecem paradas devido à falta de equipamento de transporte na zona de carregamento. Nesse cenário, a movimentação total poderia ser mantida se houver uma priorização dos blocos que apresentam uma DMT reduzida. Quando a capacidade de transporte é maior do que a capacidade de carregamento, os equipamentos de transporte tendem a ficar parados por fila de carregamento. Nesse cenário, não há alternativa para manter a movimentação total.

4.1.4 Impacto da distância ao ponto de carga

Nesta análise, representada pela Figura 26, considera-se que o carregamento ocorre com apenas um equipamento de carga em cada carregamento e não há ponto de estoque de material nas proximidades do ponto de carga.

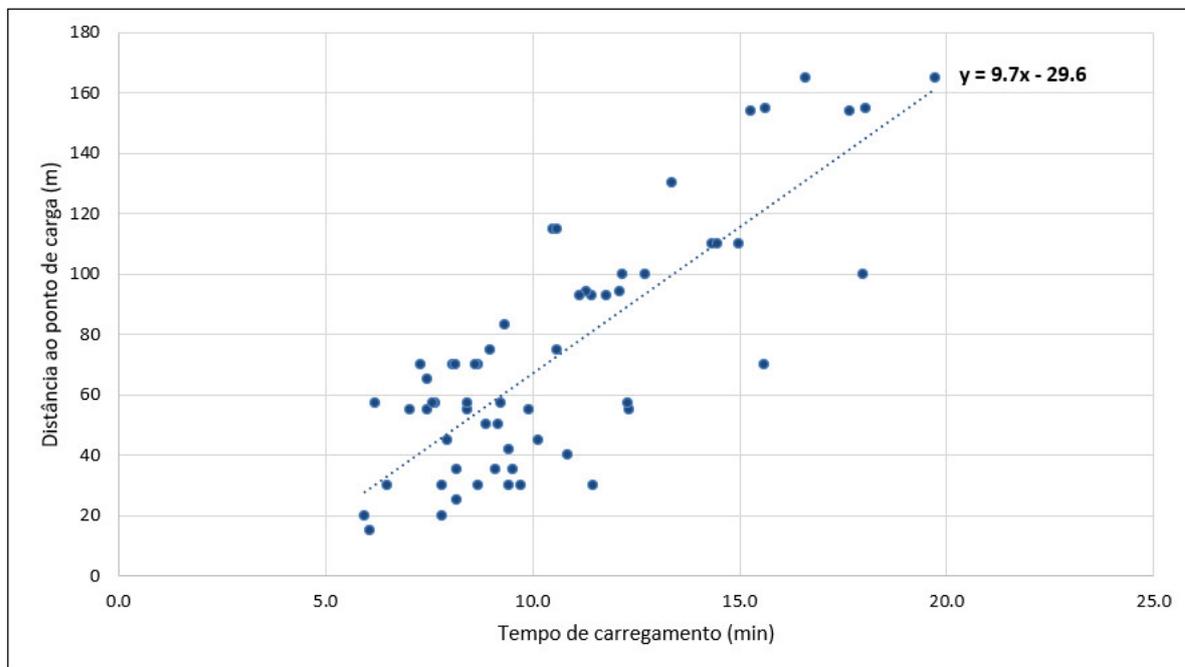


Figura 26 – Análise da distância do ponto de carga em função do tempo de carregamento

Conforme evidenciado, conclui-se que, a existência de um ponto de carga próximo à frente de carregamento tem um impacto positivo na produtividade média dos equipamentos de transporte, e, neste estudo de caso, a variação pode ser representada por uma equação linear, em que 10 metros aproximados entre o ponto de carga e a localização de minério no realce estão relacionados à redução de 1 minuto no tempo de carregamento.

Esta análise poderia ser realizada a partir dos ciclos das carregadeiras, dado que, o tempo de carregamento dos caminhões está diretamente relacionado à produtividade das carregadeiras. No entanto, os ciclos completos das carregadeiras podem ser compostos também por ciclos realizados entre pontos de carga para estocagem de material e, portanto, seria necessário um tratamento dos dados para que estes ciclos fossem desconsiderados.

4.2 Teste de cenários

Os cenários resultantes da variação das diferentes priorizações entre as massas dos corpos 1 e 2 são exibidos nas seções que seguem.

4.2.1 Cenário 1

Esse cenário foi sequenciado de modo que 59% da massa de ROM é proveniente do corpo 1 e 41% é proveniente do corpo 2. Considerando o cálculo da produtividade média por subnível, a produtividade média deste cenário é de 19,0 t/h. Os resultados para o sequenciamento são apresentados na Tabela 5. Na Figura 27 são exibidos os resultados do número de caminhões necessários em cada semana.

Tabela 5 – Resultados cenário 1

| Cenário 1 | Mês 1 | Mês 2 | Mês 3 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| ROM (t) | 27.740 | 27.614 | 30.484 |
| Teor (g/t) | 2,73 | 2,98 | 2,99 |
| Estéril total (t) | 28.314 | 27.376 | 31.102 |

