



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



GABRIEL TOLEDO FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA POR  
MEIO DA APLICAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE TEOR DE CORTE DINÂMICA  
BASEADA NA TEORIA DE LANE**

OURO PRETO

2022

GABRIEL TOLEDO FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA POR  
MEIO DA APLICAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE TEOR DE CORTE DINÂMICA  
BASEADA NA TEORIA DE LANE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Planejamento de lavra

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

OURO PRETO

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383o Ferreira, Gabriel Toledo.  
Otimização do sequenciamento de uma mina subterrânea por meio da aplicação de uma política de teor de corte dinâmica baseada na teoria de Lane. [manuscrito] / Gabriel Toledo Ferreira. - 2022.  
43 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Lavra subterrânea. 3. Planejamento estratégico. I. Souza, Felipe Ribeiro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.23

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Toledo Ferreira**

### **Otimização do Sequenciamento de uma Mina Subterrânea por Meio da Aplicação de uma Política de Teor de Corte Dinâmica Baseada na Teoria de Lane**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 21 de Outubro de 2022

#### Membros da banca

Doutor - Felipe Ribeiro Souza - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto  
Doutor - José Margarida da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto  
Engenheiro - Frederico Melo - NEXA RESOURCES

Felipe Ribeiro Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Ribeiro Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/10/2022, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0417521** e o código CRC **4D930702**.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Alberto e Seila, por me apoiarem na realização desse sonho que agora se concretiza. Ao meu irmão Felipe, pelas conversas de bandas e jogos.

A minha namorada Amanda, pelo carinho, companhia e apoio, principalmente na reta final.

Obrigado por me incentivar a ser melhor.

Aos meus amigos de JF e às amigadas criadas em Ouro Preto. Com vocês vivi com certeza os melhores anos da minha vida até agora.

Aos meus colegas de trabalho, Fred, João, Mari, Patrick, Paulo, Rui, Villa, Vitor, Walter e Willian, pelo suporte e aprendizado.

A comunidade da UFOP, principalmente, professores e técnicos do DEMIN. Obrigado pelo ensino transmitido, de qualidade e gratuito. Em especial, a meu orientador Felipe, pelas trocas e apoio.

Por último, meus agradecimentos para a gloriosa República Katapulta, por me apresentar grandes amigos, e por me deixar fazer parte da sua grande história.

## RESUMO

A área de planejamento estratégico na mineração é importante para assegurar que todos os desafios e oportunidades em um novo projeto sejam considerados para posteriores tomadas de decisão. A capacidade de geração de valor para um estudo de viabilidade passa pela criação de diferentes cenários, por meio de mudanças na cadeia de produção ou em políticas estratégicas, como políticas de estocagem e teor de corte a ser utilizado. O objetivo do trabalho é aplicar a teoria de política de teor de corte dinâmico desenvolvida por Lane na etapa de sequenciamento de um depósito polimetálico subterrâneo. A metodologia apresentada por Lane tem como finalidade a maximização do Valor Presente Líquido do empreendimento, métrica econômica comumente utilizada para estudos de viabilidade econômica de depósitos minerais, considerando as capacidades produtivas do sistema estudado. Os cenários avaliados obtiveram sucesso em incrementar valor ao projeto sem a necessidade de investimentos adicionais, exibindo a aplicabilidade da teoria de Lane para depósitos subterrâneos. Além disso, diferentes cenários com mudanças nas capacidades produtivas do sistema foram analisados, buscando avaliar a viabilidade econômica de novos investimentos. Na mina estudo de caso, o projeto para implementação de novas tecnologias, como *ore sorting*, aliados à otimização de sequenciamento produtivo guiados pela aplicação da teoria de Lane, geraram indicadores econômicos superiores àqueles apresentados no cenário base.

**Palavras-chave:** Planejamento estratégico; Teor de corte; Teoria de Lane; Sequenciamento; Otimização; Subterrânea.

## ABSTRACT

The area of strategic planning in mining is important to ensure that all challenges and opportunities in a new project are considered for later decision-making. The ability to generate value for a feasibility study involves the creation of different scenarios, through changes in the production chain or in strategic policies, such as stockpiling and the cut-off grade policies to be used. The objective of this paper is to apply the dynamic cut-off theory developed by Lane to the scheduling stage of an underground polymetallic deposit. The methodology presented by Lane aims to maximize the Net Present Value of the enterprise, an economic metric commonly used for studies of economic viability of mineral deposits, considering the productive capacities of the system studied. The scenarios evaluated were successful in increasing the value of the project without the need for additional investments, showing the applicability of Lane's theory to underground deposits. In addition, different scenarios with changes in the productive capacities of the system were analysed, seeking to evaluate the economic viability of new investments. In the mine case study, the project to implement new technologies, such as ore sorting, combined with the optimization of production sequencing guided by the application of Lane's theory, generated economic indicators superior to those presented in the baseline scenario.

**Keyword:** Strategic planning; Cut-off grade; Lane's Theory; Scheduling; Optimization; Underground.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CICLO BÁSICO DOS TRÊS TIPOS DE PLANEJAMENTO (ADAPTADA DE OLIVEIRA, 2017).....	10
FIGURA 2 - CAPACIDADE RELATIVA DE INFLUENCIAR CUSTOS (ADAPTADA DE HUSTRULID, KUCHTA E MARTIN, 2013) .....	11
FIGURA 3 - INCREMENTO DE VALOR PRESENTE <i>VERSUS</i> TEOR DE CORTE (ADAPTADA DE LANE, 1988).....	15
FIGURA 4 - ATIVIDADES PARA DEFINIÇÃO DO PROJETO.....	18
FIGURA 5 - VISTA DO <i>HANGINGWALL</i> .....	19
FIGURA 6 - ATIVIDADES PARA DEFINIÇÃO DO SEQUENCIAMENTO ANUAL.....	26
FIGURA 7 - VISTA DA MINA COM DESTAQUE PARA REGIÃO DE ALTO TEOR .....	27
FIGURA 8 - SIMPLIFICAÇÃO DE <i>ORE SORTER</i> , APRESENTANDO FONTE, SENSOR, PROCESSADOR, ATUADOR E AS PILHAS DE MATERIAL ACEITO/REJEITADO (GÜLCAN E GÜLSOY, 2017) .....	36
GRÁFICO 1 - <i>NET SMELTER RETURN</i> REAL <i>VERSUS</i> CALCULADO .....	22
GRÁFICO 2 - PERFIL DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO BASE.....	23
GRÁFICO 3 - DISTRIBUIÇÃO DE TEOR NO PLANO DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO BASE .....	24
GRÁFICO 4 - RECEITAS, CUSTOS E LUCRO DO CENÁRIO BASE .....	24
GRÁFICO 5 - OBJETIVOS DE TEOR MÉDIO PARA SEQUENCIAMENTO DO CENÁRIO 1 .....	27
GRÁFICO 6 - PERFIL DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 1 .....	28
GRÁFICO 7 - DISTRIBUIÇÃO DE TEOR NO PLANO DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 1 .....	29
GRÁFICO 8 - RECEITAS, CUSTOS E LUCRO DO CENÁRIO 1 .....	29
GRÁFICO 9 - OBJETIVOS DE TEOR MÉDIO PARA SEQUENCIAMENTO DO CENÁRIO 2 .....	30
GRÁFICO 10 - PERFIL DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 2 .....	31
GRÁFICO 11 - DISTRIBUIÇÃO DE TEOR NO PLANO DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 2 .....	31
GRÁFICO 12 - RECEITAS, CUSTOS E LUCRO DO CENÁRIO 2 .....	32

GRÁFICO 13 - OBJETIVOS DE TEOR MÉDIO PARA SEQUENCIAMENTO DO CENÁRIO 3 .....	33
GRÁFICO 14 - PERFIL DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 3 .....	33
GRÁFICO 15 - DISTRIBUIÇÃO DE TEOR NO PLANO DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 3 .....	34
GRÁFICO 16 - RECEITAS, CUSTOS E LUCRO DO CENÁRIO 3 .....	34
GRÁFICO 17 - OBJETIVOS DE TEOR MÉDIO PARA SEQUENCIAMENTO DO CENÁRIO 4 .....	36
GRÁFICO 18 - PERFIL DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 4 .....	37
GRÁFICO 19 - DISTRIBUIÇÃO DE TEOR NO PLANO DE PRODUÇÃO DO CENÁRIO 4 .....	38
GRÁFICO 20 - RECEITAS, CUSTOS E LUCRO DO CENÁRIO 4 .....	38
GRÁFICO 21 - COMPARATIVO DE VPL EM PERÍODOS DIFERENTES .....	40
GRÁFICO 22 - COMPARATIVO ENTRE AS POLÍTICAS DE TEOR DE CORTE .....	41

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DA MINA ESTUDO DE CASO .....	20
TABELA 2 - PARÂMETROS ECONÔMICOS DA MINA ESTUDO DE CASO .....	21
TABELA 3 - PARÂMETROS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE EQUIPAMENTOS DE <i>ORE SORTING</i> .....	35
TABELA 4 - COMPARAÇÃO DE INDICADORES ECONÔMICOS .....	39

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	7
2	OBJETIVOS.....	9
	2.1 OBJETIVO GERAL .....	9
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
	3.1 CONTEXTO GERAL.....	9
	3.2 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO EM MINERAÇÃO .....	10
	3.3 CONCEITOS ECONÔMICOS.....	11
	3.4 POLÍTICAS DE TEOR DE CORTE.....	13
	3.5 CUSTOS FIXOS E VARIÁVEIS.....	16
4	METODOLOGIA .....	17
	4.1 ESTUDO DE CASO.....	18
	4.2 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO .....	18
	4.3 INDICADOR DE TEOR .....	21
	4.4 CENÁRIO BASE .....	23
5	RESULTADOS.....	25
	5.1 CENÁRIO 1.....	27
	5.2 CENÁRIO 2.....	30
	5.3 CENÁRIO 3.....	32
	5.4 CENÁRIO 4.....	35
	5.5 COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS .....	38
6	CONCLUSÃO .....	42
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

## 1 INTRODUÇÃO

A fase de planejamento estratégico para operações mineiras passa por diversas etapas, com diferentes graus de impacto permanentes no projeto e, durante sua evolução, com inclusão de mais conhecimento a respeito do depósito mineral e as capacidades técnicas de exploração, possibilidades para melhorar os parâmetros econômicos de avaliação surgem. A oportunidade de incremento de valor pode ser possível no estabelecimento dos limites econômicos de lavra definidos, capacidades de produção, sequenciamento, políticas de teor de corte e políticas de estocagem, entre outros aspectos.

O planejamento estratégico de políticas de teores de corte é importante para empreendimentos mineiros, evitando o fenômeno conhecido como “lavra predatória”, em que apenas zonas de alto teor são lavradas visando ganhos de curto prazo, porém com o risco de tornar inviável a lavra das regiões remanescentes. Em minas subterrâneas e céu aberto, o controle da qualidade do material lavrado nos anos iniciais do empreendimento é valioso. Devido ao alto custo associado às atividades de desenvolvimentos primários e secundários, que permitem o início da lavra em escala da reserva mineral ao desbloquear acesso ao corpo mineralizado.

Na indústria mineira, existem três práticas mais aplicadas para definição de teor de corte que variam em graus de complexidade. A análise de equilíbrio entre receita e custo, chamada de *break-even* é bastante usada em operações mineiras ao redor do mundo, e o limite que diferencia o minério de estéril está apenas relacionado aos custos associados à produção. Para essa análise, o retorno financeiro obtido da lavra de uma quantidade de material deve ser igual ao custo para lavar essa referida quantidade. Mortimer (1950) definiu uma nova metodologia para cálculo de teor de corte, em que o teor médio do depósito deveria garantir uma margem mínima de lucro e não apenas pagar sua lavra. Ainda há resquícios de análise via *break-even*, visto que o menor teor de corte viável é aquele em que a lavra do material se paga. Lane (1988) em seu livro *The Economic Definition of Ore* (1988), desenvolve uma metodologia para calcular diferentes teores de corte, que objetiva maximizar o Valor Presente Líquido de minas, considerando as capacidades de produção presentes nas operações.

A metodologia de Lane fundamentou a execução de algoritmos como Lerchs-Grossmann, e *Pseudoflow* mais recentemente, para otimização de cava final. No entanto, para minas subterrâneas, a teoria formulada em 1988, ainda é pouco aplicada. O presente trabalho, objetiva, por meio de um estudo de caso de uma mina subterrânea de minérios de Zn/Pb, avaliar

a otimização do Valor Presente Líquido do projeto por meio da aplicação de uma política de teor de corte dinâmica de Lane em seu sequenciamento produtivo.

Diferentes cenários foram gerados, com mudanças nos dados de entrada para definição de teores de corte em cada ano, sendo o sequenciamento final para cada cenário, o conjunto do sequenciamento ótimo anual definido. Ainda houve a avaliação de um cenário com expansão da capacidade produtiva da planta de beneficiamento mineral e outro cenário com adição de um circuito de *ore sorting*, buscando adicionar valor para o projeto.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto de mina subterrânea por meio da otimização de uma política de teor de corte dinâmica, baseada na teoria apresentada por Lane (*The Economic Definition of Ore*, 1988).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar o sequenciamento de uma mina em depósito polimetálico de minérios de Zn/Pb;
- Avaliar qual o melhor indicador de teor a ser utilizado;
- Identificar o gargalo da operação em cada ano de produção e otimizar o fluxo de caixa anual a partir dessa análise;
- Identificar outros gargalos produtivos do projeto.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 CONTEXTO GERAL

Na avaliação de um projeto de mineração como um negócio, se deve atentar para a estratégia empresarial adotada. Devido aos objetivos e políticas que devem ser seguidas pela empresa ao longo prazo, levando em conta as qualidades e capacidades da companhia, as características do ambiente ao seu redor e a adequação entre ambos (CHIAVENATO, 2000). Para a conquista dos resultados almejados pela empresa, planos devem ser criados para lidar com a incerteza do ambiente e maximizar as vantagens competitivas que se possui. O planejamento para atingir esses objetivos é feito de maneira integrada, com três horizontes de gerenciamento em mente: planos estratégicos, táticos e operacionais.

Ao planejamento estratégico, restringido geralmente aos níveis hierárquicos mais altos de instituições, compete a definição dos objetivos e políticas da empresa, tal como as ações que devem ser tomadas para garantia desses resultados, visando a influência de agentes externos e internos (OLIVEIRA, 2007). É papel também do planejamento estratégico o estabelecimento de uma metodologia, coerente e confiável, para guiar tomadas de decisão para a empresa.

