

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Caroline Vieira de Queiroz

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA ABORDAGEM DO PLANEJAMENTO
DE LAVRA ESTRATÉGICO ROBUSTO**

Belo Horizonte
2024

Caroline Vieira De Queiroz

**AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA ABORDAGEM DO PLANEJAMENTO
DE LAVRA ESTRATÉGICO ROBUSTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado
Profissional da Universidade Federal de Minas
Gerais como parte dos requisitos necessários
à obtenção do título de Mestre em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader

Coorientador: Me. Karl Santório Tôrres

Belo Horizonte

2024

Q3a

Queiroz, Caroline Vieira de.

Avaliação dos benefícios econômicos da abordagem do planejamento de lavra estratégico robusto [recurso eletrônico] / Caroline Vieira de Queiroz. – 2024.

1 recurso online (103 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Alizeibeck Saleimen Nader.

Coorientador: Karl Santório Tôrres.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 100-103.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Indicadores econômicos - Teses. 4. Lavra de minas - Planejamento - Teses. 5. Viabilidade econômica - Teses. I. Nader, Alizeibeck Saleimen.
II. Tôrres, Karl Santório. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UF **m** G

AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA ABORDAGEM DO PLANEJAMENTO DE LAVRA ESTRATÉGICO ROBUSTO

CAROLINE VIEIRA DE QUEIROZ

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 01 de março de 2024.

Por:

Prof. Dr. Alizeibek Saleimen Nader (UFMG)
Orientador

Me. Karl Santorio Torres (GE21)
Coorientador

Documento assinado digitalmente



ROBERTO GALERY

Data: 14/03/2024 14:36:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG)

Prof. Pedro Henrique Alves Campos (UFMG)

Dedico essa dissertação ao meu parceiro,
Gustavo, que felicidade é compartilhar a vida
com você.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus pelas incontáveis bênçãos e proteções.

Pelo apoio incondicional, pela dedicação e por serem meu porto seguro, agradeço aos meus pais, Maurílio e Valdete, aos meus irmãos, Cecília, Mariana, Laura e Theodoro, e ao meu parceiro, Gustavo.

Ao meu orientador, Alizeibek Saleimen Nader, e ao meu coorientador, Karl Santório Tôrres, pelo incentivo, disposição e contribuições valiosas necessárias para a elaboração deste estudo.

Aos meus amigos e amigas, pelo apoio, conforto, sorrisos, ensinamentos e por serem minha família em vários momentos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação desta dissertação.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais e aos docentes do Departamento de Mineração, pela chance de expandir os horizontes do meu conhecimento.

RESUMO

O planejamento de mina é fundamental para o estudo da viabilidade econômica de um empreendimento mineiro, especialmente por se tratar de um negócio com um alto risco associado. Uma das etapas mais importantes do planejamento de lavra estratégico é a avaliação econômica do projeto, etapa essa que envolve a análise de vários fatores, incluindo a valoração de projetos de mineração. A pesquisa desenvolvida buscou avaliar os benefícios econômicos da abordagem do planejamento de lavra estratégico robusto. Para alcançar o objetivo proposto, realizou-se a comparação entre os resultados da avaliação econômica, obtidos a partir da abordagem do planejamento de lavra convencional, assim como os obtidos a partir da abordagem do planejamento de lavra robusto, utilizando um banco de dados real de um projeto de lítio. A abordagem clássica de planejamento de lavra determinou parâmetros utilizados sem realizar uma análise dos impactos individuais de suas variações no modelo financeiro. Por outro lado, a metodologia de planejamento de lavra robusto gerou múltiplos cenários, nos quais foi possível analisar os fatores escolhidos no modelo financeiro. A análise econômica do projeto foi avaliada por meio de um fluxo de caixa descontado. Foram analisados os impactos nos indicadores financeiros, valor presente líquido, taxa interna de retorno, índice de rentabilidade e período de *payback*. Os resultados revelaram que a abordagem robusta baseada no planejamento de experimentos apresentou resultados financeiros superiores em diversos cenários em relação à abordagem clássica. Além disso, foram mapeados os parâmetros que mais influenciaram os indicadores financeiros, sendo eles o valor de venda, os ângulos interrampa e a taxa de produção anual. Por último, destaca-se a importância de considerar a abordagem robusta e a influência dos parâmetros do planejamento de lavra na avaliação econômica, uma vez que os resultados obtidos a partir dessa abordagem possuem o potencial de orientar decisões estratégicas para maximizar a viabilidade econômica de projetos de mineração.