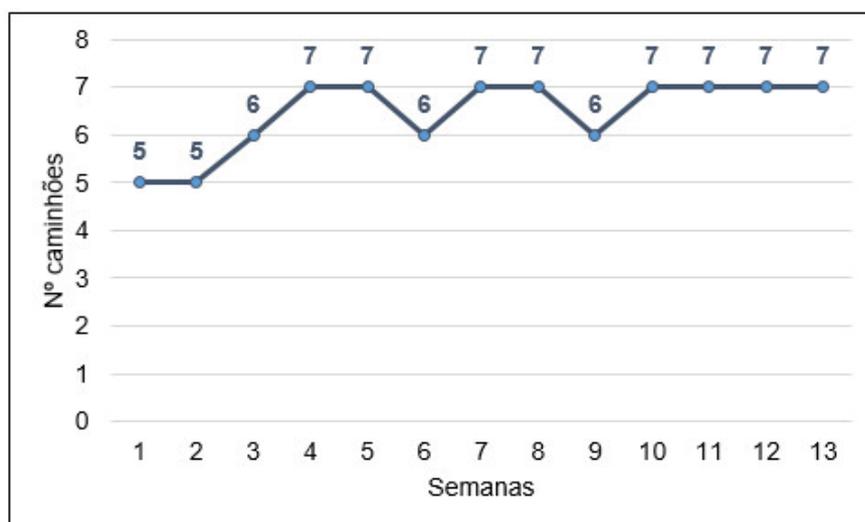


Figura 27 – Número de caminhões por semana

Tendo em vista os custos operacionais e taxas definidos na seção 3.5, o VPL resultante deste cenário é US\$ 1.509.432. Conforme evidenciado pela Figura 27 é possível notar que no cenário 1 é necessária uma frota de 7 caminhões ao longo do trimestre. Esta frota deve atender a demanda ao longo de todo o período, podendo apresentar capacidade excedente de recurso em algumas semanas em que a frota necessária é de 5 e 6 caminhões.

4.2.2 Cenário 2

Esse cenário foi sequenciado de modo que 52% da massa de ROM é proveniente do corpo 1 e 48% é proveniente do corpo 2. Considerando o cálculo da produtividade média por subnível, a produtividade média deste cenário é de 19,4 t/h. Os resultados para o sequenciamento são apresentados na Tabela 6. Na Figura 28 são exibidos os resultados do número de caminhões necessários em cada semana.

Tabela 6 – Resultados cenário 2

| Cenário 2 | Mês 1 | Mês 2 | Mês 3 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| ROM (t) | 26.863 | 24.913 | 30.255 |
| Teor (g/t) | 2,72 | 2,69 | 2,93 |
| Estéril total (t) | 28.916 | 26.923 | 30.311 |

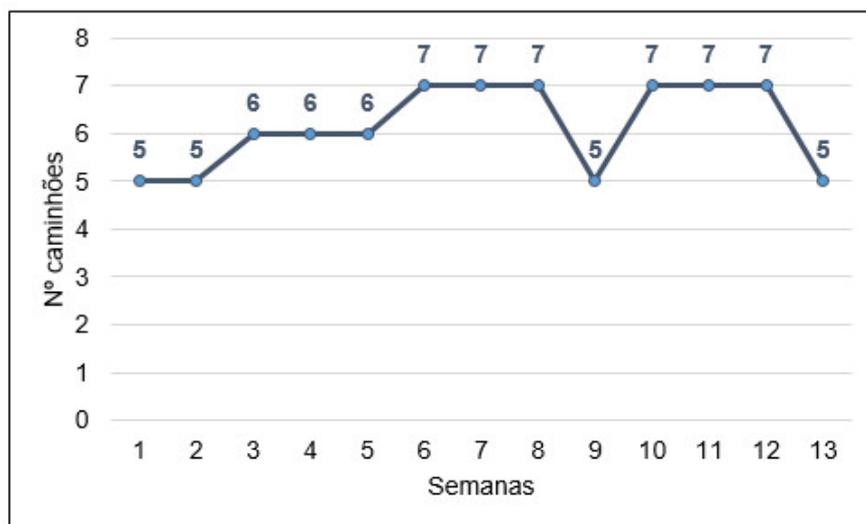


Figura 28 – Número de caminhões por semana

O VPL resultante deste cenário é US\$ 966.843. Conforme evidenciado pela Figura 28 é possível notar que no cenário 2 é também necessária uma frota de 7 caminhões ao longo do trimestre, podendo apresentar capacidade excedente de recursos em algumas semanas. Com relação ao cenário 1, verifica-se uma redução do teor médio do minério movimentado no período e da movimentação total.

4.2.3 Cenário 3

Esse cenário foi sequenciado de modo que 42% da massa de ROM é proveniente do corpo 1 e 58% é proveniente do corpo 2. Considerando o cálculo da produtividade média por subnível, a produtividade média deste cenário é de 19,6 t/h. Os resultados para o sequenciamento são apresentados na Tabela 7. Na Figura 29 são exibidos os resultados do número de caminhões necessários em cada semana.

Tabela 7 – Resultados cenário 3

| Cenário 3 | Mês 1 | Mês 2 | Mês 3 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| ROM (t) | 24.484 | 24.839 | 25.129 |
| Teor (g/t) | 2,67 | 2,69 | 2,71 |
| Estéril total (t) | 28.902 | 27.743 | 32.503 |