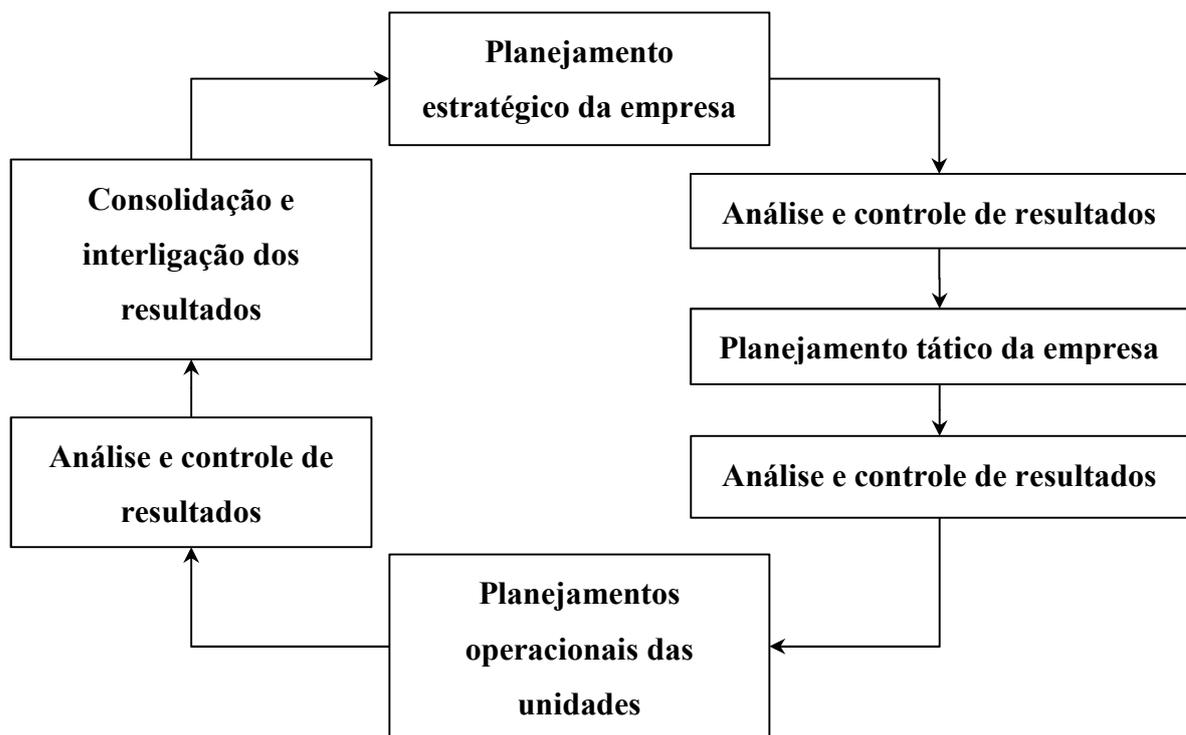
O planejamento tático é voltado para departamentos e gerências compostas por equipes multidisciplinares, ou seja, não é genérico para todos os departamentos constituintes da instituição. Além de possuir uma abrangência técnica reduzida, em comparação ao planejamento estratégico, também possui uma influência temporal menor, atendendo a prazos

em escala intermediária (CHIAVENATO, 2000). Deve ser integrado aos objetivos de longo prazo e também programar planos de ação necessários para o curto prazo de um negócio.

Por sua vez, o planejamento operacional é voltado principalmente para a realização das tarefas necessárias, e sua maior preocupação é programar “o quê” deve ser feito e “como”. (CHIAVENATO, 2000). A abrangência de planos operacionais é restrita a equipes e comitês e sua influência temporal é curtíssima, devido à mudança de tarefas e operações que devem ser concluídas.

É importante salientar que para o cumprimento dos objetivos e políticas definidas pela estratégia empresarial, a visão integrada dos diferentes horizontes de planejamento é vital. A implantação de ações e projetos que sejam capazes de alcançar o objetivo estratégico, também são fundamentais para o sucesso do negócio (OLIVEIRA, 2007), como observamos na Figura 1.

**Figura 1 – Ciclo básico dos três tipos de planejamento**



Fonte: Adaptada de Oliveira, 2007

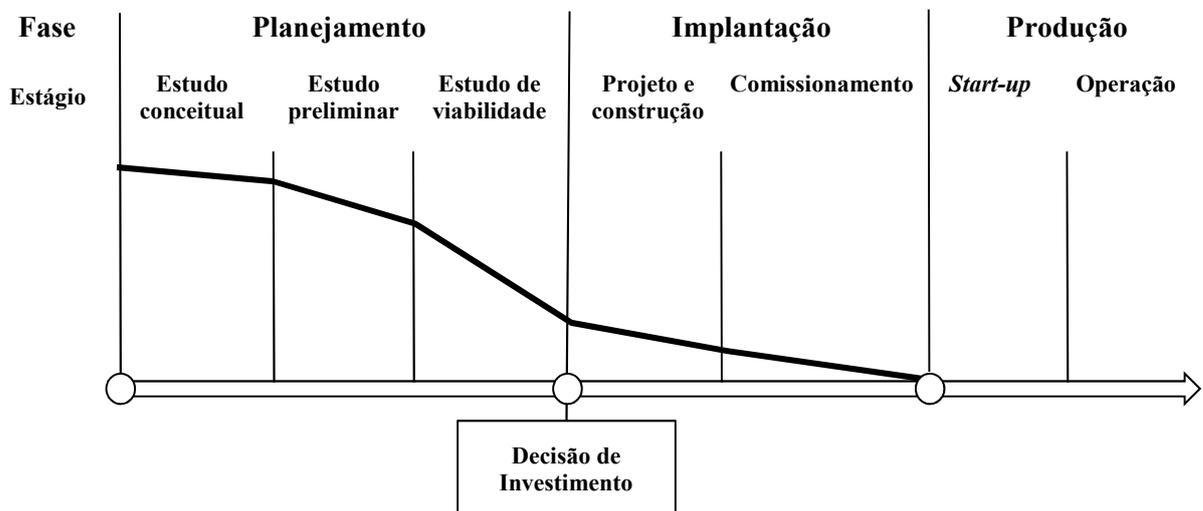
### 3.2 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO EM MINERAÇÃO

Dos diversos processos que fazem parte de um empreendimento mineiro, pode-se considerar que o planejamento estratégico é um dos principais condutores de valor para a

operação (DIMITRAKOPOULOS, 2018), possuindo influência sobre toda a cadeia de produção.

Nos estágios iniciais de planejamento, as decisões estratégicas tomadas ainda nos estudos conceituais, preliminares e de viabilidade apresentam diferente flexibilidade para permitir mudanças de estratégia. Como representado na Figura 2, com o avanço dessas decisões, baseadas no aumento do conhecimento sobre o depósito mineral, sobre as estimativas de custos de investimentos (*CAPEX*) e operacionais (*OPEX*), receitas, entre outros fatores, a capacidade de influência nas mudanças no projeto a ser implantado diminui. E a partir da decisão de investimento, a variabilidade dos custos cai drasticamente.

Figura 2 - Capacidade relativa de influenciar custos



Fonte: Adaptada de Hustrulid, Kuchta e Martin, 2013

O planejamento estratégico para minas é focado na maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento, usando diferentes ferramentas, de acordo com a característica da operação a ser otimizada. Entre as maneiras para conduzir um estudo de maximização de VPL, têm-se criação de diferentes cenários de sequenciamento, *pushbacks*, otimização de cava final, políticas de estocagem e políticas de teor de corte (DIMITRAKOPOULOS, 2018).

### 3.3 CONCEITOS ECONÔMICOS

A análise de planos estratégicos para mineradoras é uma tarefa com forte influência sobre os fatores econômicos externos às operações e sua incerteza associada. Os ciclos de preço

de metais base geralmente são de quatro a sete anos (HUSTRULID, KUCHTA & MARTIN, 2013), e dessa forma, flutuações de valor devem ser consideradas nas estimativas de receitas futuras, para que os momentos de alta e queda dos ciclos econômicos sejam previstos e o plano seja ajustado de acordo. A incerteza de preços deve ser supervisionada, e levar a criação de planos que permitam flexibilidade operacional.

A questão de preços também influencia em qual taxa de produção deve-se aplicar para que o retorno financeiro futuro seja maximizado e o período de retorno seja o menor sem inviabilizar o avanço do projeto. Conceitos como período de retorno, valor presente líquido e taxa interna de retorno são usados extensamente na indústria de mineração para avaliação econômica de empreendimentos.

Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), definem de maneira simples esses três conceitos importantes:

- **Período de retorno** - o tempo necessário para que o retorno financeiro futuro pague o investimento inicial;
- **Valor presente líquido (VPL)** - a soma de fluxos de caixa futuros menos o investimento inicial, descontados de uma taxa (conhecida como taxa de desconto). É importante entender a perda de valor futuro quando comparado ao presente. A equação para o cálculo de VPL é a seguinte:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - \text{Investimento inicial} \quad (1)$$

em que

$t$  - período de tempo (1;2;3...)

$FC_t$  - fluxo de caixa no período  $i$ , em \$

$i$  - taxa de desconto

- **Taxa interna de retorno** - é a taxa de retorno que zera todos os fluxos de caixa futuros para o presente, e torna esses valores igual ao valor inicial do investimento. Pode ser calculada por meio da fórmula:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - \text{Investimento inicial} \quad (2)$$

em que

$t$ - período de tempo (1;2;3...)

$FC_t$  - fluxo de caixa no período  $i$ , em \$

- **Taxa de desconto** - depende das fontes de investimento que uma empresa usa para manter seu funcionamento, e é a taxa mínima de retorno que devesse ter para garantir lucro. É calculada por meio da seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de desconto } (i) = X_1 \times i_1 + X_2 \times i_2 \quad (3)$$

em que

$X$  - percentual que o custo de capital representa no total da empresa

$i$  - a taxa de retorno esperada pelo investimento

Em grandes empresas, com diversas fontes de capital, a definição da taxa de desconto é mais complexa, porém ainda é essencial para que os objetivos econômicos sejam definidos corretamente.

Logo, para análise de viabilidade econômica de projetos de mineração, a aplicação desses conceitos é feita de maneira generalizada na indústria global. Empreendimentos mineiros são considerados economicamente viáveis quando possuem valor presente líquido positivo, e uma taxa interna de retorno superior ao custo médio ponderado de capital da empresa.

### 3.4 POLÍTICAS DE TEOR DE CORTE

A definição de teor de corte, segundo Rendu (2008), é “a quantidade mínima de produto valioso ou metal que uma tonelada métrica de material deve conter para que seja enviado para a planta de beneficiamento”. Ou seja, o teor de corte marca o limite entre material que deve ser considerado minério, e deve ser processado, e material estéril, que deve ser empilhado ou deixado *in situ*. No contexto de planejamento de mina, a primeira teoria que vincula a estimativa

de teor de corte com maximização de VPL, é aquela formulada por Kenneth Lane, em 1988, pelo livro intitulado *The Economic Definition of Ore*.

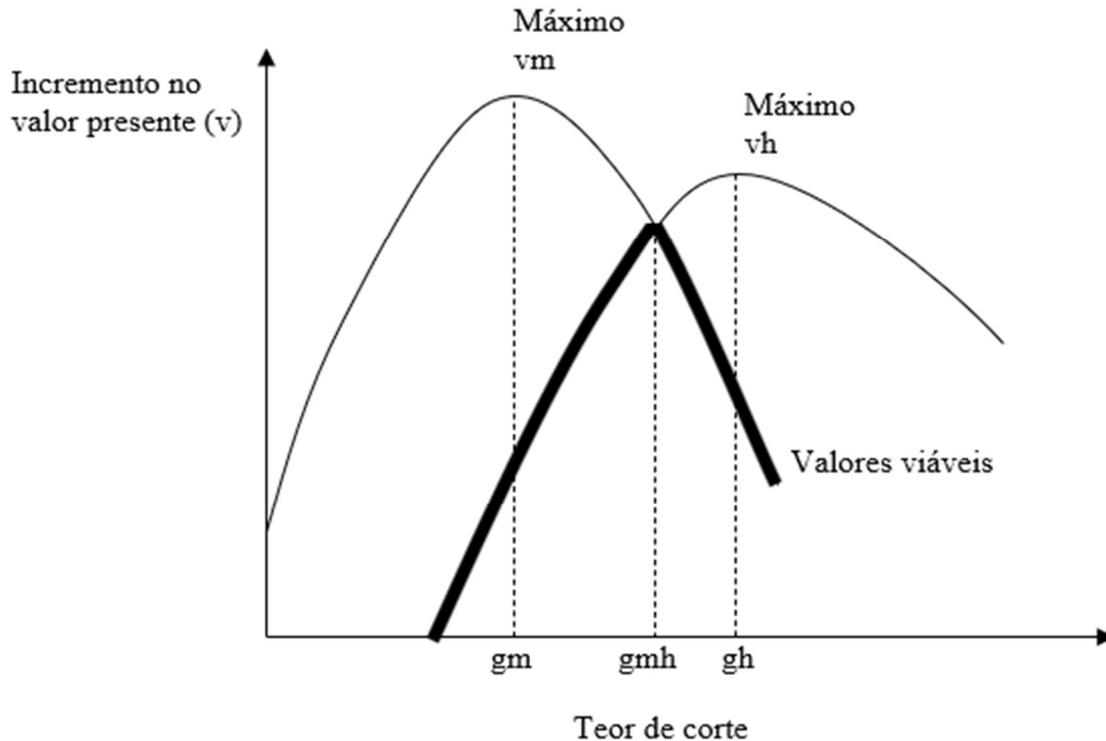
A metodologia formalizada por Lane em seu livro tem como objetivo a maximização do Valor Presente Líquido do empreendimento, tendo como princípio a melhor utilização do depósito mineral, em vista das capacidades de lavra, planta e venda (chamado de *marketing* no livro) definidos no projeto. O Valor Presente Líquido é a soma de fluxos de caixa futuros, descontados por uma taxa de desconto pré-definida.

Na teoria de Lane, para a avaliação completa de qual teor de corte melhor atende às necessidades da operação, deve ocorrer um balanceamento entre as atividades que restringem a mina. No total, há seis fórmulas que definem o possível teor de corte ótimo. Segundo Lane (1988), o teor de corte ótimo para uma atividade mineira é um dos seguintes:

- ***gm*** - restrição de capacidade na mina
- ***gh*** - restrição de capacidade na planta
- ***gk*** - restrição de capacidade de venda
- ***gmh*** - balanceamento entre mina e planta
- ***gmk*** - balanceamento entre mina e venda
- ***ghk*** - balanceamento entre planta e venda

Para melhor entender a relação entre os teores listados acima, analisa-se a Figura 3 conceitual de Incremento de Valor *versus* Teor, para as restrições de mina e planta.