Palavras-chave: abordagem clássica do planejamento de lavra; abordagem robusta do planejamento de lavra; planejamento de experimentos; avaliação econômica; indicadores financeiros.

ABSTRACT

Mining planning is crucial for the economic feasibility study of a mining venture, especially due to the high associated risk. One of the most important stages of strategic mine planning is the economic evaluation of the project, which involves the analysis of various factors, including the valuation of mining projects. The research aimed to evaluate the economic benefits of the robust strategic mine planning approach. To achieve this goal, a comparison was made between the results of the economic evaluation obtained from the conventional mine planning approach and those obtained from the robust mine planning approach, using a real database from a lithium project. The classical mine planning approach determined parameters without conducting an analysis of the individual impacts of their variations on the financial model. On the other hand, the robust mine planning methodology generated multiple scenarios, allowing the analysis of the chosen factors in the financial model. The economic analysis of the project was evaluated using discounted cash flow. The impacts on financial indicators, net present value, internal rate of return, and payback period were analyzed. The results revealed that the robust approach based on design of experiments yielded superior financial results in various scenarios compared to the classical approach. Additionally, the parameters that most influenced the financial indicators were mapped, including the selling price, interramp angles, and annual production rate. Finally, it is important to highlight the significance of considering the robust approach and the influence of mine planning parameters in economic evaluation, as the results obtained from this approach have the potential to guide strategic decisions to maximize the economic viability of mining projects.