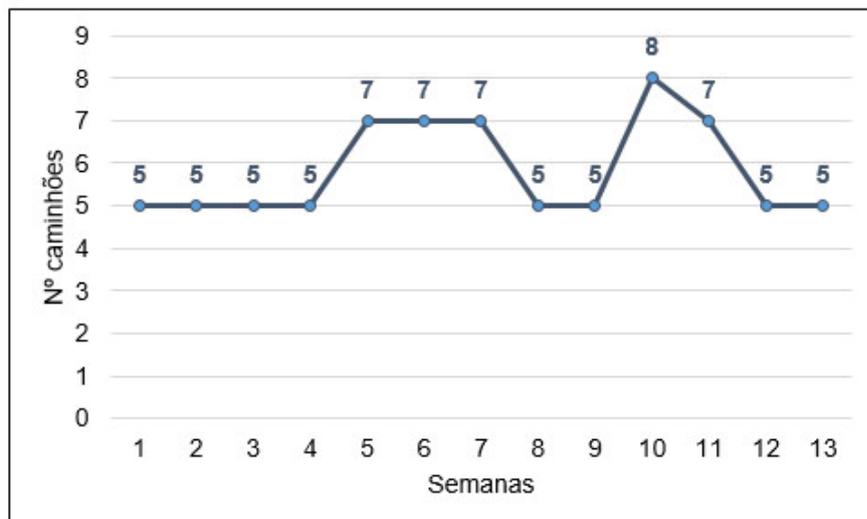


Figura 29 – Número de caminhões por semana

O VPL resultante deste cenário é US\$ 392.319. Observa-se que no cenário 3 é necessário uma frota de 7 a 8 caminhões ao longo do trimestre, podendo apresentar capacidade excedente de recurso em algumas semanas em que são necessários 5 caminhões. A semana 10 destaca-se por apresentar a maior quantidade de caminhões necessários do trimestre, o que evidencia a importância de readequar as atividades, de modo a possibilitar a antecipação desta movimentação, ou, em últimos casos, a postergação. Nota-se também que, em comparação ao cenário 1 e 2, há uma redução do teor médio do minério movimentado no período e da movimentação total.

4.2.4 Comparativo entre os cenários

A partir das análises realizadas, verifica-se que em todos os cenários há semanas com a capacidade de recursos excedente, considerando que há 7 equipamentos disponíveis para operar. Observa-se que o número de equipamentos necessários em algumas semanas atinge a marca de 5 e 6. Estes são períodos de oportunidade no plano de produção para antecipar massas de minério ou estéril e buscar uma redistribuição das atividades. Nota-se que priorizando-se o corpo 2 (cenários 2 e 3), há uma redução da DMT, conseqüentemente, há um aumento da produtividade dos equipamentos, e, portanto, maior oportunidade de aumento da massa movimentada, ou redução dos custos de transporte.

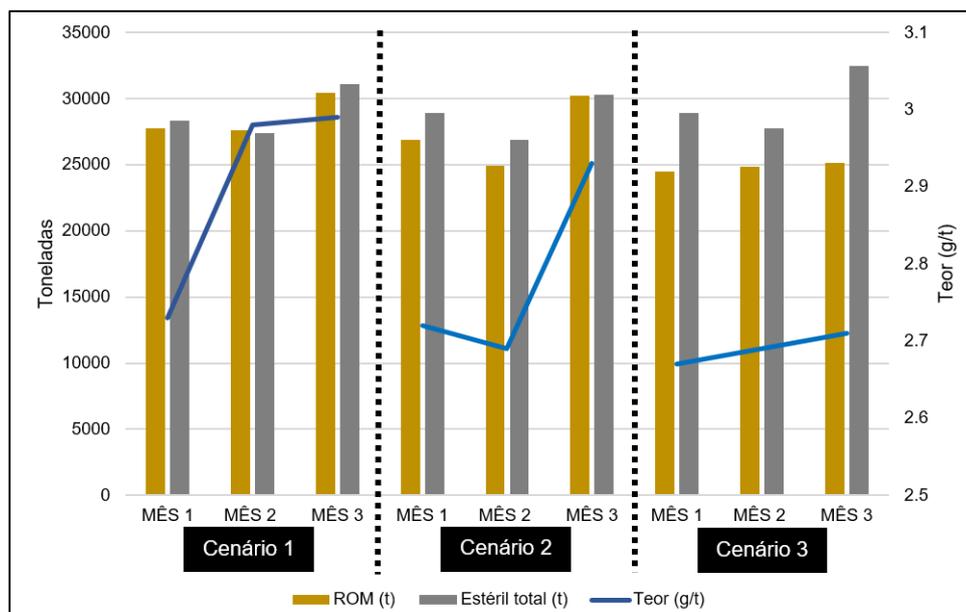


Figura 30 – Comparativo entre os cenários de produção

A Figura 30 exibe o comparativo entre os três cenários referente aos indicadores de ROM, teor e estéril total. Com relação ao minério liberado, que é a estimativa da massa e do teor dos realces prontos para lavar, a relação estéril-minério dos cenários apresentados destaca a diferença deste indicador entre as frentes do corpo 1 e 2. Comparando-se os cenários 1 e 3, nota-se que uma priorização da massa do corpo 2 tem impacto significativo na movimentação de minério total, concomitantemente a um aumento da movimentação de estéril. Esse é um indicativo da necessidade de aumento da quantidade de minério liberado do corpo 2 para atingir as metas de produção.

Ademais, os teores dos três cenários apresentados evidenciam a diferença das características geológicas do corpo 1 e 2. Nota-se que priorizando-se a massa do corpo 2, que apresenta menor teor, há um impacto significativo na produção de onças de ouro e isto pode denotar uma variação considerável na viabilidade do empreendimento. Comparando-se os três cenários elaborados com relação ao VPL, tem-se que o cenário 1 é o mais lucrativo, uma vez que apresenta um VPL de US\$ 1.509.432 e os cenários 2 e 3, de US\$ 966.843 e US\$ 392.319, respectivamente.

4.3 Análises de sensibilidade

4.3.1 Produtividade

A média das produtividades deste banco de dados foi de 19,9 t/h e o desvio padrão de 5,16 t/h, para análise de sensibilidade deste indicador considera-se o desvio padrão em percentual de 25,9%. O número de caminhões por semana resultante da variação deste percentual é apresentado pela Figura 31.