Figura 3 - Incremento de valor presente *versus* teor de corte



Fonte: Adaptada de Lane, 1988

As duas curvas da Figura 3 representam o comportamento do incremento de valor no projeto de mineração quando o seu teor de corte sobe. É possível perceber a diferente influência quando se consideram diferentes restrições de capacidade, no exemplo acima, sendo uma para mina e outra para planta.

Também fica clara a importância do balanceamento entre os teores de corte que se usa. O incremento de valor que cada curva representa somente é produto da avaliação de uma única restrição produtiva na cadeia de valor. No entanto, em sistemas com duas ou mais restrições, deve-se avaliar se há a probabilidade de ocorrer sobrecarga de material em uma etapa da operação. Por exemplo, caso seja feita a escolha de **gm** como teor de corte para o empreendimento, a restrição na capacidade de planta não será respeitada, impedindo que o ganho potencial de valor com essa decisão seja obtido. O mesmo é verdade para o uso de **gh**, que não irá atingir a valorização esperada pelo projeto, por não considerar a capacidade de lavra existente.

Além da situação mostrada na Figura 3, em que o ponto ótimo de balanceamento é o teor de corte de balanceamento, também podem haver ocorrências em que a mediana entre os pontos seja o teor de corte limitante **gm**, **gh** ou **gk** (Lane, 1988).

De acordo com Hall (2014), os principais conceitos que devem ser destacados na teoria de Lane são os seguintes:

- Teor de corte ótimo - usado para otimizar alguma métrica (no caso de Lane, VPL)
- Política de teor de corte dinâmico - o planejamento de uma sequência de teores de corte capaz de contabilizar o custo de oportunidade com o avanço do tempo. O objetivo é maximizar o VPL restante do empreendimento. Políticas de teor de corte estático não avaliam a lavra da reserva faltante.
- Balanceamento de teor de corte – evita a superestimativa da capacidade produtiva entre componentes de produção. O balanceamento é função do modelo geológico e capacidades de operacionais, sendo o teor de corte ótimo entre as unidades produtivas geralmente a ser aplicado.
- Custo de oportunidade - de maneira simples, é o benefício que uma operação pode ter ao tomar uma decisão diferente daquela pré-definida. Um exemplo pode ser o potencial ganho (ou não) de valor no projeto, caso seja realizada uma expansão na capacidade de planta, ou frota.

### 3.5 CUSTOS FIXOS E VARIÁVEIS

Uma das grandes dificuldades para conduzir um estudo de otimização de teor de corte é a definição de quais custos devem ser incluídos como custos diretos e indiretos na análise. As diversas atividades que ocorrem em uma operação de mineração podem tornar essa tarefa difícil, e além desse fato, diferentes momentos dos estágios de planejamento requerem diferentes métodos para análise de custos.

De maneira geral, os custos são divididos entre fixos e variáveis, diretos e indiretos, e sua distinção é relativamente simples. Segundo Rendu (2008), custos fixos são aqueles cujo total das despesas não varia com mudanças no nível de produção em relação ao tempo analisado, ao passo de que custos variáveis mudam. Como exemplo de custos variáveis, temos perfuração, carregamento, flotação, que estão relacionados à capacidade de produção. Custos fixos são aqueles como impostos, licenças e afins. Os custos diretos são contabilizados diretamente pela lavra do bloco, geralmente por massa ou volume. Custos indiretos são adicionados diretamente ao fluxo de caixa, pois não são diretamente dependentes da massa lavrada.

O custo indireto é também chamado de custo fixo por Hall (2014). Esses custos são assim chamados pois seu valor não varia com tempo ou com capacidade de produção. Em

realidade, são custos que são aplicados na operação para, geralmente, aumentar a capacidade de algum componente do complexo, como a expansão de uma planta. Em uma mina subterrânea, pode ser entendido como uma rampa, ou galeria, para acessar uma região do depósito mineral mais afastada. Custos com essa característica possuem uma natureza complexa para poderem ser definidos como variáveis ou fixos, mas devem ser aplicados para cálculos de derivação de teor de corte, em suas respectivas áreas de influência.

Rendu (2008) ainda define o custo de investimento chamado de *sunk costs*, que são aquelas despesas feitas no passado, para iniciar o empreendimento. Esses custos são importantes para estudos de viabilidade nas etapas iniciais do projeto, pois irão influenciar o teor de corte iniciante. No entanto, para avaliações de otimização de teor de corte em estágios mais avançados, esses custos não são considerados.

Com a introdução desses conceitos, é valiosa a definição e diferenciação entre custos capitais de projeto e custos capitais de sustentação. Ambos são comumente classificados como CAPEX (*Capital Expenditures*) sem distinção aparente, e dessa maneira podem tornar confusa sua alocação nos custos para cálculo de teores de corte. De acordo com Hall (2014) custos capitais de projeto são aqueles para melhorar a qualidade ou capacidade de produção e custos capitais de sustentação são aqueles para manter a capacidade existente. Logo, custos capitais de sustentação podem ser classificados como fixos ou variáveis, como por exemplo a troca de um caminhão, que é pontual, porém deve acontecer em algum momento para manutenção dos níveis de produção, sendo ainda que pode ocorrer antes ou após o esperado, variando com eventuais reduções ou incrementos de produção. Custos capitais de projeto podem ser também pontuais, como por exemplo a adição de um novo caminhão à frota com objetivo de aumentar a capacidade de transporte. Desde que, para uma operação, um único conceito seja aplicado de forma consistente e uniforme, a análise para cálculo de teor de corte será válida.

#### **4 METODOLOGIA**

O trabalho tem como objetivo principal a maximização do VPL do projeto de uma mina subterrânea, através da metodologia desenvolvida por Kenneth Lane em seu livro *The Economic Definition of Ore*. A metodologia de Lane é extensamente estudada e aplicada para operações mineiras a céu aberto, porém, para um cenário subterrâneo, seu uso é mais restrito devido a algumas complexidades inerentes à mineração subterrânea.

Com esse fim, definiu-se um projeto de mina para estudo de maximização de Valor Presente Líquido, e com base em seu sequenciamento, buscou-se avaliar como poderia haver

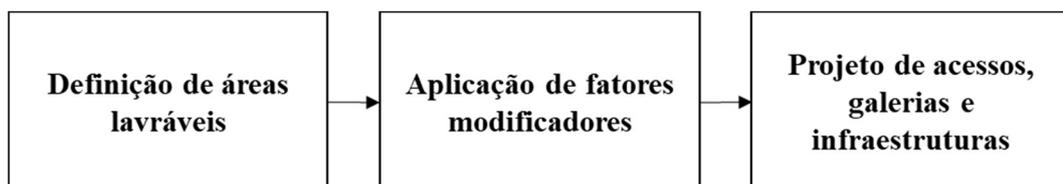
um incremento de valor a partir de alterações na política de teor de corte vigente. Além disso, pretendeu-se estimar possíveis incrementos na capacidade de produção e melhorar o fluxo de caixa do projeto.

#### 4.1 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso definido foi um projeto de mina subterrânea de zinco e chumbo existente no Brasil. Por se tratar de um projeto, há ainda necessidade de investimentos para operacionalização da mina. Esses custos serão calculados e incluídos no fluxo de caixa a ser analisado para avaliação de VPL. Foram incluídos fatores nos dados fornecidos do projeto, para garantir confidencialidade da empresa.

A mina subterrânea tem como proposta que a lavra do minério seja feita por meio do método AVOCA, uma variação de *Sublevel Longhole Open Stopping*, com enchimento de estéril nos realces após a lavra. Para seleção das áreas de lavra, foi utilizado um teor de corte *break-even*, baseado nos custos de produção estimados com base em operações similares. Para efeitos de longo prazo, fatores de diluição operacional e recuperação planejada foram aplicados nos realces para penalizar as massas e teores gerados. Em relação às capacidades de produção, definiu-se que a capacidade de mina, ou seja, a movimentação total de material (minério + estéril) é 2,16 milhões de toneladas por ano, e a capacidade de beneficiamento de 1,08 milhões de toneladas por ano. A capacidade de venda (ou refino, segundo a literatura de Lane) não impacta na produção, para esse estudo. As atividades realizadas para definição do desenho do projeto estão resumidas na Figura 4.

**Figura 4 - Atividades para definição do projeto**



Fonte: autor

#### 4.2 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Como primeira etapa da definição do projeto da mina, a partir de um modelo de blocos fornecido, buscou-se determinar as áreas da mina economicamente viáveis para lavra. Essas áreas foram definidas com base em diversas premissas usadas por minas em contextos

geológicos semelhantes, porém, por se tratar de um projeto em fases iniciais de avaliação, podem ocorrer alterações nas premissas adotadas. Entre os parâmetros geomecânicos e operacionais considerados, deve-se destacar: diluição operacional, recuperação planejada, pilares de solapamento (*sill pillar*), distância a superfície, pilares em coluna (*rib pillar*), composição litológica dos realces, densidade, dimensões mínimas e máximas e inclinação mínima e máxima para lavra.

Com a primeira rodada de otimização de realces realizada, uma verificação dos *stopes* gerados foi feita para garantir que seja considerado apenas áreas com viabilidade técnica e econômica de extração. Como procedimento de premissas geomecânicas, também se definiu as zonas de pilares da mina, para garantir estabilidade geral da operação. Apenas os realces que cumpriam com especificidades técnicas e econômicas foram selecionados para serem usados como base de *layout* da mina.

Como princípio do método AVOCA, foram desenhadas galerias de minério na base e no topo dos *stopes*, para serem conduzidas, respectivamente, as atividades de extração e perfuração. Em regiões especiais da mina, abaixo de pilares de solapamento, a perfuração é feita de maneira ascendente, logo removendo a necessidade de galerias superiores. O *layout* final pode ser observado na Figura 5.

**Figura 5 - Vista do *hangingwall***



Fonte: autor

Na figura, consegue-se destacar em roxo, os realces para lavra em AVOCA, em amarelo, os realces para lavra em *Open Stopping*, e em vermelho e rosa, as rampas e galerias de minério, respectivamente. Outras galerias de infraestrutura, como ventilação, bombeamento, câmaras de carregamento, estão localizadas no *footwall* do corpo mineralizado, e logo não é possível sua visualização. O escoamento do material será realizado por meio de rampas, sendo uma rampa de acesso para cada porção do corpo. Para minas subterrâneas próximas à superfície, como é o caso, esse tipo de via de acesso e produção é recomendado (COSTA, 2015).

Após a determinação de quais sólidos seriam considerados para análise do projeto, o sequenciamento lógico e produtivo da mina foi definido. Para o sequenciamento lógico, apenas

são criadas dependências de lavra, para que haja uma sequência de extração que possa ser seguida de maneira segura e técnica. Para a sequência produtiva, é comum o uso de *softwares* de otimização, para definição de um cenário base, que será estudado adiante. No sequenciamento final, são consideradas restrições nas capacidades de produção, como beneficiamento, movimentação de material e taxas de desenvolvimento, buscando conciliar a realidade com o planejamento.

Com o *design* e sequenciamento final, pode-se resumir na Tabela 1 os principais impulsionadores de valor e custo na mina. As capacidades de produção de transporte, tratamento e refino serão utilizadas para avaliar possíveis mudanças na política de teor de corte para maximização do VPL.

**Tabela 1 - Dados da mina estudo de caso**

Dados da mina estudo de caso	
ROM (t)	12.647.820
Desenvolvimento total (m)	103.222
Desenvolvimento primário (m)	57.258
Desenvolvimento secundário (m)	45.963
Desenvolvimento vertical (m)	3.043
Estéril (t)	5.768.572
Teor Zn (%)	3,32
Teor Pb (%)	0,41
ZnEq (%)	3,15
NSR (US\$/t)	81,22
Capacidades de produção	
Capacidade de transporte (t/ano)	2.160.000
Capacidade de tratamento (t/ano)	1.080.000
Capacidade de refino (t/ano)	∞

Fonte: autor

Os parâmetros econômicos foram estimados de diferentes maneiras. Para os custos de lavra, beneficiamento, desenvolvimento e gerais/administrativos, foi usado como base custos de operações ativas com contexto similar. Para os custos fixos anuais, realizou-se uma análise de custos mensais dos três últimos anos de uma operação, e uma relação entre produção de minério e custos foi estabelecida. A regressão linear dos dados compilados permitiu estabelecer, em média, o gasto fixo anual da operação. Os custos de investimento inicial (CAPEX), foram estimados a partir da metodologia apresentada por Camm e Stebbins (2020). A taxa de desconto foi definida a partir de prática usual na indústria mineira. O preço dos metais foi estimado como a média das previsões para os próximos 10 anos.