Keywords: classical approach to mine planning; robust approach to mine planning; design of experiments; economic evaluation; financial indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Cadeia de valor mineral	18
Figura 4.2 Capacidade relativa de influenciar custos.	19
Figura 4.3 Fluxograma simplificado de um planejamento estratégico.	21
Figura 4.4: Uso do modelo de blocos para a representação do modelo geológico.....	28
Figura 4.5: Modelo de Blocos exemplificativo.	33
Figura 4.6: Configuração linha 1 após passo 2.	34
Figura 4.7: Configuração linha 1 após passo 5.	34
Figura 4.8: Configuração linha 2 após passo 2.	34
Figura 4.9: Configuração linha 2 após passo 4.	35
Figura 4.10: Contorno da cava ótima obtida.	35
Figura 4.11: Guia de <i>designs</i> de experimentos.	49
Figura 5.1: Fluxograma simplificado das etapas do projeto.....	57
Figura 5.2: Visualização gráfica do modelo de blocos - 3D.	59
Figura 5.3: Visualização gráfica do modelo de blocos - 2D.	59
Figura 5.4: Visualização gráfica do modelo de blocos - Seção 1.	60
Figura 5.5: Visualização gráfica do modelo de blocos - Seção 2.	60
Figura 5.6: Setorização geotécnica.	61
Figura 5.7: Variação do preço de espodumênio em 2023.	67
Figura 6.1: Cenários de lavra.	77
Figura 6.2: Gráfico de Pareto dos efeitos para a reserva.	77
Figura 6.3: Gráfico de interação para o valor de venda e os ângulos interrampa.	78
Figura 6.4: Gráfico de efeitos principais para o custo de lavra.	79
Figura 6.5: Gráfico de Pareto dos efeitos para o VPL.	87
Figura 6.6: Gráfico de efeitos principais para o VPL.	87
Figura 6.7: Gráfico de Pareto dos efeitos para a taxa interna de retorno.	88
Figura 6.8: Gráfico de efeitos principais para a taxa interna de retorno.	89
Figura 6.9: Gráfico de efeitos principais para o período de <i>payback</i>	90
Figura 6.10: Gráfico de efeitos principais para o <i>payback</i>	91
Figura 6.11: Gráfico de Pareto dos efeitos para o índice de rentabilidade.	92
Figura 6.12: Gráfico de efeitos principais para o índice de rentabilidade. autor.	93
Figura 6.13: Gráfico de interação para o índice de rentabilidade.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Fases do projeto.	19
Tabela 4.2: Exemplo do <i>design</i> experimental do fatorial completo de 2^3	52
Tabela 4.3: Número de execuções para o planejamento fatorial completo.	53
Tabela 4.4: Exemplo do <i>design</i> experimental do fatorial fracionado de 2^{6-2}	55
Tabela 5.1: Parâmetros de otimização. - Abordagem clássica.	62
Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no planejamento de experimentos.	66
Tabela 5.3: Custo de lavra detalhado	67
Tabela 5.4: Ângulos interrampa detalhado.	68
Tabela 5.5: CAPEX do projeto.	69
Tabela 5.6: Custos operacionais fixos.	70
Tabela 5.7: Impostos e <i>royalties</i>	71
Tabela 6.1: Resultado da otimização a partir da abordagem clássica.	72
Tabela 6.2: Sequenciamento de lavra da abordagem clássica.	73
Tabela 6.3: Cenários (1 ao 8) obtidos a partir do planejamento de experimentos.	74
Tabela 6.4: Cenários (9 ao 16) obtidos a partir do planejamento de experimentos.	74
Tabela 6.5: Resultado da otimização a partir da abordagem robusta.	76
Tabela 6.6: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 1 – 6).	81
Tabela 6.7: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 7 – 12).	81
Tabela 6.8: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 13 – 16).	82
Tabela 6.9: Resumo dos indicadores financeiros analisados.	84
Tabela 6.10: Parâmetros utilizados nos cenários da abordagem robusta com melhores resultados econômicos em relação à abordagem clássica (Parte 1).	85
Tabela 6.11: Parâmetros utilizados nos cenários da abordagem robusta com melhores resultados econômicos em relação à abordagem clássica (Parte 2).	85
Tabela 6.12: Fatores que possuem maior influência nas métricas financeiras estudadas.	94

LISTA DE NOTAÇÕES

° – grau

% porcentagem

m – metro

kg – quilo

t – tonelada

Mt – milhões de tonelada

Mtpa – milhão de tonelada por ano

FCD – fluxo de caixa descontado

VPL– valor presente líquido

VPI – valor presente do investimento

TIR – taxa interna de retorno

IR – Índice de rentabilidade

CAPEX – custos de capital (*i.e., capital expenditures*)

OPEX – custos operacionais (*i.e., operating expenditures*)

DOE – planejamento de experimentos (*i.e., design of experiments*)

ANOVA – análise de variância (*i.e., analysis of variance*)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVO GERAL	15
2.1	Objetivos específicos	15
3.	RELEVÂNCIA	16
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	Cadeia de valor da mineração	17
4.2	Projeto de mineração	18
4.3	Planejamento de lavra	20
4.3.1	Abordagem clássica	22
4.3.2	Planejamento de lavra robusto	25
4.4	Otimização de cava	27
4.4.1	Modelo de blocos	28
4.4.1.1	Definição do valor econômico dos blocos	29
4.4.1.2	Parâmetros físicos	30
4.4.2	Método de otimização a partir do algoritmo Lerchs-Grossmann	30
4.4.2.1	Algoritmo Lerchs-Grossmann 3D	31
4.4.3	Teor de corte	36
4.4.4	Software Whittle	37
4.5	Valoração de projetos	38
4.5.1	Métricas de avaliação de investimento sem risco	38
4.5.1.1	Período de payback	38
4.5.1.2	Valor presente líquido (VPL)	39
4.5.1.3	Taxa interna de retorno (TIR)	39
4.5.1.4	Índice de rentabilidade (IR)	40
4.5.2	Método do fluxo de caixa descontado	41
4.5.3	Análise de sensibilidade	43
4.6	Estimativas de custos	44
4.6.1	Custos de capital	45
4.6.2	Custos operacionais	46
4.7	Avaliação econômica	47
4.8	Simulação	48