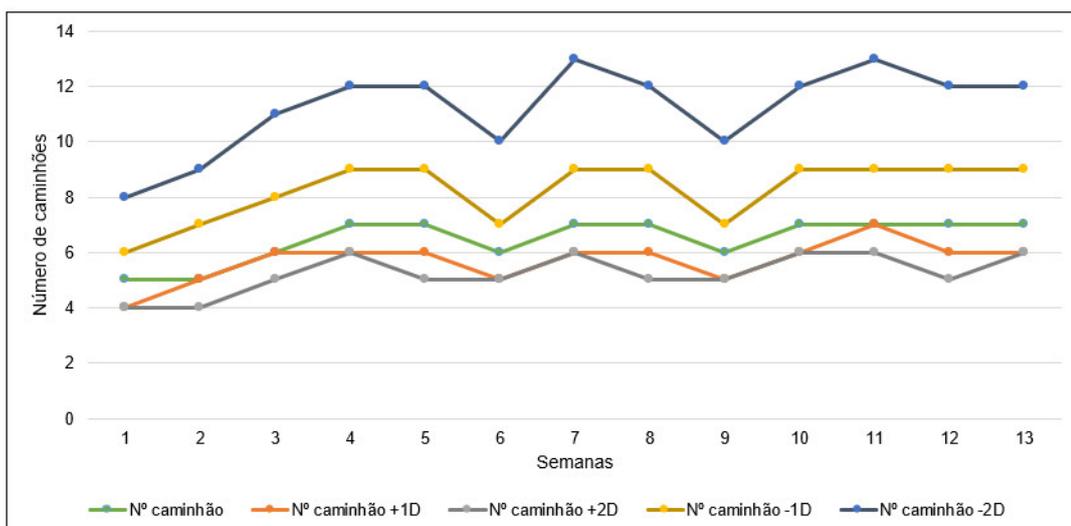


Figura 31 – Número de caminhões por semana

Nota-se que o número de caminhões médio para movimentação de minério e estéril por semana pode chegar a 13 devido a uma redução da produtividade por subnível de dois desvios padrão, já um aumento da produtividade de dois desvios padrão pode resultar em um número de caminhões necessários médio por semana de 5 conforme observado na Figura 31. Na Tabela 8 e Figura 32 pode-se observar o impacto financeiro causado pela variação das produtividades por subnível.

Tabela 8 – Análise de sensibilidade para a produtividade (t/h)

| Variável | -2D | -1D | Valor original | +1D | +2D |
|---------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Produtividade (t/h) | 9,1 | 14,0 | 19 | 23,9 | 28,8 |
| VPL (kUS\$) | 1.307 | 1.445 | 1.509 | 1.552 | 1.577 |
| TIR (%) | 16% | 17% | 18% | 19% | 19% |

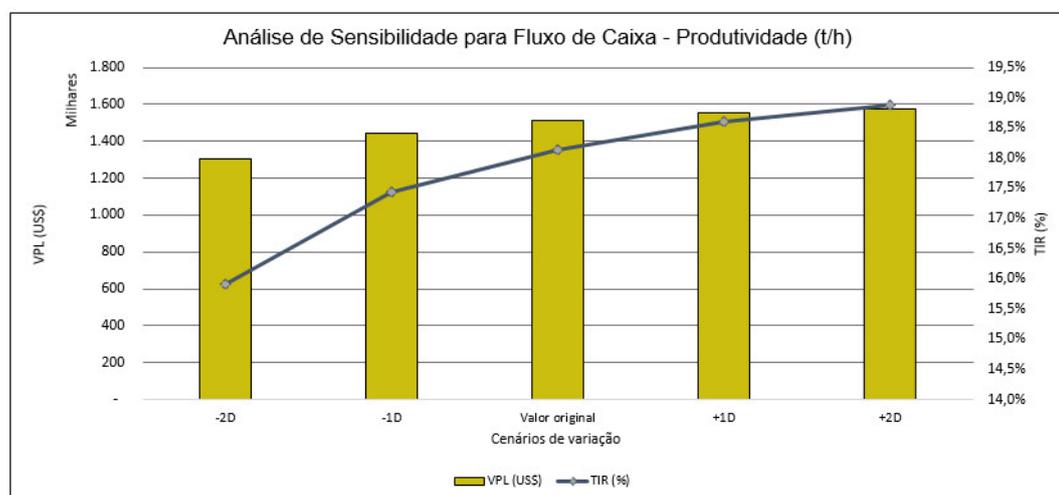


Figura 32 – Gráfico de análise de sensibilidade para a produtividade

A partir da análise de sensibilidade para a produtividade, é possível observar que o projeto é atrativo mesmo que a produtividade apresente uma redução de dois desvios padrão. A viabilidade do projeto apresenta risco apenas em casos em que a produtividade possa sofrer uma redução maior do que dois desvios padrão.

4.3.2 Carga média

Para este banco de dados, o desvio padrão da carga média foi de 5,11 toneladas. A alteração da carga média de um e dois desvios padrão resultou em diferentes produtividades por subnível e a média do número de equipamentos de transporte necessários por semana é mostrado na Figura 33.

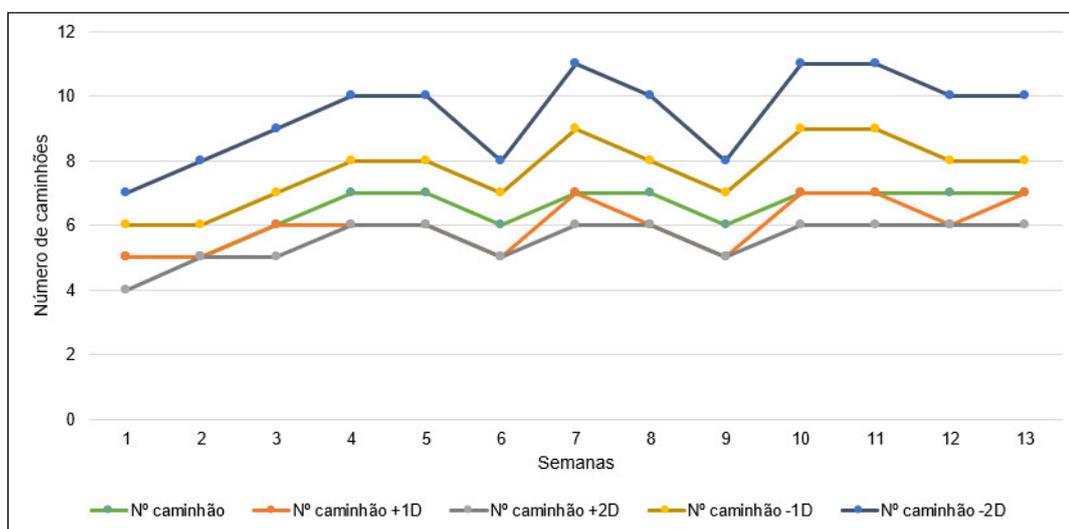


Figura 33 – Número de caminhões por semana

O número de caminhões médio para movimentação de minério e estéril por semana pode chegar a 11 devido a uma redução da carga média, já um aumento da carga média de dois desvios padrão pode resultar em um número de caminhões necessários médio por semana de 6 conforme observado na Figura 33. Na Tabela 9 e Figura 34 pode-se observar o impacto financeiro causado pela variação da carga média de cada caminhão.