**Tabela 2 - Parâmetros econômicos da mina estudo de caso**

Parâmetros econômicos da mina estudo de caso	
Custo de mina (US\$/t)	28,42
Custo de lavra (US\$/t)	20,18
Custo de beneficiamento (US\$/t)	13,14
Custo de desenvolvimento (US\$/t)	8,24
Custo de desenvolvimento (US\$/m)	1.341,49
Custo administrativo (US\$/t)	6,48
Custo fixo anual (MM US\$)	25,949
CAPEX (MM US\$)	49,069
Taxa de desconto (%)	10,00
Preço Zn (US\$/t)	2.722,20
Preço Pb (US\$/t)	1.997,21

Fonte: autor

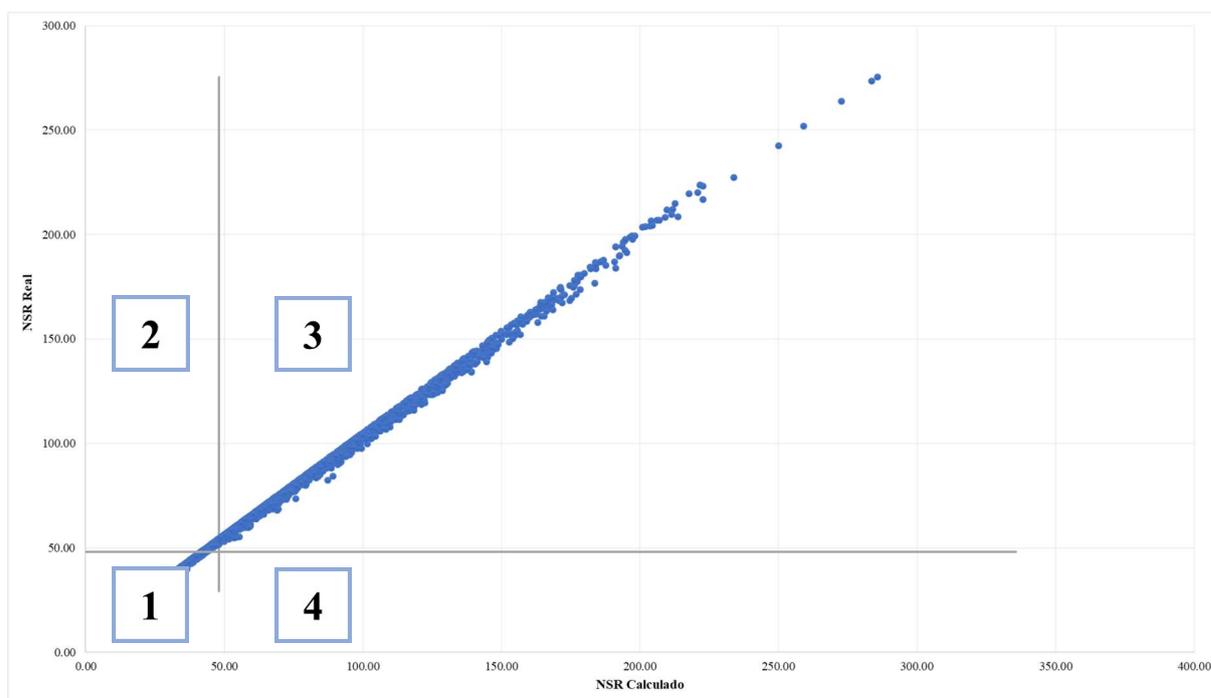
#### 4.3 INDICADOR DE TEOR

Para a proposta de Lane, a maximização do Valor Presente Líquido, uma das principais métricas para avaliação econômica de empreendimentos mineiros, é o ponto focal (Hall, 2014), a partir da derivação de diversas fórmulas que visam o ponto de máximo de valor, respeitando uma ou mais restrições de produção. No entanto, a política de teor de corte estática utilizada no cenário base, por meio de um teor de corte *break-even* baseado na métrica de *Net Smelter*

*Return*, comum em depósitos polimetálicos, não permite uma adaptação fácil para a política de Lane.

Com isso, foi proposto o uso de metal equivalente, no caso zinco equivalente, para fácil manuseio das fórmulas propostas por Lane. Para validação do uso de zinco equivalente como métrica representativa dos teores do depósito, foi gerado um gráfico de dispersão, em que no eixo-Y encontram-se os valores de NSR “reais”, ou seja, aqueles calculados diretamente, através do teor do metal, preço e curva de recuperação metalúrgica dos metais. No eixo-X encontram-se os valores de NSR “calculados”, a partir do teor de ZnEq em cada realce. O Gráfico 1 está representado abaixo.

**Gráfico 1 - Net Smelter Return real versus calculado**

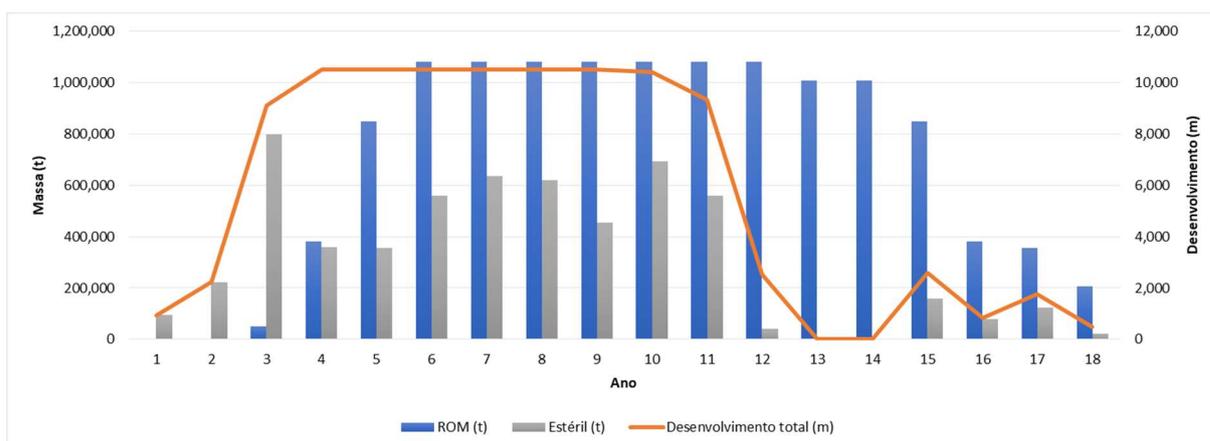


Em azul, têm-se os pares de pontos de NSR, e as linhas cinzas representam o teor de corte *break-even*, calculado em 48,03 US\$/t. Ao todo, foram compilados 3608 realces. Uma análise de correlação entre os dados de NSR reais e calculados foi feita, resultando em um coeficiente de correlação de 0.9992 foi obtido, garantindo a representatividade dos valores de ZnEq. Apenas 301 pontos se encontram nos quadrantes 2 e 4, locais em que há “troca” na classificação do material, resultando em um erro de apenas 8,34%. Logo, conclui-se que é possível o uso de zinco equivalente para as equações propostas por Lane, e haverá correlação com os valores de NSR reais dos realces.

#### 4.4 CENÁRIO BASE

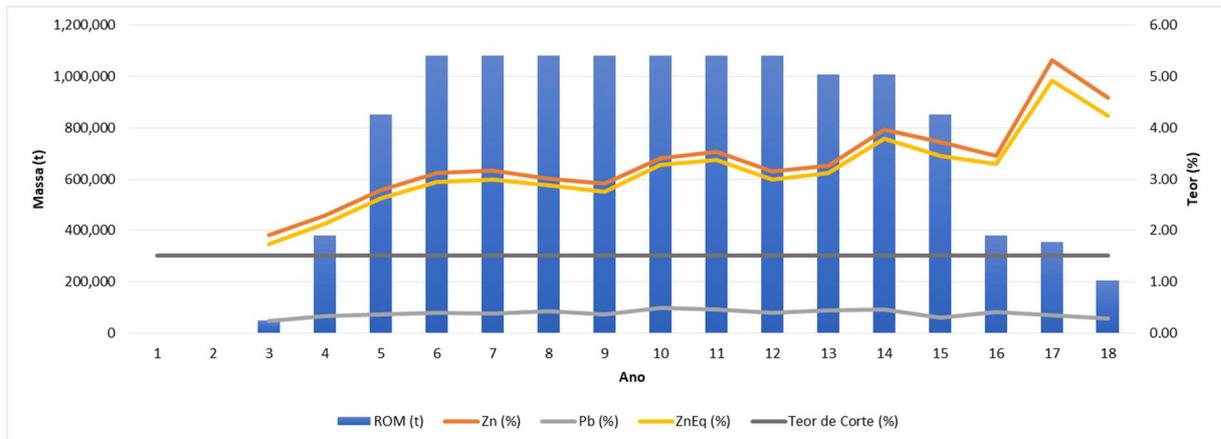
O cenário de sequenciamento base gerado possui uma política de teor de corte estático, ou seja, não há mudança na classificação de material entre minério e estéril entre os anos de produção. Dessa forma, não há também uma ordem de prioridade, com objetivo de antecipar receitas de zonas mais ricas, evitando um desconto maior no fluxo de caixa futuro. O perfil de produção para o cenário base é representado no Gráfico 2. Esse cenário será usado de base de comparação para as próximas iterações geradas. Para o cenário base, os dois primeiros anos são focados no desenvolvimento das rampas para acesso às zonas de lavra, com o *ramp-up* da produção de minério começando no terceiro ano do projeto, até o patamar de 1,08 milhões de toneladas por ano. Esse nível de produção se mantém por sete anos, quando o depósito se aproxima do final de suas reservas, e então observa-se um *ramp-down* nos níveis de produção, a partir do ano 13.

**Gráfico 2 - Perfil de produção do cenário base**



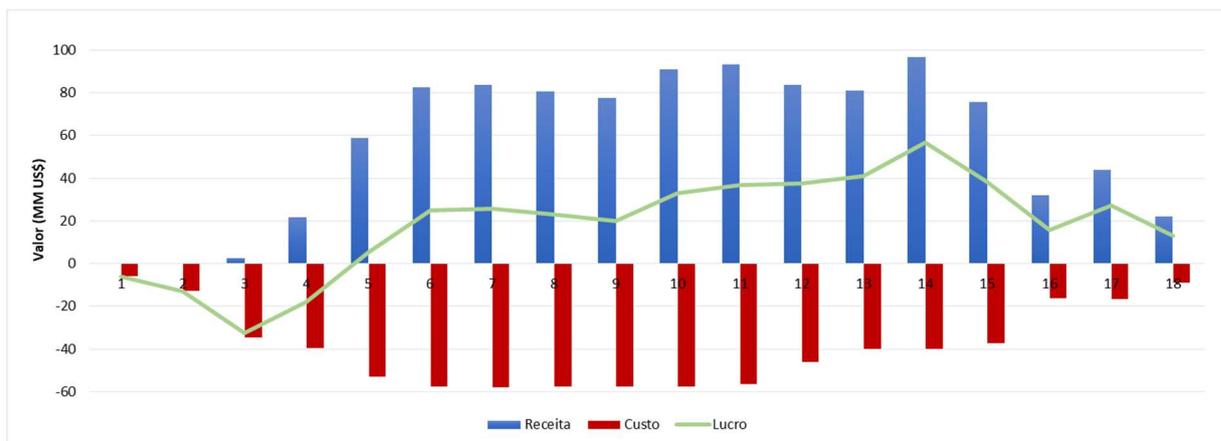
A política de teor de corte estática utilizada não busca priorizar áreas de teor mais alto, apenas garante que os blocos lavrados sejam suficientes para pagar os custos de produção associados. O teor médio produzido anualmente contra a produção de minério anual pode ser observado no Gráfico 3. O gráfico representa a evolução do teor médio lavrado com a progressão do plano de produção. A linha cinza-escuro representa o teor de corte estático em ZnEq, aproximadamente 1,51%. É perceptível que zonas mais ricas, que agregam mais valor ao empreendimento, se concentram nos anos finais da vida da mina, impactando diretamente na análise de Valor Presente Líquido, que desconta significativamente projeções futuras.

Gráfico 3 - Distribuição de teor no plano de produção do cenário base



O patamar atingido em torno do ano 6 de produção, ao final do período de *ramp-up*, é refletido na constância de custos operacionais representada no gráfico acima. A variação ascendente de receita a partir do ano 6 reflete também no aumento de teor médio de lavra de ZnEq com avanço do projeto, observada no Gráfico 3. Importante ressaltar o ano 14, em que a taxa de desenvolvimento próxima de 0 e a produção de minério ainda é alta. Somado a esses fatores, ainda se atinge a zona da reserva com maiores teores médios. Logo, têm-se o ano com maior lucro associado. No entanto, como é uma projeção distante no tempo, há uma grande penalização para cálculo de VPL. A projeção de receitas e custos para o empreendimento pode ser observada no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Receitas, custos e lucro do cenário base



## 5 RESULTADOS

Com o objetivo de maximizar o Valor Presente Líquido do projeto de mina subterrânea apresentado, uma metodologia para definir uma política de teor de corte dinâmica, segundo a teoria de restrições de capacidade elaborada por Lane, foi desenvolvida. Para os anos de *ramp-up* de produção (1 a 5), um teor de corte respeitando as restrições de mina foi utilizado. Para os anos seguintes, um processo iterativo para cálculo de teor de corte, com respeito a restrição de planta e com teor de corte de balanceamento de mina-planta, foi utilizado. Segundo a teoria desenvolvida por Lane, a mediana entre os três valores é o teor ótimo. As equações abaixo são utilizadas para calcular os teores de corte definidos.

$$gm = \frac{(m + h)}{(p - r)y} \quad (4)$$

$$gh = \frac{(m + h + (\frac{f+dV}{H}))}{(p - r)y} \quad (5)$$

$$gmh = \frac{\frac{H}{M} - mh(g)}{\frac{mh(g) - mh(g')}{g' - g}} + g \quad (6)$$

em que

$m$  - custo de lavra (US\$/t)

$h$  - custo de beneficiamento (US\$/t)

$p$  - preço do zinco (US\$/t)

$r$  - custo de refino do zinco (US\$/t)

$y$  - recuperação metalúrgica do zinco (%)

$f$  - custo fixo anual (US\$)

$d$  - taxa de desconto (%)

$V$  - valor presente líquido (US\$)

$H$  - capacidade de beneficiamento anual (t/ano)

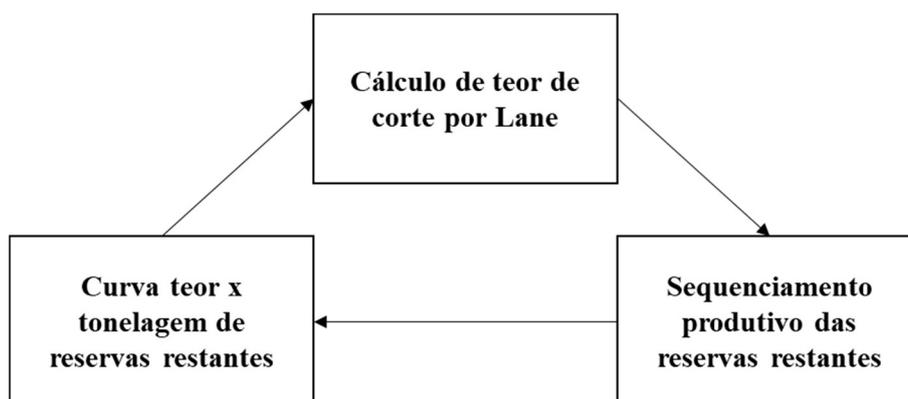
$M$  - capacidade de transporte anual (t/ano)

$mh(g)$  – relação de quantidade de minério e quantidade de estéril em função do teor  $g$

O sequenciamento da mina foi otimizado com base em objetivos definidos pelos teores de corte. Para os primeiros cinco anos, uma curva de teor x tonelagem foi criada, com base em todos os realces disponíveis para lavra. Definido o teor de corte limitado por capacidade de mina, o teor médio da reserva com base nesse teor de corte foi atribuído no projeto como objetivo de teor médio de produção para os anos de *ramp-up*. O solucionador utilizado rearranjou as tarefas de produção, de maneira a buscar o teor médio definido.