4.8.1	Planejamento de experimentos para o planejamento robusto	48
4.8.1.1	Planejamento fatorial completo	51
4.8.1.2	Planejamento fatorial fracionado	53
5.	METODOLOGIA	57
5.1	Modelo de blocos	58
5.2	Abordagem clássica	61
5.2.1	Otimização de cava	61
5.2.2	Sequenciamento de lavra	63
5.3	Abordagem do planejamento robusto	63
5.3.1	Software Minitab	64
5.3.2	Planejamento de experimentos	65
5.3.2.1	Minitab	66
5.3.3	Otimização das cavas	68
5.3.4	Sequenciamento de lavra dos cenários	68
5.4	Análise econômica	69
5.4.1	Custos de capital	69
5.4.2	Custos operacionais	70
5.4.3	Impostos e royalties	70
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
6.1	Abordagem clássica	72
6.1.1	Otimização de cava	72
6.1.2	Sequenciamento de lavra	73
6.2	Abordagem do planejamento robusto	73
6.2.1	Planejamento de experimentos	73
6.2.2	Resultado da otimização	76
6.2.3	Sequenciamento de lavra	80
6.3	Análise econômica	84
6.3.1	Influência dos parâmetros nas métricas financeiras	86
6.3.1.1	Valor presente líquido (VPL)	86
6.3.1.2	Taxa interna de retorno (TIR)	88
6.3.1.3	Período de Payback	89
6.3.1.4	Índice de rentabilidade (IR)	91
6.4	Análise dos resultados	94

7.	CONCLUSÕES	96
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	100

1. INTRODUÇÃO

A mineração pode ser descrita, em termos econômicos, como um negócio de alto risco associado. Por essa razão, faz-se necessário um conjunto de estudos para que seja possível determinar se os investimentos em detalhamento geológico e planejamento de *layout* da mina, por exemplo, são capazes de gerar resultados atrativos para o investidor (D'ARRIGO, 2012). Ademais, à medida que a implantação do projeto se aproxima, é necessária uma maior precisão do estudo, de forma a atingir um grau de maturidade que permita tomadas de decisões críticas.

O planejamento de lavra é um importante processo para agregação de valor e tem início a partir da construção de um modelo geológico e da definição de parâmetros de projeto, parâmetros estes que embasam a definição de cava e o sequenciamento de lavra. Na abordagem clássica do planejamento de lavra, majoritariamente, os parâmetros citados previamente são determinados sem que uma análise de sensibilidade dos impactos individuais de suas variações no modelo financeiro seja efetuada. Dessa forma, os resultados obtidos nas etapas seguintes podem não fazer parte do melhor cenário possível, gerando um resultado financeiro do projeto inferior ao ótimo.

Já a abordagem do planejamento de lavra robusto (*i.e.*, *Robust Strategic Mine Planning*), baseia-se na geração de múltiplos cenários em que é possível realizar uma análise de sensibilidade das variáveis escolhidas com uma série de condições dentro do planejamento de lavra. Assim, esse processo tem a capacidade de lidar com uma variedade de condições e extrair um resultado que seja o melhor possível.

A análise econômica, que possui como entrada o plano de produção resultante das etapas previamente apresentadas, avaliada nesse caso por meio de um fluxo de caixa descontado, possui a função de guiar a decisão de investimentos do projeto de mineração e, portanto, é importante para que um resultado ótimo seja alcançado.

De modo a mitigar os impactos causados pela simplificação de parâmetros e obter um resultado ótimo na análise econômica do projeto, a metodologia de planejamento de lavra robusto é proposta neste estudo para que seja alcançado um resultado capaz de lidar com uma variedade de condições, da melhor maneira possível entre todas as prováveis opções.