Tabela 9 – Análise de sensibilidade para a carga média (t) dos caminhões

| Variável | -2D | -1D | Valor original | +1D | +2D |
|-----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Carga média (t) | 16,5 | 21,6 | 26,7 | 31,8 | 36,9 |
| VPL (kUS\$) | 1.388 | 1.465 | 1.509 | 1.541 | 1.564 |
| TIR (%) | 17% | 18% | 18% | 18% | 19% |

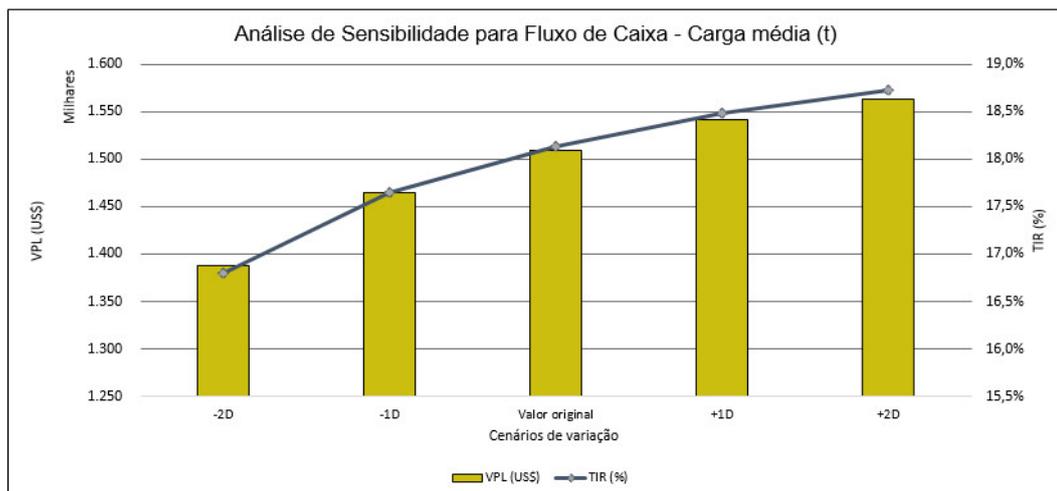


Figura 34 – Gráfico de análise de sensibilidade para a carga média

A partir da análise de sensibilidade para a carga média, é possível observar que o projeto é atrativo mesmo que a carga média apresente uma redução de dois desvios padrão. A viabilidade do projeto apresenta risco apenas em casos em que a carga média possa sofrer uma redução maior do que dois desvios padrão.

4.3.3 Utilização Física

Para o indicador de utilização física foi avaliada a variação relativa à 10% e 20% do valor referência. A alteração da utilização resultou em uma distribuição do número de equipamentos de transporte por semana que pode ser observado na Figura 35.

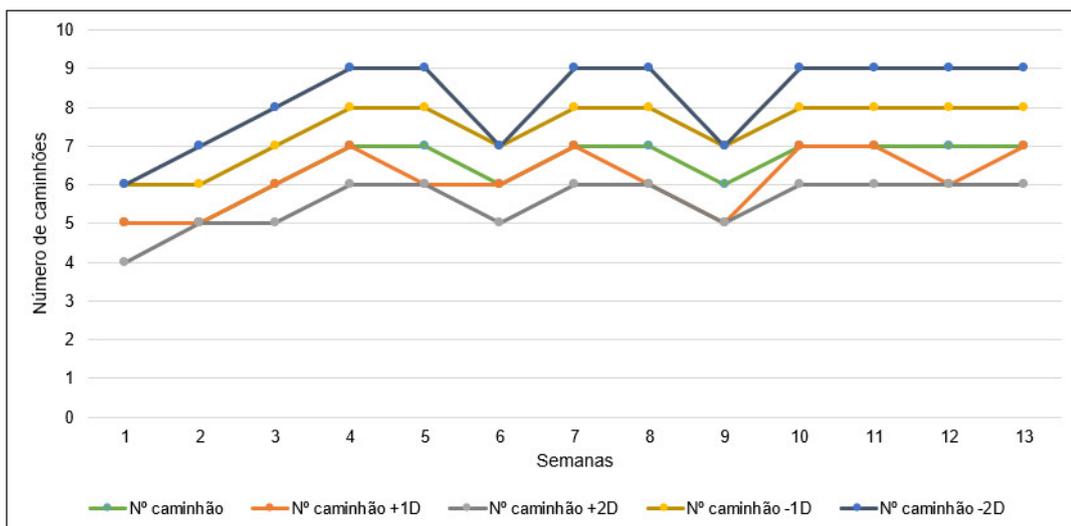


Figura 35 – Número de caminhões por semana

O número de caminhões médio para movimentação de minério e estéril por semana pode chegar a 9 devido a uma redução da utilização, já um aumento da utilização de dois desvios padrão pode resultar em um número de caminhões necessários médio por

semana de 6 conforme observado na Figura 35. Na Tabela 10 e Figura 36 pode-se observar o impacto financeiro causado pela variação da utilização dos equipamentos de transporte.