Para o cálculo de teor de corte dos anos seguintes, a restrição de capacidade passou a ser definida na planta de beneficiamento e no balanceamento entre mina e planta. A curva de teor x tonelagem utilizada também foi modificada, considerando apenas o material que não havia sido sequenciado. A Figura 6 apresenta o fluxograma das atividades realizadas para otimização de sequenciamento anual da mina estudo de caso.

**Figura 6 - Atividades para definição do sequenciamento anual**



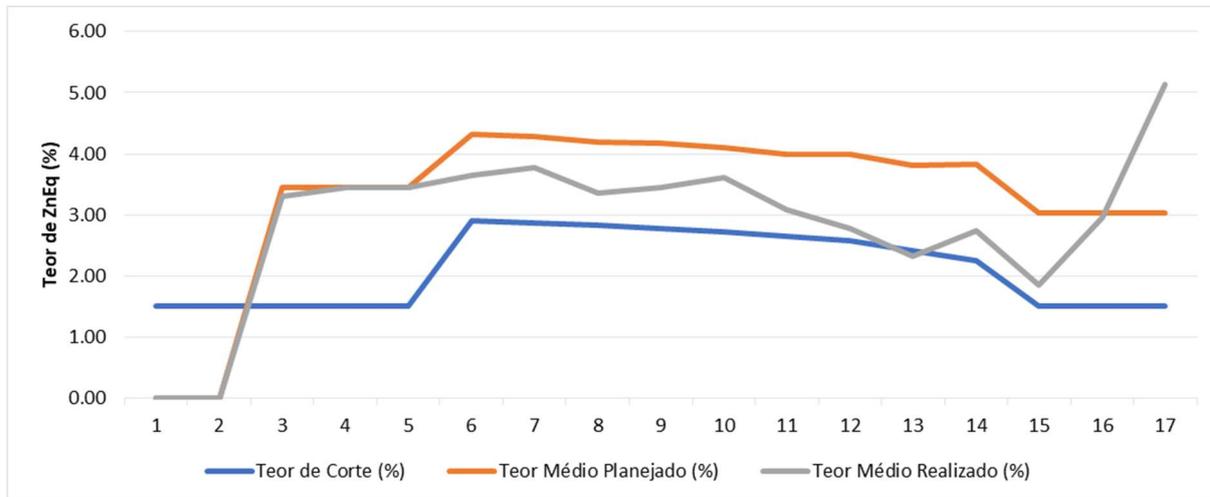
Fonte: autor

A avaliação da aplicabilidade da teoria de Lane para maximização de Valor Presente Líquido para projetos de mina subterrânea é feita com base em comparações de parâmetros econômicos discutidos anteriormente que cada cenário gerado resultará. De maneira geral, para aumentar o VPL de algum projeto, os fluxos de caixa devem possuir receita maior nos primeiros anos de produção, gerando uma expectativa de que teores de corte maiores sejam aplicados em anos iniciais, buscando uma antecipação de receita de regiões mais ricas do depósito. Com o progresso da mina, é esperado que o teor de corte utilizado diminua, tal como a receita.

## 5.1 CENÁRIO 1

Para o primeiro cenário gerado, as capacidades de produção e desenvolvimento foram mantidas do cenário base. A mudança realizada foi apenas na criação de um objetivo de teor médio para os anos de produção. Uma relação entre os teores de corte utilizados, o teor médio planejado e o realizado podem ser observados no Gráfico 5. Como esperado, o teor médio de produção derivado de uma curva de teor x tonelagem de toda reserva em realces dificilmente seria atingido, pois a curva parte do suposto que todo material em determinado ponto de teor de corte estará disponível para lavra, condições irrealistas para uma mina. Embora em alguns anos houve o cumprimento da meta estabelecida, o teor médio realizado esteve aquém do definido na política de teor de corte. Os valores de ZnEq médio realizados nos anos 16 e 17 se destacam por estarem em divergência com a tendência de queda observada nos anos anteriores de produção. A ocorrência desse desvio é devido a lavra da região destacada na Figura 7, que é extraída apenas no final do sequenciamento e apresenta teores superiores à média do depósito.

**Gráfico 5 - Objetivos de teor médio para sequenciamento do cenário 1**



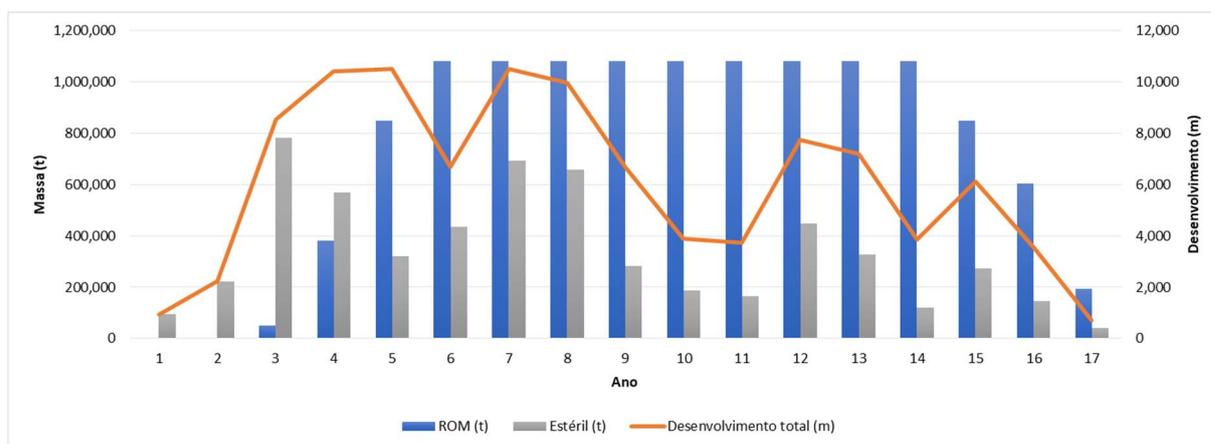
**Figura 7 - Vista da mina com destaque para região de alto teor**



Fonte: autor

A partir dos objetivos de teor definidos pelas curvas de teor x tonelagem do projeto, o perfil de produção final para o cenário 1 é representado pelo Gráfico 6. Em contraste ao perfil de produção do cenário base, há uma distribuição mais espaçada na realização dos desenvolvimentos da mina. Há dois benefícios para esse acontecimento: a capacidade máxima de desenvolvimento não é exigida em todos os anos, tornando o plano menos arriscado. Além disso, os custos de desenvolvimento não se concentram nos primeiros anos do projeto, adiando os custos e seu impacto no fluxo de caixa. A diferença entre os anos 14 e 15, em relação ao avanço de escavações, é resultado do enfoque para a posterior lavra na região destacada na Figura 7, que necessita de infraestruturas de ventilação e bombeamento para permitir a extração do minério. O sequenciamento definido também esclarece a queda na produção de minério e no teor médio de ZnEq realizado observada no ano 15. A existência de um objetivo claro na qualidade do material que deve ser lavrado, também gera um direcionamento em quais desenvolvimentos devem ser priorizados para cumprimento de tal objetivo. De maneira geral, a presença de um objetivo de sequenciamento pode resultar em planos mais coerentes.

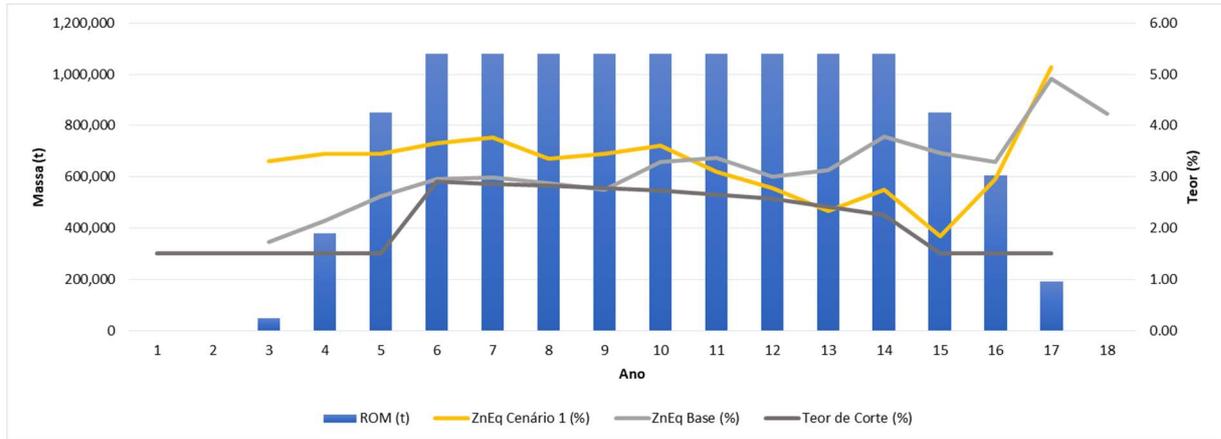
**Gráfico 6 - Perfil de produção do cenário 1**



A política de teor de corte dinâmica definida buscou priorizar zonas de teor mais alto para antecipação de suas receitas mais elevadas. A distribuição de teor com evolução do plano de produção é representada pelo Gráfico 7. Pode-se observar que com sucesso houve antecipação de lavra em regiões mais ricas do depósito, com o teor médio máximo sendo alcançado no sétimo ano de produção, e como esperado, com a diminuição de teor de corte para os anos seguintes, houve também uma queda no teor médio realizado. No cenário otimizado, apenas o ano 13 obteve um teor médio de ZnEq realizado abaixo do teor de corte calculado, e

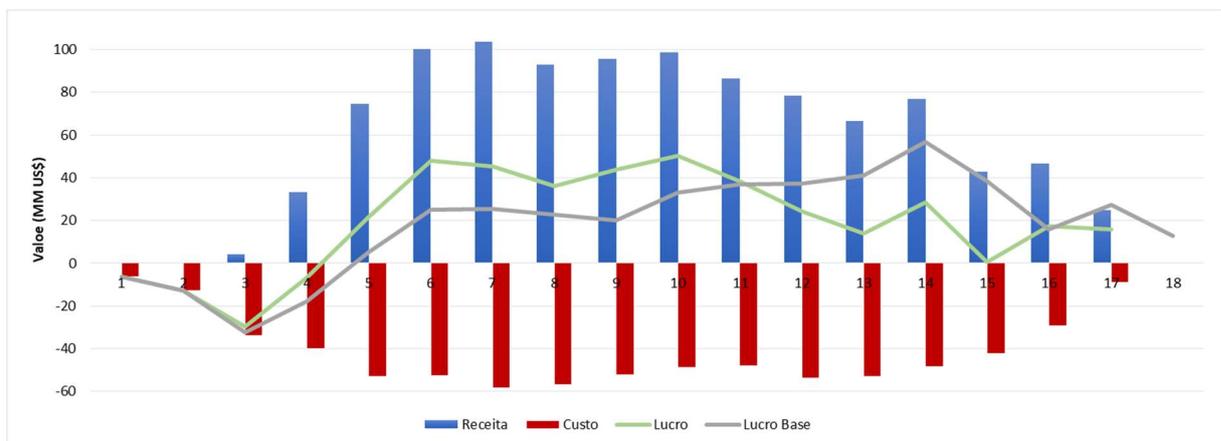
isso ocorre devido à grande participação de minério proveniente de galerias de lavra, com teores abaixo de 2,00 % de ZnEq, na produção anual.

**Gráfico 7 - Distribuição de teor no plano de produção do cenário 1**



O impacto de tal política para o fluxo de caixa do empreendimento é observado no Gráfico 8. A política de teor de corte obteve sucesso para incrementar valor para os anos iniciais do projeto. A priorização também de teores mais altos no início do empreendimento também acarreta em um período de retorno de investimento mais curto, tornando mais atrativo a decisão de iniciar o projeto.

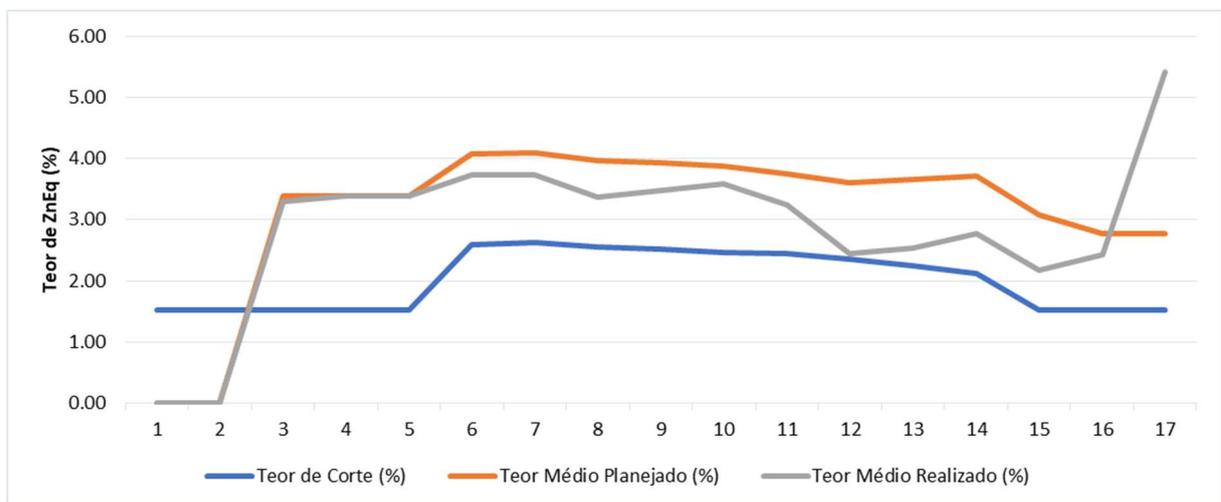
**Gráfico 8 - Receitas, custos e lucro do cenário 1**



## 5.2 CENÁRIO 2

O cenário 2 foi gerado com o intuito de avaliar o impacto da inclusão dos desenvolvimentos produtivos na criação de curvas de teor x tonelagem para cálculo de objetivo de teores médios de produção. O plano de longo prazo do projeto em questão, possui uma reserva total de 12,6 milhões de toneladas, e cerca de 2,6 milhões de toneladas, 20% do total, é proveniente de desenvolvimentos. A relação entre a política de teor de corte definida, teor médio planejado e teor médio realizado é observada no Gráfico 9. Assim como no cenário 1, dificilmente os valores de teores médios planejados seriam cumpridos. No entanto, com a inclusão do material de desenvolvimento produtivos nas curvas de teor x tonelagem da reserva para definição de objetivo, reduziu-se o teor esperado na produção. Isso ocorre, pois, o teor médio desse material acrescentado é de apenas 2,25% ZnEq. Diferente do observado no cenário 1, em nenhum ano houve produção de teores abaixo do teor de corte definido, consequência da inclusão de material baixo teor para análise.