2. OBJETIVO GERAL

O presente estudo visa avaliar os benefícios da possibilidade de escolha entre uma abordagem clássica de planejamento de lavra e uma abordagem estratégica (*i.e.*, planejamento de lavra robusto), sendo a última baseada na avaliação de vários cenários através da variação de parâmetros de otimização na análise econômica de projetos de mineração.

2.1 Objetivos específicos

- Definir a cava ótima e o sequenciamento de lavra tanto pela abordagem clássica quanto pela abordagem do planejamento de lavra robusto, e desenvolver os *inputs* necessários para a avaliação econômica do projeto.
- Efetuar a avaliação econômica do projeto de acordo com as duas abordagens apresentadas e comparar os resultados obtidos;
- Classificar os parâmetros utilizados na abordagem do planejamento de lavra robusto, de acordo com as suas influências no resultado obtido na etapa da avaliação econômica.

3. RELEVÂNCIA

Em consonância com a crescente demanda por soluções de energia limpa e sustentável, o lítio emergiu como um recurso estratégico, motivando países a expandirem suas capacidades de produção e a prospectarem novas reservas. Nesse contexto, as novas reservas a serem prospectadas precisam ter uma viabilidade econômica comprovada.

De acordo com Lee (1984 *apud* HUSTRULID & KUCHTA 1995), em um empreendimento mineiro, a fase do planejamento de mina é fundamental para o estudo da viabilidade econômica do projeto. Ainda segundo o autor supracitado, a etapa do planejamento oferece as melhores oportunidades para minimizar os custos de capital e os custos operacionais do projeto final, assim como para maximizar sua operacionalidade e lucratividade. No entanto, o autor também observou que nenhuma outra fase do projeto é tão suscetível a um desastre técnico ou financeiro quanto a fase do planejamento.

Dessa forma, o desenvolvimento da seguinte dissertação torna-se relevante por avaliar os benefícios da escolha entre a abordagem clássica de planejamento de lavra e a abordagem estratégica, baseada na avaliação de vários cenários, utilizando uma base de dados oriunda de um projeto de lítio real. Espera-se que a abordagem robusta do planejamento de lavra permita o aumento da confiança nos resultados da avaliação econômica do projeto, indicando quais alterações possibilitam um maior benefício para o projeto e maximizam o seu valor.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cadeia de valor da mineração

A cadeia de valor de uma empresa pode ser definida como um sistema de atividades necessárias e independentes, que são interligadas por correlações, de maneira que um serviço ou produto tenha a sua elaboração finalizada. É ideal que as atividades sejam desenvolvidas com o menor custo para que o negócio seja lucrativo e a empresa tenha competitividade no mercado (KAPLINSKY & MORRIS, 2000).

Para que essas atividades, como por exemplo, as diferentes fases de planejamento, produção, mobilização e atividades de suporte de um empreendimento sejam concluídas, são necessários recursos humanos e uma combinação de tecnologias (NADER, 2013).

Contextualizando de acordo com as características e particularidades da indústria mineral, Azevedo (2007) definiu a cadeia de valor mineral como:

- sequência de atividades de exploração e produção – pesquisa, extração, transporte, estocagem, transformação, venda e logística de entrega. Essas são as atividades que geram lucros para as empresas. Aqui se aplicam os sistemas de rastreamento de informações;
- contribuição intelectual deste processo – representada pelas tomadas de decisões a respeito das diversas etapas sequenciais de produção. Aqui são aplicados os sistemas informatizados de planejamento.

Nesta dissertação as atividades são concentradas e focalizadas na etapa da estimativa de reservas, em que um sistema de informações é criado para que seja possível a tomada das melhores decisões, táticas e operacionais, além de decisões de investimento para que o empreendimento mineiro tenha início.

A Figura 4.1 ilustra e discretiza as etapas da cadeia de valor mineral.