Tabela 10 – Análise de sensibilidade para a utilização (%)

| Variável | -2D | -1D | Valor original | +1D | +2D |
|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Utilização (%) | 52,0 | 58,5 | 65,0 | 71,5 | 78,0 |
| VPL (kUS\$) | 1.430 | 1.475 | 1.509 | 1.541 | 1.557 |
| TIR (%) | 17,3% | 17,8% | 18,1% | 18,5% | 18,7% |

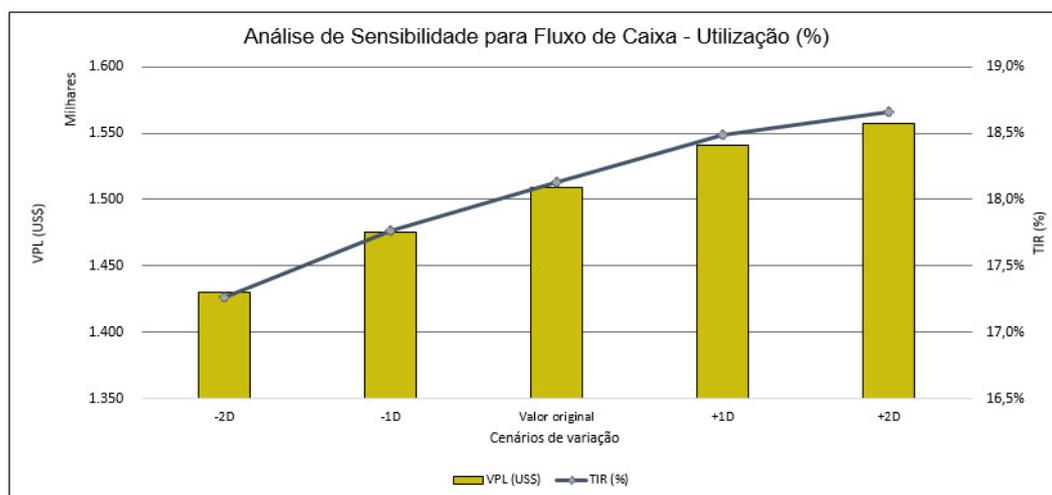


Figura 36 – Gráfico de análise de sensibilidade para a utilização

A partir da análise de sensibilidade para a utilização, é possível observar que o projeto é atrativo mesmo que esta apresente uma redução de dois desvios padrão. A viabilidade do projeto apresenta risco apenas em casos em que este indicador possa sofrer uma redução maior do que dois desvios padrão.

4.3.4 Disponibilidade Física

Para o indicador de disponibilidade física foi avaliada a variação relativa à 10% e 20% do valor referência. A alteração deste indicador resultou em uma distribuição do número de equipamentos de transporte por semana que pode ser observado na Figura 37.

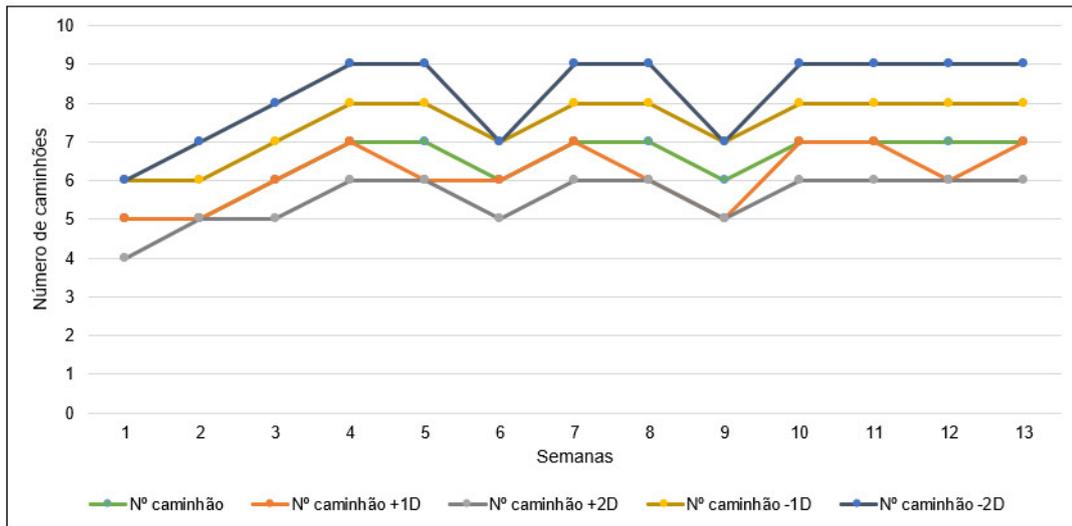


Figura 37 – Número de caminhões por semana

O número de caminhões médio para movimentação de minério e estéril por semana pode chegar a 9 devido a uma redução da disponibilidade, já um aumento do indicador de dois desvios padrão pode resultar em um número de caminhões necessários médio por semana de 6 conforme observado na Figura 37. Na Tabela 11 e Figura 38 pode-se observar o impacto financeiro causado pela variação da disponibilidade física dos equipamentos de transporte.