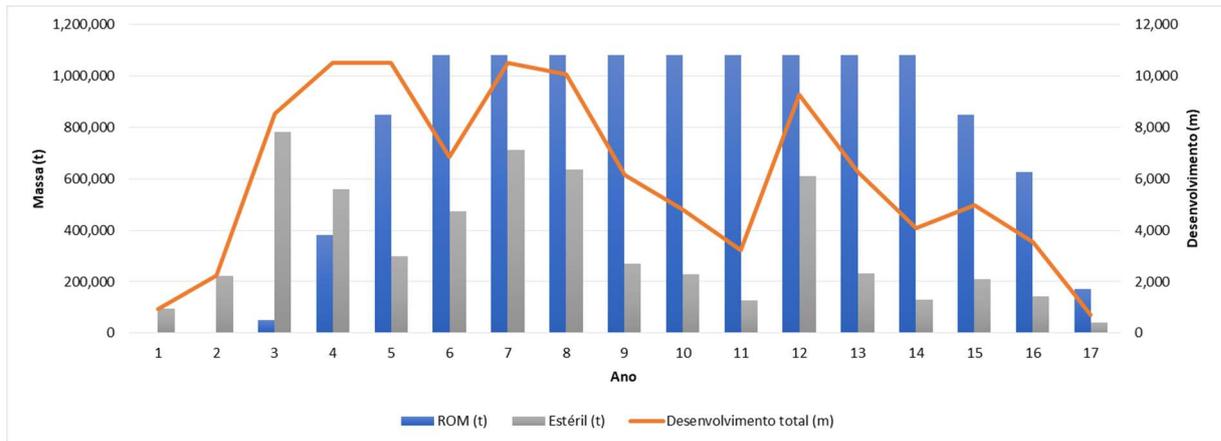
**Gráfico 9 - Objetivos de teor médio para sequenciamento do cenário 2**



A distribuição de metragem de desenvolvimento realizada, assim como no cenário 1, possui grandes variações, acarretando em um plano com menor dependência em altas taxas de desenvolvimento. As variações mais acentuadas podem ser explicadas pela necessidade da inclusão de material de baixo teor para alcançar um objetivo um pouco menor de teor médio. O perfil de produção para o cenário 2 se assemelha ao cenário 1, como observável no Gráfico 10. Novamente, o sequenciamento final considera a lavra da região destacada na Figura 7 apenas

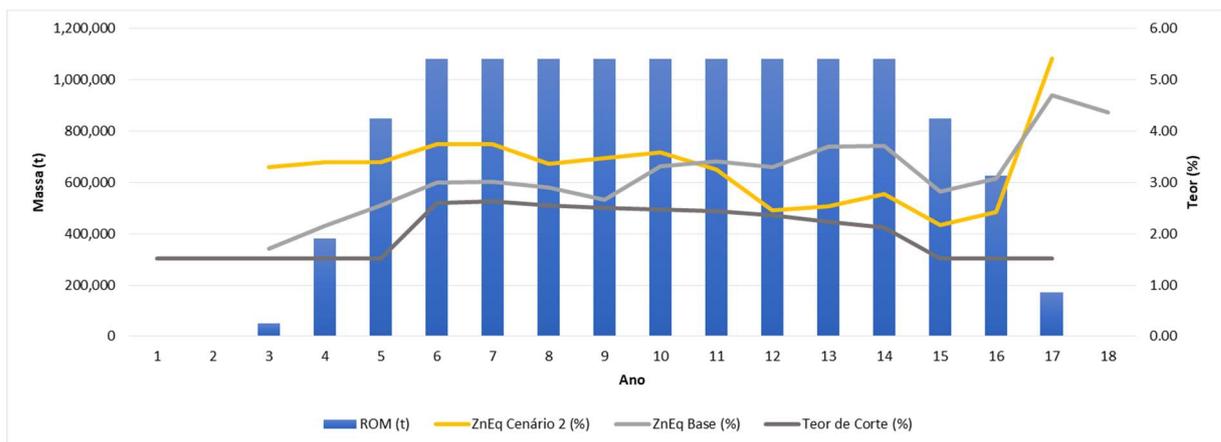
nos últimos anos de produção, tendo como consequência valores de teor médio de ZnEq mais elevados.

**Gráfico 10 - Perfil de produção do cenário 2**



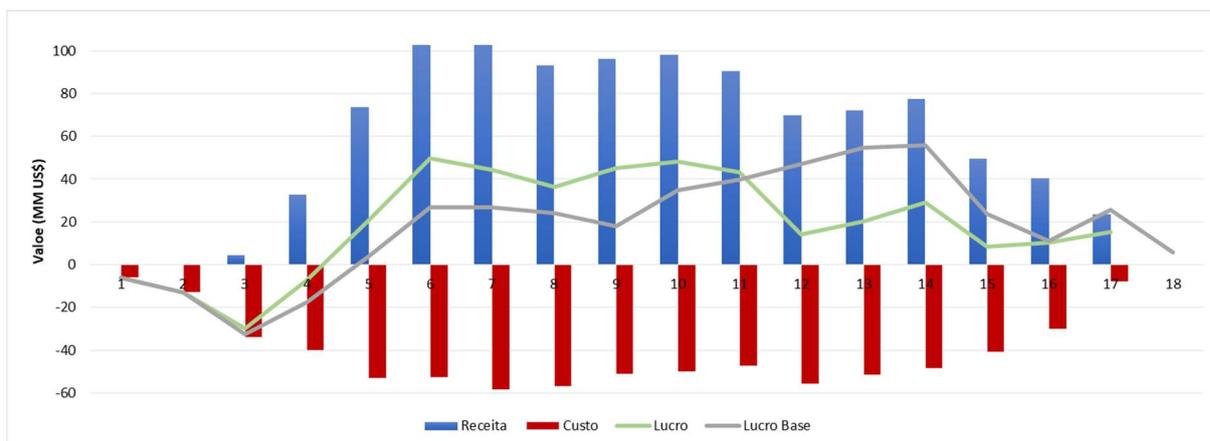
Para o segundo cenário, é observada uma antecipação de algumas regiões mais ricas do depósito mineral, que ocasionam um aumento de teores médios de produção nos anos iniciais. A partir do ano 11, os teores do cenário 2 são inferiores ao cenário, no entanto, para fins de análise de VPL, há uma maior desvalorização de fluxos de caixa distantes ao tempo 0.

**Gráfico 11 - Distribuição de teor no plano de produção do cenário 2**



O segundo cenário também resultou em um aumento de receitas nos iniciais do projeto, sendo o valor máximo obtido no sétimo ano de produção. Apesar de ocorrer esse ganho, a variação positiva observada do cenário 1 contra o cenário base não é tão acentuada para o cenário 2, resultado da inclusão de material com teor baixo para definição de objetivos de produção. O Gráfico 12 representa os impactos de lucro e receita do plano.

Gráfico 12 - Receitas, custos e lucro do cenário 2

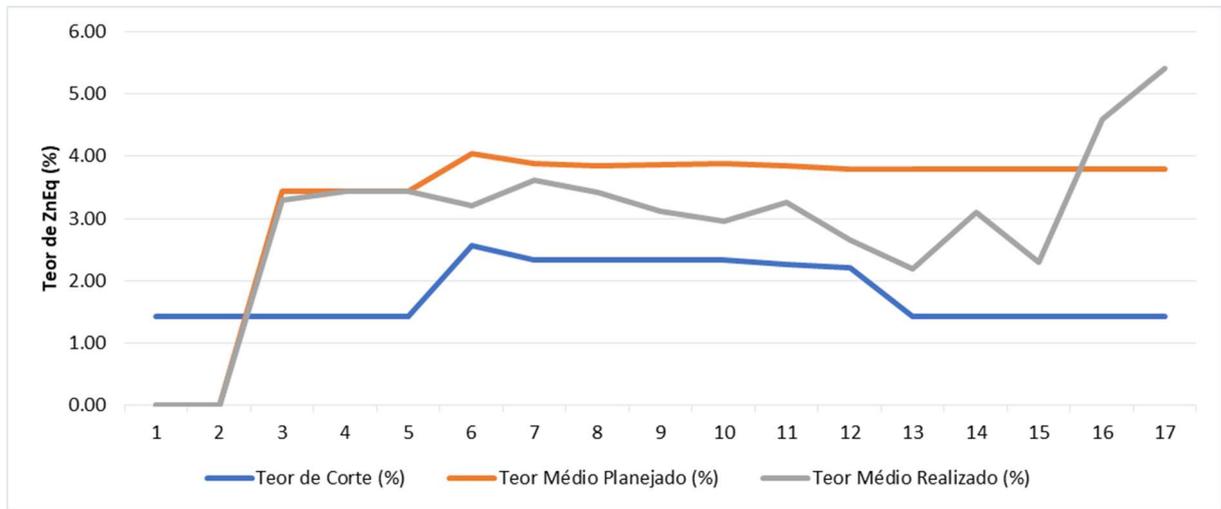


### 5.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 foi gerado com mudanças mais significativas do que as anteriores. Assim como o cenário 1, apenas a massa de realces foi utilizada para criação de curvas de teor x tonelagem. No entanto, para o terceiro cenário foi avaliado economicamente um investimento para expansão da planta de beneficiamento, para uma produção de 1,3 milhões de toneladas anualmente. A capacidade de produção e desenvolvimento da mina foi mantida. Outros fatores, como recuperação metalúrgica de metais e tempo para adequação do projeto não foram modificados. Os custos de investimento foram estimados em cerca de US\$ 15 milhões, e os custos de tratamento por tonelada de minério foram reduzidos. A redução dos custos de tratamento se deve à maior diluição dos custos fixos relacionados à planta, e menor aumento nos custos variáveis. Os novos custos foram utilizados para calcular os teores de corte de Lane.

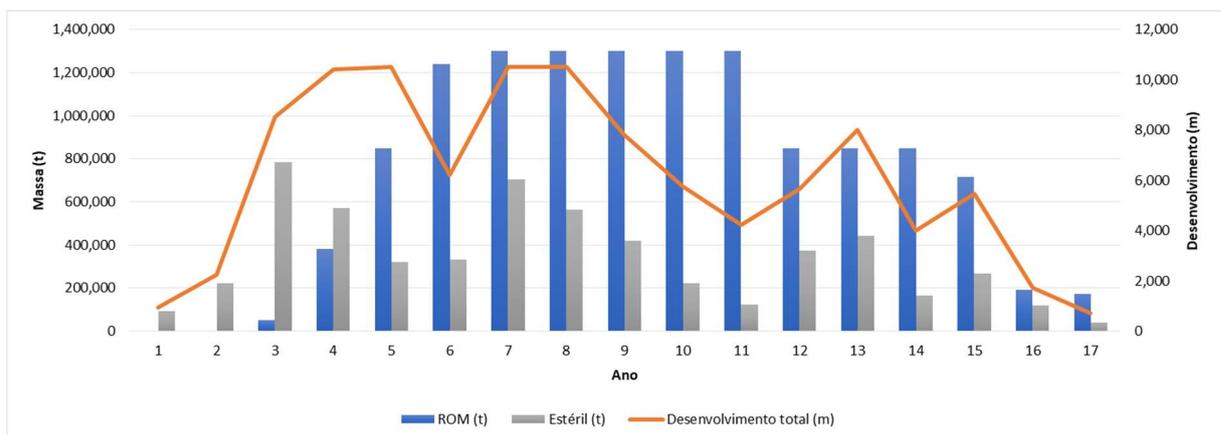
O teor de corte usado para definição de objetivo variou entre o teor de corte com restrição na planta de beneficiamento e teor de balanceamento entre mina e planta. Como esperado, com mais capacidade de beneficiamento, o teor médio de alimentação sofre uma redução para garantir que a planta opere em capacidade máxima. No entanto, a operação em 1,3 milhões de toneladas anuais não é constante por muito tempo.

**Gráfico 13 - Objetivos de teor médio para sequenciamento do cenário 3**



Observando o Gráfico 14, a planta de beneficiamento somente opera em capacidade máxima durante 6 anos de produção. Após o ano 11, a capacidade de lavra da mina não se mostra capaz de manter a planta cheia, sofrendo uma redução de ROM para 850 mil toneladas por ano. O método de lavra utilizado impacta diretamente na oportunidade de expansão de produção, sendo que a sequência ascendente de lavra impede a exploração de níveis superiores até que os realces abaixo estejam preenchidos de estéril.