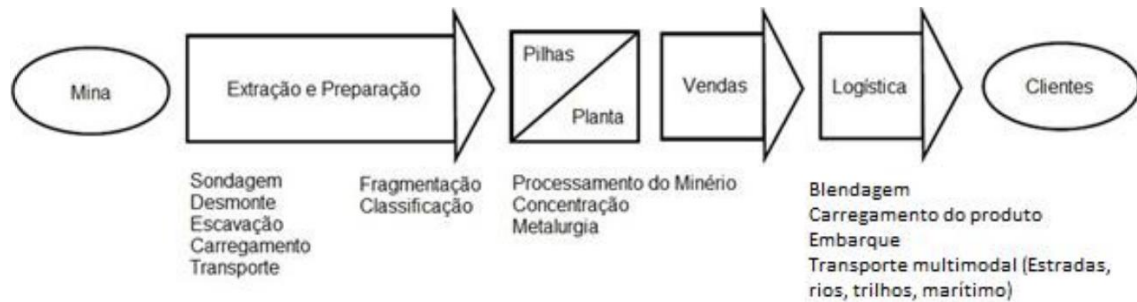


Figura 4.1: Cadeia de valor mineral

Fonte: Nader (2013).

4.2 Projeto de mineração

Para a avaliação de projetos de mineração as incertezas e os riscos presentes nesses empreendimentos precisam ser levados em consideração, uma vez que possuem o potencial de impactar criticamente o resultado da avaliação econômica dos projetos (HAQUE *et al.*, 2016).

Os estudos técnicos-econômicos, comumente realizados, possuem como objetivo comprovar a viabilidade econômica e/ou técnica de um projeto antes da sua execução. Tais estudos são uma integração detalhada de todos os parâmetros incluídos na avaliação econômica intermediária e outros fatores relevantes que afetam a viabilidade do projeto, e dessa forma, são fundamentais no processo de avaliação econômica. De acordo com Lee (1984 *apud* HUSTRULID & KUCHTA, 1995), os estudos são compostos por três fases: a etapa do estudo conceitual, do estudo preliminar (ou de pré-viabilidade) e a etapa do estudo de viabilidade.

Os nomes que são atribuídos a cada fase normalmente são relacionados ao nível de precisão esperado nas estimativas de custos apuradas em cada uma das etapas, porém é importante ressaltar que diferentes autores podem indicar o mesmo termo para corresponder a distintos graus de conhecimento e precisão.

De acordo com Carriconde (2010), na etapa conceitual, onde os dados a serem utilizados certamente não estarão suficientemente detalhados e com um grau de confiança considerável, não é possível definir com segurança o *layout* da mina, a rota de processo, a qualidade do produto e outras informações para o desenvolvimento de projetos definitivos. Desse modo, a experiência e competência dos engenheiros que conduzem o estudo são imprescindíveis para que os fatores utilizados sejam assegurados.

A Tabela 4.1 apresenta uma classificação de etapas de projeto, proposta por Reynolds (1990). No modelo de classificação proposto o termo conceitual é referente a uma etapa preliminar do projeto, em que estudos de engenharia, estudos de dimensionamento de instalações ou de equipamentos praticamente não existem e que os custos apresentados refletem somente a ordem de magnitude esperada (CARRICONDE, 2010).

Tabela 4.1: Fases do projeto.

Fase do Projeto	% Engenharia Concluída	Nível de precisão (%)
Conceitual	0	±50
Pré-viabilidade	0 - 30	25 - 30
Viabilidade	30 +	10 - 15
Detalhamento	60	±5

Fonte: Reynolds (1990 *apud* CARRICONDE 2010).

A Figura 4.2 demonstra as fases do projeto e a capacidade de cada uma influenciar nos custos de um empreendimento.



Figura 4.2 Capacidade relativa de influenciar custos.

Fonte: Adaptado de Lee (1984 *apud* HUSTRULID & KUCHTA 1995).

Apesar de diferentes autores utilizarem proposições diferentes para que as etapas do projeto sejam classificadas, é notório que com a conclusão de cada fase dos estudos a confiança nos resultados obtidos para determinado empreendimento mineiro se amplia, ou seja, a decisão de prosseguir ou desistir do projeto é facilitada.