Tabela 11 – Análise de sensibilidade para a disponibilidade física (%)

| Variável | -2D | -1D | Valor original | +1D | +2D |
|----------------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Disponibilidade física (%) | 64,0 | 72,0 | 80,0 | 88,0 | 96,0 |
| VPL (kUS\$) | 1.449 | 1.483 | 1.509 | 1.537 | 1.556 |
| TIR (%) | 17,5% | 17,9% | 18,1% | 18,4% | 18,7% |

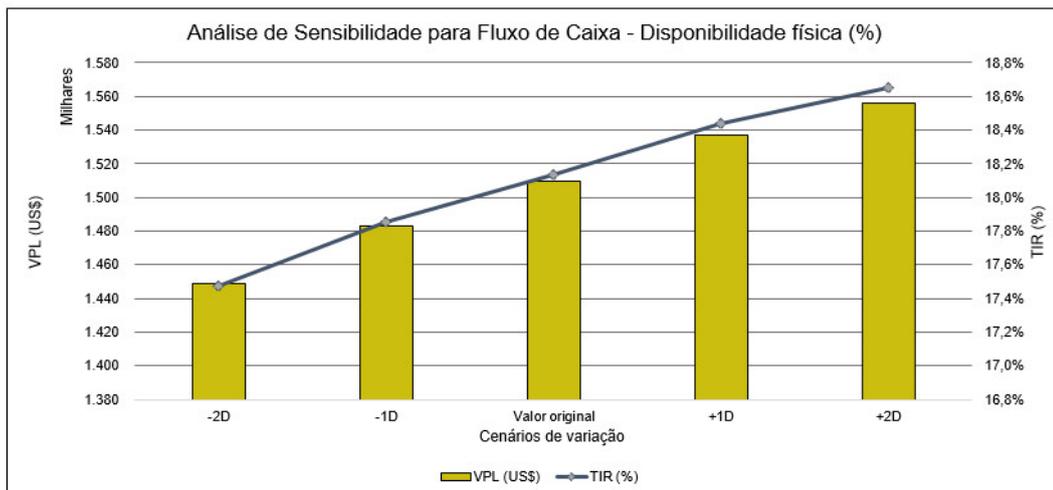


Figura 38 – Gráfico de análise de sensibilidade para a disponibilidade física

A Figura 39 apresenta um gráfico de radar em que são avaliados comparativamente os fatores de sensibilidade analisados para o caso-referência. O gráfico tem por objetivo apresentar a relação entre os VPLs obtidos a partir da variação de cada um dos fatores.

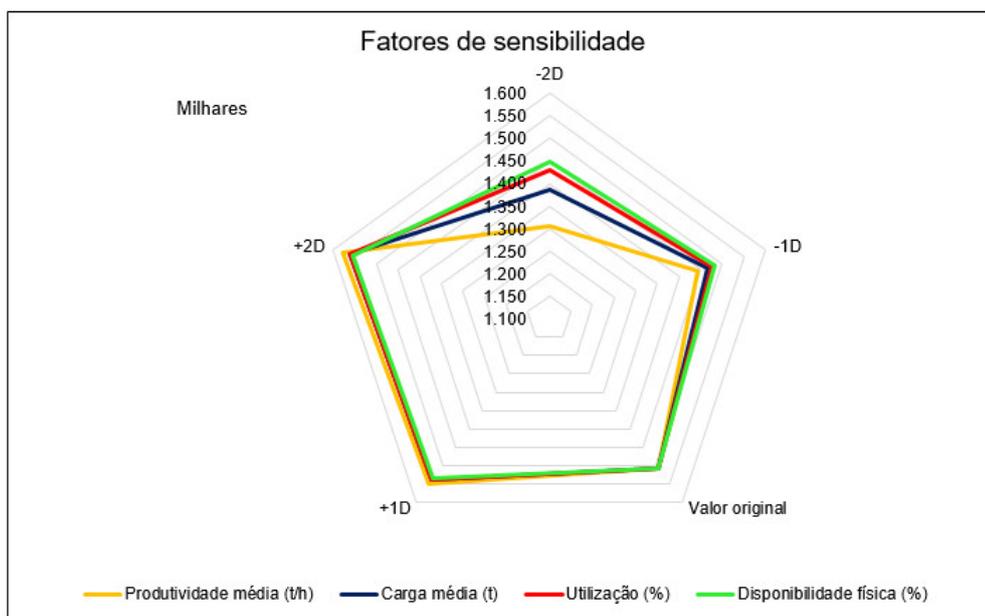


Figura 39 – Gráfico de análise dos fatores de sensibilidade do estudo

A partir dele pode-se constatar que a produtividade, marcada pela linha em amarelo, exerce maior influência sobre os custos operacionais quando comparada aos demais indicadores testados, uma vez que é a que mais se distancia da linha de referência do VPL original (US\$ 1.509.432), conforme evidenciado no cenário -2D. Apesar dos indicadores de utilização (UT) e disponibilidade física (DF) apresentarem variações e resultados semelhantes na análise, salienta-se que estes indicadores representam fatores distintos, sendo o primeiro uma medida da eficiência dos processos operacionais e o segundo uma medida da necessidade de manutenção dos equipamentos.

5 Conclusões e trabalhos futuros

No capítulo final desta dissertação são apresentadas as conclusões referente à metodologia proposta e aos resultados obtidos. Ademais, são exibidas algumas considerações, bem como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Esta dissertação propôs como meta avaliar a adequação da frota de transporte em cenários de planejamento de curto prazo da mineração subterrânea sob condições de restrições operacionais condicionada às metas de produção. Para esse fim, utilizou-se os dados de produção dos equipamentos de uma mina subterrânea que opera pelo método de realce por subníveis. A metodologia foi aplicada em um estudo de caso real para que pudessem ser avaliados os resultados, cumprindo todos os seguintes objetivos específicos previamente definidos no primeiro capítulo:

(i) Os dados relacionados aos indicadores operacionais dos equipamentos de transporte utilizados no projeto foram avaliados com relação à distribuição amostral. Esta análise permitiu que os valores de produtividade fossem determinados.

(ii) Os dados de produtividade foram analisados de modo a quantificar o impacto causado pelas condições operacionais relacionadas à Distância Média de Transporte.

(iii) A metodologia utilizada neste projeto mostra-se aplicável a um dimensionamento dinâmico de equipamentos móveis, em que é possível avaliar a adequação do número de equipamentos em diferentes cenários de plano de produção trimestral.