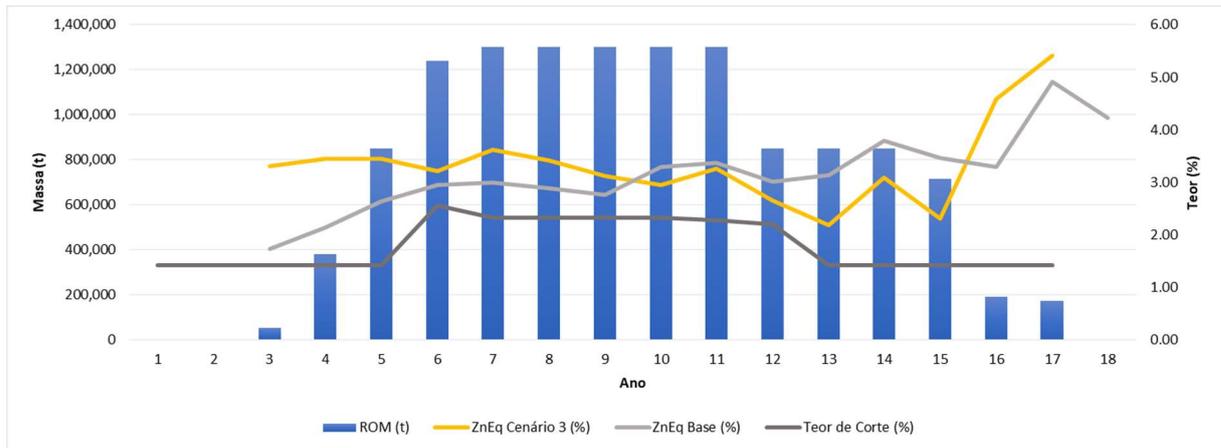
**Gráfico 14 - Perfil de produção do cenário 3**



A variação de teor médio entre o cenário base e o cenário 3, observada no Gráfico 15, é menor do que avaliado nos cenários anteriores, e a partir do décimo ano de produção, o cenário base produz teores mais elevados, diferentemente dos cenários 1 e 2. Isso ocorre devido a mistura de material de valor mais alto com material de valor menor, para garantir a meta de 1,3

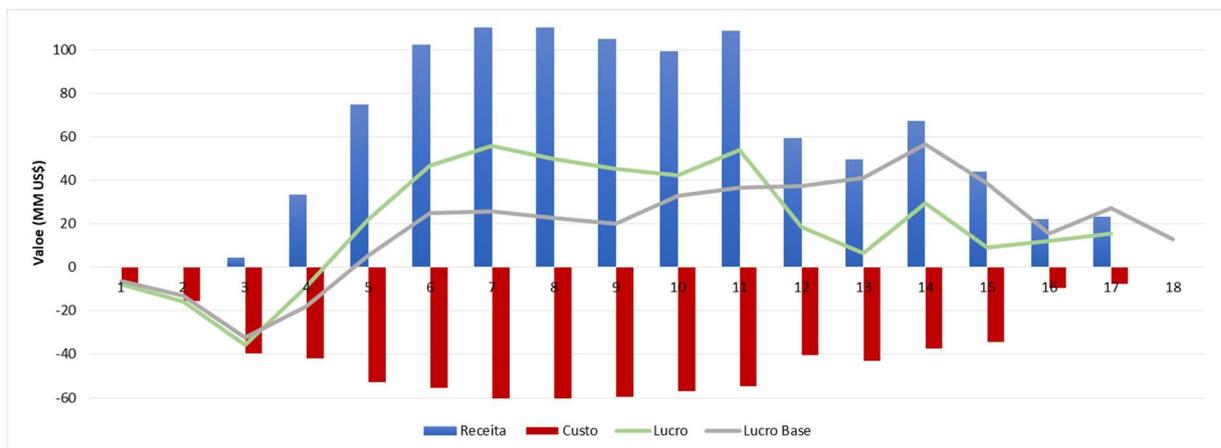
milhões de toneladas anuais. O ganho de receitas esperado estará alocado no maior volume de material beneficiado, e não em um aumento na qualidade do material.

**Gráfico 15 - Distribuição de teor no plano de produção do cenário 3**



Analisando o Gráfico 16, o investimento inicial maior impacta o fluxo de caixa nos anos iniciais, com valores negativos um pouco superiores em relação aos outros cenários. O ganho da expansão da planta de beneficiamento é notado a partir do sexto ano de produção, quando a variação entre o lucro do cenário base e cenário 3 se distanciam além do que observado anteriormente.

**Gráfico 16 - Receitas, custos e lucro do cenário 3**



Para a análise de Valor Presente Líquido, há grandes ganhos, pois, a antecipação de receita obtida irá impactar diretamente o valor final. No entanto, a capacidade ociosa na planta após o ano 12 deve ser avaliada, pois se torna um passivo para a empresa. No sentido de

planejamento estratégico empresarial, ações com as áreas de exploração mineral devem ocorrer para que incrementos de reservas possam ser feitos e alinhados com os planos de produção definidos.

#### 5.4 CENÁRIO 4

O cenário 4 foi gerado com a proposta de implementação de duas unidades *ore sorter* como uma etapa de pré-concentração do minério lavrado da mina. A tecnologia de *Ore-Sorting* é utilizada em minérios composto por minerais com propriedades diferenciadoras, sendo capaz de separar esses minerais em minério e estéril (VALENTE et al, 2019). A tabela de parâmetros abaixo representa as considerações técnicas e econômicas do projeto de implantação da tecnologia de *ore sorting*.

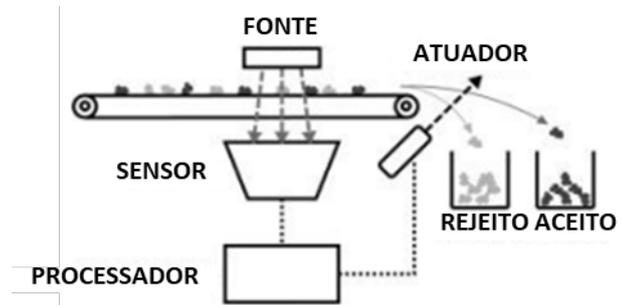
**Tabela 3 - Parâmetros técnicos e econômicos de equipamentos de *Ore Sorting***

Parâmetros de implantação de <i>ore sorter</i>	
Capacidade de produção (t/ano)	480.000
Fator de enriquecimento	1,25
Ejeção de massa (%)	25,00
Custo de operação (US\$/t)	0,17
Custo de transporte conc. (US\$/t)	0,09
Custo de transporte rejeito (US\$/t)	0,18
CAPEX <i>Ore Sorter</i> (MM US\$)	2,782
CAPEX exp. britagem (MM US\$)	5,565

Fonte: autor

Para o cenário 4, foram considerados a aquisição de dois equipamentos de *ore sorting*. O fator de enriquecimento é o aumento de teor que uma unidade *sorter* garante para o minério que é pré-concentrado. A ejeção de massa representa a porcentagem de material que será descartada como rejeito do *ore sorter*. A Figura 8 ilustra o princípio de funcionamento do equipamento.

**Figura 8 - Simplificação de *Ore Sorter*, apresentando fonte, sensor, processador, atuador e as pilhas de material aceito/rejeitado**

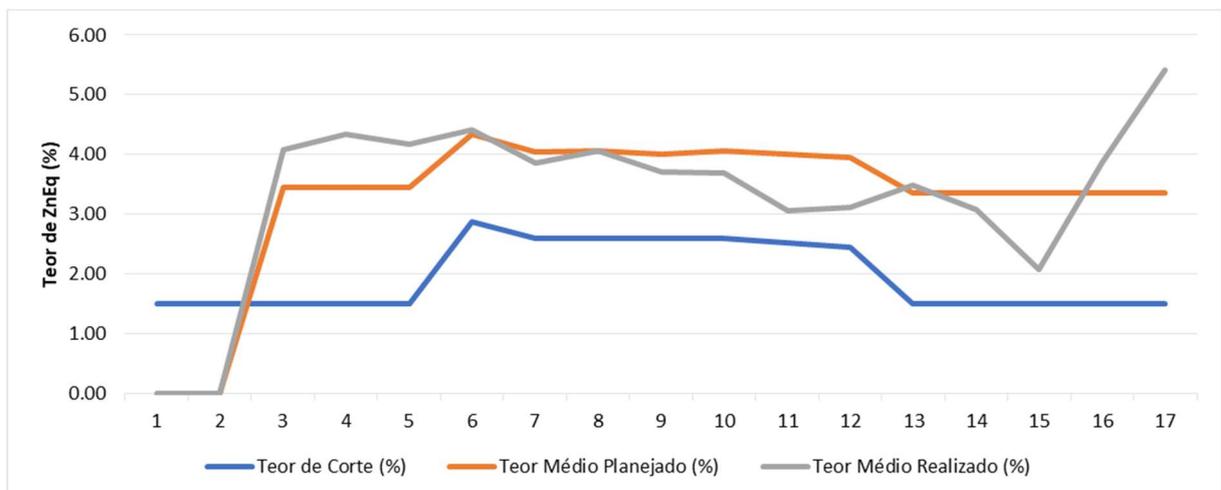


Fonte: Adaptada de Gülcan e Gülsoy, 2017

O objetivo do cenário 4 é manter a capacidade de beneficiamento da planta em 1,08 milhões de toneladas por ano, porém, com a implantação de *ore sorters*, aumentar a produção de ROM anual para 1,3 milhões de tonelada. Dessa maneira, o teor de alimentação da planta será incrementado sem necessidade de expansão em todas etapas de processamento. Apenas a primeira etapa de britagem sofrerá expansão, para 1,3 milhões de toneladas anuais, para que a especificação granulométrica de funcionamento do *ore sorter* seja atendida.

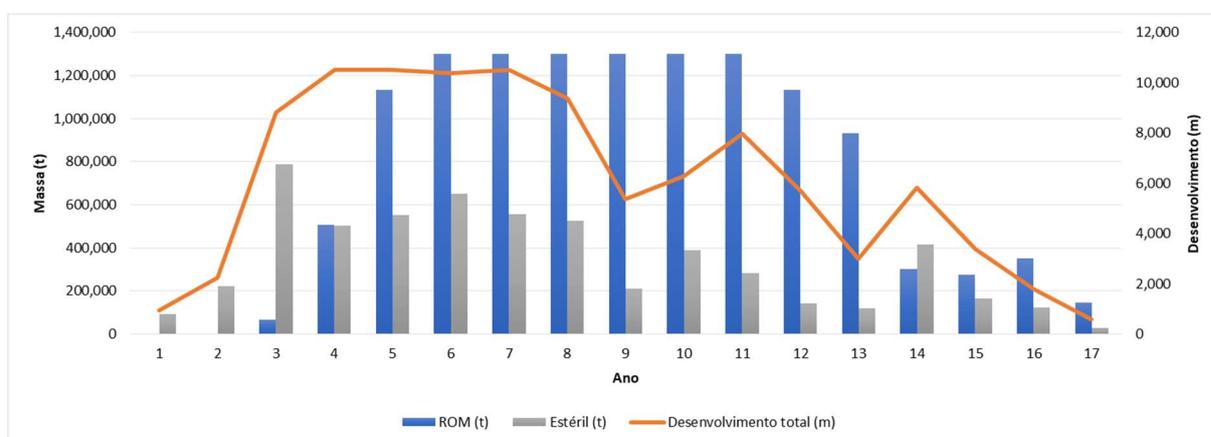
Para o cenário 4 é importante fazer a distinção entre o teor do minério antes e após a etapa de pré-concentração no *ore sorter*. Os gráficos com informação de teor mostrados abaixo serão com teor de alimentação na planta, logo, são os teores após a concentração via *ore sorting*. O Gráfico 17 representa o teor médio planejado, o teor de corte dinâmico e o teor médio realizado. O enriquecimento de teor resultado das operações de *ore sorting* foram capazes de superar os valores de teor médio planejado de produção para os primeiros 6 anos de produção.

**Gráfico 17 - Objetivos de teor médio para sequenciamento do cenário 4**



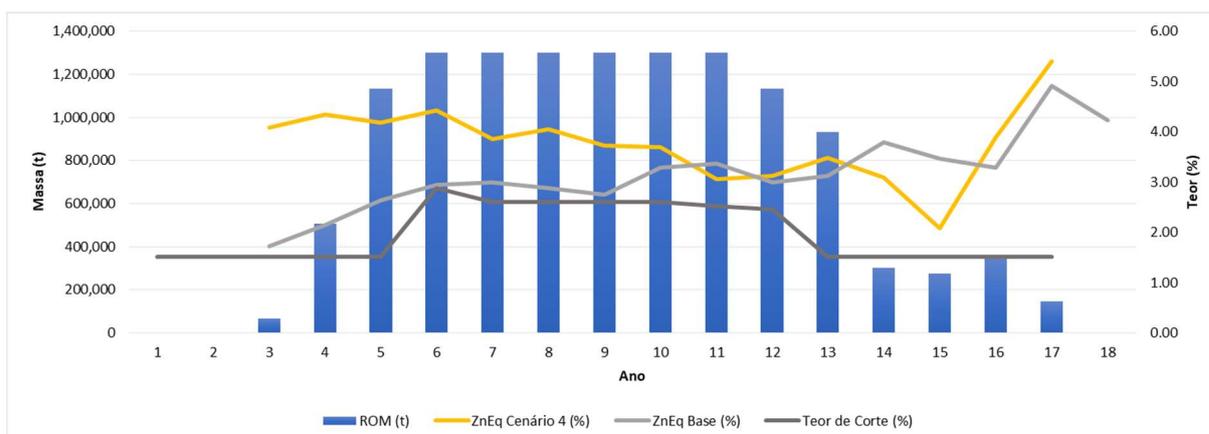
Visando minimizar a capacidade ociosa dos equipamentos *ore sorter* e maximizar o uso da planta, ainda restrito a 1,08 milhões de toneladas por ano, houve mudanças no plano de produção da mina. O objetivo máximo de produção anual foi de 1,3 milhões de toneladas, níveis de produção alcançados no sexto ano de projeto e mantidos até o ano 11. O *ramp-up* também ocorreu de maneira acelerada como observado no Gráfico 18. O plano de produção do cenário 4 possui características similares ao cenário base, visto que as taxas de desenvolvimento se mantêm estáveis nos anos iniciais do projeto, buscando garantir o aumento de produção da mina requisitado para implantação de *ore sorters*. Se torna um plano arriscado devido à grande dependência na operação de conseguir manter elevadas taxas de desenvolvimento, próximas à capacidade máxima. Além disso, como o plano foi gerado para manter a planta e os equipamentos de *ore sorting* com o máximo de utilização, a partir do ano 14 a produção anual de minério está bem abaixo de patamares anteriores, encurtando o tempo de vida da mina.

**Gráfico 18 - Perfil de produção do cenário 4**



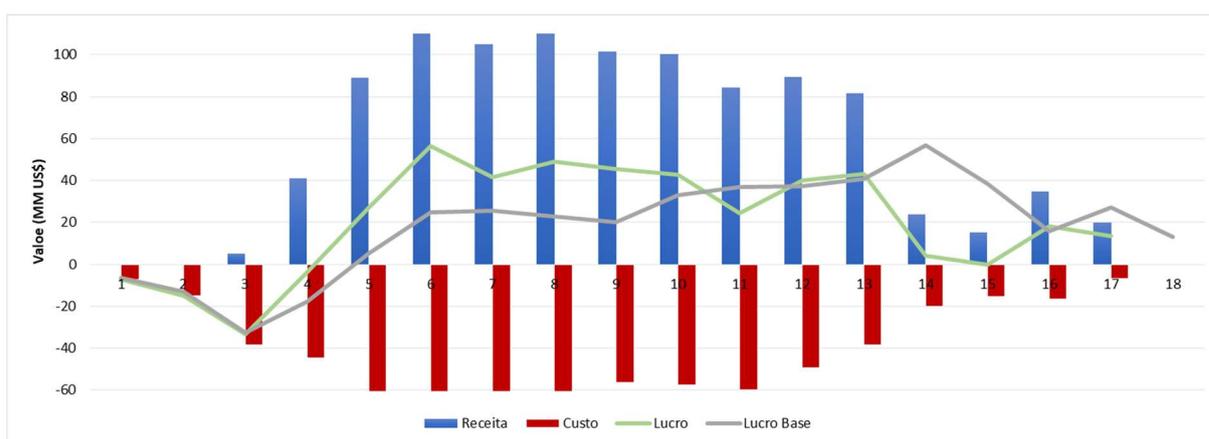
O Gráfico 19 representa de outra maneira o grande ganho de teor na alimentação da planta resultado das operações de *ore sorting*. O minério que passa por etapas de processamento posteriores ao *ore sorter* possui teores em condições mais elevadas quando comparado ao cenário base. O impacto na produção de metal, e por consequência, geração de mais receita representa um dos grandes benefícios de operações com *ore sorting*. O impacto da lavra da região destacada na Figura 7 tem como consequência o salto no teor de alimentação da planta observado nos anos 16 e 17.