Diferentes metodologias são adotadas para que as fases de um projeto de mineração, prospecção, exploração, desenvolvimento, exploração e descomissionamento, possam ser

adaptadas à necessidade crescente de precisão desde a ocorrência ou mineralização até a jazida lavrável (D'ARRIGO, 2012).

Ademais, é importante destacar que não existe uma metodologia padrão a ser seguida quando se trata de estimativas de custos. Os avaliadores utilizam de diferentes abordagens para que os custos sejam minimizados e a maximização da produtividade seja possibilitada. As abordagens utilizadas tendem a ser adequadas às particularidades de cada reserva mineral, sendo que à medida que a execução do processo se aproxima, os dados utilizados no estudo passam a ser mais precisos.

Após os estudos preliminares serem realizados e os objetivos corporativos e recursos estabelecidos, faz-se necessário determinar o método de lavra. A definição do método de lavra corresponde a um dos principais itens do processo de desenvolvimento de um empreendimento mineiro, apresentando caráter determinante em seu potencial sucesso (CURI, 2017).

4.3 Planejamento de lavra

De acordo com Hustrulid & Kuchta (1995), o planejamento estratégico de lavra é composto por estudos e técnicas que possuem como objetivos a extração e o tratamento dos bens minerais presentes em uma jazida de forma econômica e sustentável, atendendo todas as questões tecnológicas, econômicas, sociais, legais e ambientais pertencentes às atividades desenvolvidas.

A Figura 4.3 exemplifica um fluxograma simplificado de desenvolvimento de um planejamento estratégico.

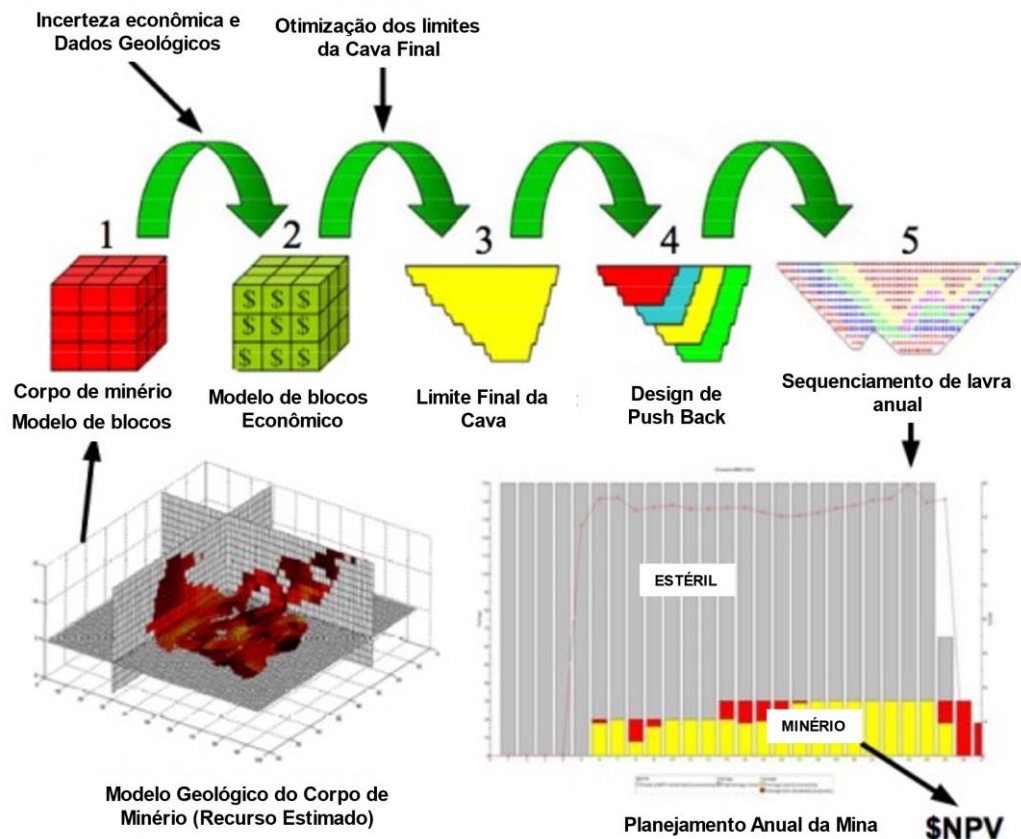


Figura 4.3 Fluxograma simplificado de um planejamento estratégico.