(iv) Pode-se concluir que aliar os indicadores de desempenho dos equipamentos de transporte com as premissas do plano de produção confere maior aderência às metas de curto prazo. As análises dos cenários permitem uma maior compreensão das oportunidades existentes no plano e por fim, readequação das atividades.

Ademais, conclui-se que é possível aumentar a aderência do plano de produção de curto prazo, e esta depende da exatidão das informações presentes no plano. O planejador deve manter a comunicação constante entre as áreas, visto que a aderência do plano de produção é dependente de informações concisas recebidas pelos diversos setores, sejam eles geologia, infraestrutura, manutenção, etc. É necessário quantificar a confiança dos dados, por meio de análises contínuas das etapas dos processos.

O desenvolvimento e acompanhamento de projetos de melhorias que têm por objetivo aumento da produtividade dos equipamentos de transporte devem ser realizados

continuamente para redução dos custos operacionais. As melhorias devem ser quantificadas e apenas podem ser inseridas em um plano de curto prazo, no caso em que as ações já foram realizadas e os indicadores foram novamente medidos.

Para reduzir o custo relativo às atividades de desenvolvimento, estruturas como pontos de carga e estoque podem não ser planejadas no local mais apropriado, mas essa decisão pode gerar inconsistência no plano de produção, no caso em que a quantidade de recursos para realizar o transporte do material não é alterada. Portanto, é de fundamental importância quantificar o impacto relativo à distância do ponto de carga de cada frente durante a elaboração do plano de desenvolvimento.

5.2 Trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

(i) Aprimorar a metodologia com o uso de software, de modo a integrar o plano de produção às distâncias médias de transporte. Essa melhoria pode ter um impacto muito positivo com o aumento do tempo de análise dos cenários, uma vez que reduz o tempo do planejador para elaboração dos cenários. Em um cenário de curto prazo, os recursos disponíveis são condicionantes fundamentais da aderência dos planos de produção. Por esse motivo, é importante que o dimensionamento dos equipamentos aliados às premissas do plano seja realizado com celeridade, por meio de uma metodologia dinâmica.

(ii) Aplicar a metodologia para outros equipamentos de mineração, avaliando a adequação das frotas dos equipamentos de perfuração, por exemplo, ao plano de produção de curto prazo.

(iii) Quantificar o ganho, em horas-caminhão relacionado à aproximação do ponto de carga e associar ao custo de desenvolvimento destas galerias. A alocação das estruturas dos pontos de carga deve considerar o impacto gerado pela distância entre os realces e estas estruturas. Portanto, a posição ideal em cada subnível pode ser determinada, dado que depende também da distribuição de massa de minério no painel, e o centro de massa é o ponto mais interessante sobre o ponto de vista econômico.

Referências

- AGRICOLA, G. *De Re Metallica*. [S.l.]: Georgius Agricola, 1556.
- CALDEIRA, J. *100 Indicadores da Gestão: Key Performance Indicators*. [S.l.]: Editora Actual, 2012.
- CATERPILLAR. *Caterpillar*. 2021. Disponível em: <<https://www.cat.com>>.
- COUTINHO, H. L. *Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- COUZENS, T. R. *Aspects of production planning: Operating layout and phase plans*. [S.l.]: SME - AIME, 1979.
- DARLING, P. *SME Mining Engineering Handbook*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2011.
- DIMITRAKOPOULOS, R.; JEWBALI, A. Joint stochastic optimisation of short and long term mine production planning: method and application in a large operating gold mine. *Mining Technology*, Taylor & Francis, v. 122, n. 2, p. 110–123, 2013.
- EPIROC. *EPIROC*. 2021. Disponível em: <<https://www.epiroc.com>>.
- FONTOURA, D. *Método para auxílio na definição da quantidade de minério liberado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- GERTSCH, R. E.; BULLOCK, R. L. *Techniques in Underground Mining*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1998.
- HARD-LINE. *Hard-Line*. 2022. Disponível em: <<https://www.hard-line.com/products/rrc-radio-remote-control/>>.
- HARTMAN, H. L. *Introductory Mining Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.
- HEBERLE, J. M. C. *Desenvolvimento de metodologia para consolidação de indicadores de desempenho para controle e gestão na mineração: Um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- HOOVER, H. C. *Principles of mining*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1909.
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. *Open Pit Mine Planning and Design*. [S.l.]: CRC Press, 2013.
- HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. *Underground Mining Methods*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2001.
- JUNIOR, W. S. F. *Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

LEWIS; CLARK. Introductory mining engineering. In: _____. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1964. cap. 9.

LOPES, J. R. *Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

MARTINO, R. et al. Digging deeper: Trends in underground hard-rock mining for gold and base metals. *McKinsey Company*, McKinsey Company, v. 1, n. 1, p. 5, 2021.

MINEWIKI. *Equipment selection*. 2019. Disponível em: <http://minewiki.engineering.queensu.ca/mediawiki/index.php/Equipment_selection#column-one>.

NADER, B.; TOMI, G.; PASSOS, A. O. Indicadores-chave de desempenho e a gestão integrada da mineração. *Revista Escola de Minas*, Escola de Minas de Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 537–542, 2012.

NERY, M. A. C.; SILVA, E. A. *Balanço Mineral Brasileiro 2001*. [S.l.]: DNPM, 2001.

PAIVA, G. *Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

PERONI, R. L. Planejamento de lavra a céu aberto – ferramenta para definições estratégicas e operacionais. *Conselho em Revista*, Conselho em Revista, v. 82, n. 32, p. 32, 2011.

PINTO, E. B. *Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. *Mineral Resource Estimation*. [S.l.]: Springer, 2014.

THORLEY, U. *Open pit mine planning: analysis and system modeling of conventional and oil sands applications*. Tese (Doutorado) — Queen’s University, 2012.

VOLVO. *Volvo*. 2021. Disponível em: <<https://www.volvoce.com/brasil>>.