Gráfico 19 - Distribuição de teor no plano de produção do cenário 4



Pelo Gráfico 20, é observável a antecipação de receita obtida com o uso de equipamentos de *ore sorting*, apesar de seu custo de implementação e custos de movimentação e operação. O maior valor de lucro foi obtido no ano 6 do projeto, quando pela primeira vez mina e planta atuam em suas capacidades máximas. Para análise de VPL, o alto valor positivo em um período mais próximo do presente, impacta de maneira positiva o valor final do projeto. A grande redução nos níveis de produção observada nos gráficos anteriores a partir do ano 14, explica a diferença nas receitas do projeto ao final da vida da mina quando se compara cenário base e cenário 4.

Gráfico 20 - Receitas, custos e lucro do cenário 4



## 5.5 COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS

Os cinco cenários gerados objetivaram a aplicação da teoria de teores de corte desenvolvida por Lane, com adaptações pontuais para a condição subterrânea do estudo de caso

e também para implantação de tecnologias não abordadas em seu trabalho. Para Lane, o objetivo de políticas de teores de corte dinâmica com respeito às restrições de produção é maximizar o Valor Presente Líquido de projetos de mineração, tornando mais atrativo o investimento para empresas e investidores.

O Valor Presente Líquido, também como a taxa interna de retorno e o período de retorno, estão entre as principais métricas econômicas para avaliação de projetos de mineração atualmente. Segundo a prática seguida em empresas no contexto de mineração, projetos com VPL positivo e com TIR acima da taxa de desconto utilizada, possuem viabilidade econômica para serem iniciados e desenvolvidos. Todos os cenários gerados atendem aos requisitos mínimos para terem seu estudo de viabilidade avançado e chegue a se tornar uma mina eventualmente.

O ganho resultante da aplicação da metodologia de teores de corte de Lane é claro. Os cenários 1, 2, 3 e 4, que foram planejados para seguirem uma política de teor de corte dinâmica, apresentaram ganhos entre 41 e 51 % no Valor Presente Líquido do projeto, além de aumento na Taxa Interna de Retorno, sem a necessidade de novos investimentos para os casos 1 e 2, especificamente. Apenas a otimização do sequenciamento produtivo segundo Lane foi suficiente para gerar retorno.

A Tabela 4 apresenta, resumidamente, as variações entre os cenários desses indicadores econômicos discutidos.

**Tabela 4 - Comparação de indicadores econômicos**

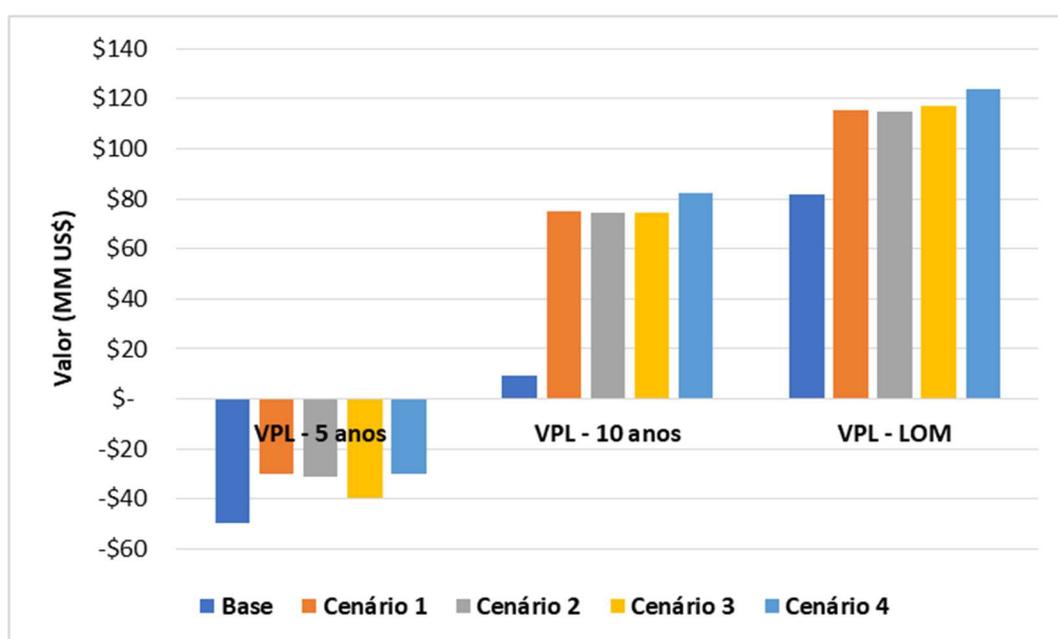
<b>Cenário</b>	<b>CAPEX</b>	<b>VPL</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback</b>
Base	49.069.660 US\$	81.500.515 US\$	25 %	9 anos
01	49.069.660 US\$	115.095.728 US\$	39 %	6 anos
02	49.069.660 US\$	115.027.227 US\$	39 %	6 anos
03	63.911.960 US\$	116.845.449 US\$	36 %	7 anos
04	60.201.385 US\$	123.654.578 US\$	39 %	6 anos

Fonte: autor

Como observado no Gráfico 21, a antecipação de receitas obtida pela priorização de áreas mais ricas no sequenciamento resultou em VPL de projeto melhor em diferentes períodos de avaliação. Para os cenários 1 e 2, casos em que não há realização de novos investimentos, o

VPL do projeto se demonstrou superior nos diferentes intervalos de tempo definidos, levando a conclusão de que apenas a otimização do sequenciamento por meio de uma política de teor de corte dinâmica é capaz de gerar resultados positivos. A inclusão ou não de minério lavrado em desenvolvimentos produtivos pouco afetou os indicadores econômicos finais, resultando em diferenças pequenas entre os cenários. Para os cenários 3 e 4, a influência de investimentos para ampliar as capacidades de produção na planta, via expansão geral ou apenas com etapas de pré-concentração, foi observada nos indicadores econômicos quando se analisa intervalos menores de tempo. O cenário 3 apresenta uma performance inferior aos outros cenários (1, 2 e 4) nos anos iniciais, e o ganho de longo prazo esperado pela ampliação da planta não se mostra tão vantajoso quanto a implantação de *ore sorters*. Em todos os períodos analisados no Gráfico 21, o cenário 4 se destaca por apresentar maior VPL.

Gráfico 21 - Comparativo de VPL em períodos diferentes



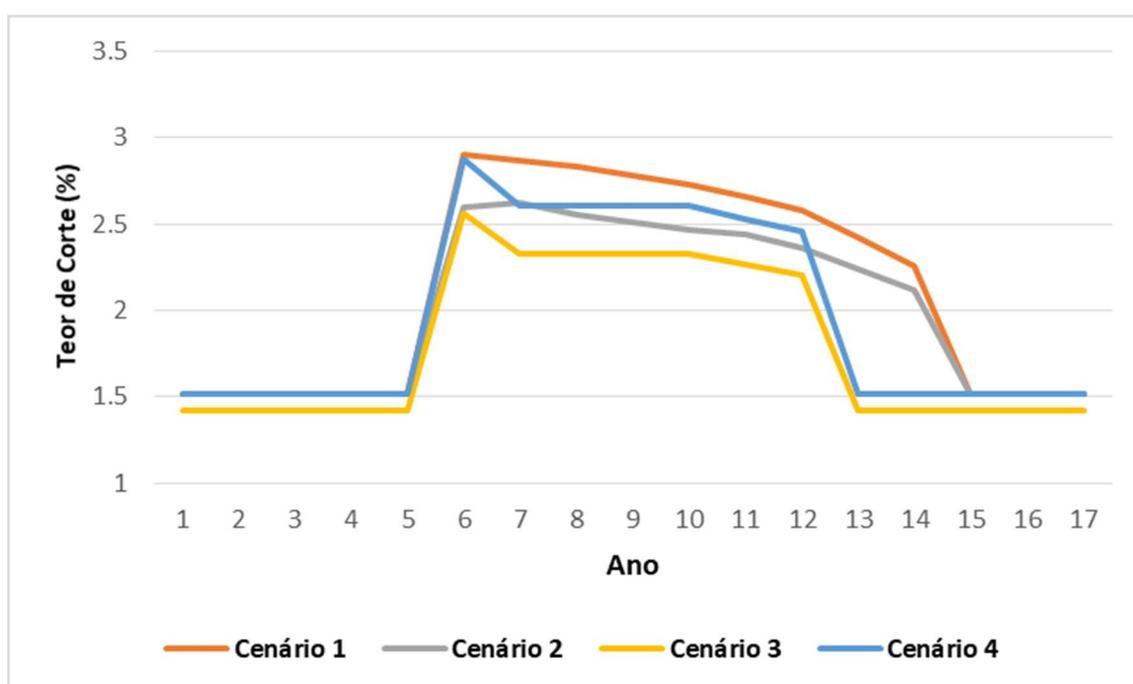
As diferentes de custeio, restrições de capacidade de produção e considerações de material, resultaram em diferentes políticas de teores de corte, como é representado no Gráfico 22. Para o cenário 1, considerando apenas as massas de realces otimizados via *software*, os teores médios mais elevados levariam ao aumento do teor de corte. Com a inclusão de minério proveniente de desenvolvimentos produtivos para definição de uma política de teor de corte no cenário 2, observa-se que há uma redução no teor de corte anual do projeto. Ao passo que no cenário 3, a ampliação da usina de beneficiamento, com redução de custo por tonelada tratada,

exigirá a alimentação de materiais de baixo teor para manter a capacidade em seu máximo. Para o cenário 4, o aumento da exigência de produção na mina, para 1,3 milhões de toneladas anuais, tem como consequência uma leve redução no teor de corte planejado, diminuindo a seletividade da lavra.

Também é notável o comportamento diferente entre os cenários a partir do ano 13. Para os cenários 3 e 4, em que houve uma produção em níveis mais altos nos anos antecedentes, a partir desse período analisado, há dificuldade em manter a planta operando em sua capacidade máxima. Logo, todo material com teor de corte de mina, mais baixo, é enviado para a planta de beneficiamento. Para os cenários 1 e 2, a deficiência de produção da mina só se torna real no ano 15, quando também o teor de corte é baixado para apenas a restrição de mina.

Dentre os cenários avaliados, o cenário 4, com implementação de unidades de *ore sorting*, é aquele que apresenta maior atratividade. O valor obtido do investimento extra se paga no mesmo período do que o CAPEX para os cenários 1 e 2, além de antecipar a produção de material, evitando a incerteza inerente a planejamento em prazos superiores a 10 anos. O principal risco para a escolha desse cenário está na taxa de desenvolvimento agressiva, que é próxima da capacidade máxima nos primeiros anos de produção, podendo tornar vulnerável a viabilidade econômica do projeto. Há oportunidade de manter elevada a produção de minério para anos futuros, estendendo a vida útil da mina, através de campanhas de exploração que devem ser coordenadas.

**Gráfico 22 - Comparativo entre as políticas de teor de corte**



## 6 CONCLUSÃO

O planejamento estratégico de teores de corte é uma tarefa que, conduzida de maneira correta, pode agregar valor para o plano de produção de empreendimentos mineiros, incluído aqueles em contextos subterrâneos. A otimização do sequenciamento produtivo via teoria de Lane gerou cenários com indicadores econômicos melhores do que aqueles obtidos via sequenciamento sem priorização de lavra.

Os cenários gerados permitiram concluir que a etapa de definição de teores de corte e sequenciamento de mina, quando realizados de maneira conjunta, podem incrementar valor ao projeto, sem a necessidade do aumento nos investimentos iniciais para viabilidade de operação. Além disso, quando possível a adição de novos equipamentos ou melhorias para aqueles já existentes, esses estudos de avaliação econômica devem ser conduzidos de maneira integrada, para que o valor do investimento seja útil pelo maior período possível.

Apesar do uso mais amplo a minas à céu aberto, a aplicação de políticas de teor de corte dinâmicas pode ser realizada para minas subterrâneas, independentemente de estar em um ambiente confinado, e de maneira simples.

A teoria desenvolvida por Lane em 1988, portanto, é aplicável para minas subterrâneas de depósitos polimetálicos, tornando mais atrativo economicamente o investimento que pode ser feito nesses empreendimentos, garantindo maior retorno financeiro para empresas envolvidas no projeto.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMM, T. W.; & STEBBINS, S. A. **Simplified cost models for underground mine evaluation: a handbook for quick prefeasibility cost estimates**. Mining Engineering Department, Montana Technological University, 2020. 53p.

CHIAVENATO, I. **Administração - Teoria, processo e prática** (3ª ed.). São Paulo: Pearson Makron Books, 2000. 416p.

COSTA, L. V. de. **Análise das opções de vias de produção e acesso em minas subterrâneas**. 2015. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

DIMITRAKOPOULOS, R. **Advances in applied strategic mine planning**. Montreal: Springer, 2018. 800p.

GÜLCAN, Ergin; GÜLSOY, Özcan Y. Performance evaluation of optical sorting in mineral processing – A case study with quartz, magnesite, hematite, lignite, copper and gold ores. **International journal of mineral processing**, v. 169, p. 129-141, 2017.

HALL, B. **Cut-off grades and optimising the strategic mine plan**. Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. 300p.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; & MARTIN, R. **Open pit mine planning & design** (3ª ed.). Londres: Taylor & Francis, 2013. 1288p.

OLIVEIRA, D. de P. R. **Planejamento estratégico - Conceitos, metodologia, práticas** (23ª ed.). São Paulo: Atlas S.A, 2007. 331p.

LANE, K. F. **The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice**. Mining Journal Books, 1988. 149p.

RENDU, J. M. **Introduction to cut-off grade estimation**. Littleton: SME, 2008. 106p.

VALENTE, B. A., *et al.* Aplicação de tecnologia de *ore sorting* para aproveitamento de minérios de baixo teor de zinco em Vazante/MG. **ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, XXVIII**, 2019, Belo Horizonte.. 2019. 8p.