Fonte: Adaptado de Askari-Nasab (2010 *apud* JUNIOR 2017).

O primeiro passo, tanto para o planejamento de longo prazo quanto para o de curto prazo, é a construção de um modelo de blocos econômico. Informações geológicas, metalúrgicas e características econômicas são exemplos de possíveis variáveis que são combinadas para obter o valor econômico líquido dos blocos em caráter unitário (DA MATA, 2021). Com a determinação do valor unitário de cada bloco é possível definir se um bloco é minério ou estéril e destiná-lo ao longo da operação da mina.

A definição do limite da cava ótima é realizada logo em seguida. Este limite define a quantidade total de minério a ser lavrado e a quantidade total de estéril, associado ao bem mineral, que será removido durante a vida útil da mina (KENNEDY, 1990).

O material contido dentro do limite da cava deve atender aos seguintes objetivos:

1. um bloco só será lavrado caso possa pagar todos os custos envolvidos na sua extração, processamento, comercialização, além da remoção do estéril acima do bloco;

2. para a conservação de recursos, qualquer bloco que atenda ao primeiro objetivo será incluído na cava.

O resultado obtido a partir dos objetivos listados anteriormente apresenta uma geometria que busca maximizar o lucro total, baseado nos parâmetros econômicos, físicos, geotécnicos, além de outras premissas inerentes ao projeto. É importante ressaltar que caso esses parâmetros se alterem no futuro, a cava ótima pode sofrer alterações, uma vez que alguns parâmetros possuem valores que somente serão conhecidos exclusivamente no momento da execução do projeto (KENNEDY, 1990). As características físicas de um recurso mineral, como a natureza da mineralização e a estrutura física (profundidade, forma, mergulho) são fixas, porém fatores econômicos, sociais, ambientais, legais, tecnológicos, entre outros, podem mudar ao longo do tempo com a evolução social, econômica, tecnológica e política (SMITH, 2012).

O limite da cava irá embasar as definições do desenho operacional da cava e do sequenciamento de lavra. O sequenciamento de lavra é um fator limitante para a alimentação da planta de beneficiamento, interferindo diretamente no sucesso financeiro do empreendimento, que é resultado da programação de produção da usina de beneficiamento (SOUZA, 2016).

Ademais, a definição da geometria da cava e da sua localização são importantes para que sejam dimensionadas as áreas de disposição do rejeito e do estéril, bem como a infraestrutura relacionada a acessos, planta e demais instalações auxiliares necessárias para que o empreendimento mineiro tenha início (KENNEDY, 1990). Desse modo, é perceptível que a cava final ótima impacta diretamente na análise econômica e no fluxo de caixa do projeto.

4.3.1 Abordagem clássica

No planejamento de lavra a definição da cava final começa a ser efetuada a partir de técnicas manuais, que demandam um tempo considerável e experiência por parte do engenheiro responsável, por se tratar de um método de tentativa e impactar de forma significativa na valoração do projeto (KENNEDY, 1990). O método manual, citado anteriormente, é baseado inicialmente pela relação estéril-minério (REM) (DO CARMO, 2001).

O método dos cones flutuantes é outro método que foi muito utilizado, por ser de fácil compreensão, além de ser simples de programar. O método consiste no rastreio de blocos de minério no modelo de blocos por meio de um cone que se move através dos blocos, com os

vértices do cone ocupando, sucessivamente, os centros dos blocos (DO CARMO, 2001). Quando os blocos de minério são encontrados, é realizado um estudo econômico dos blocos que constituem os cones invertidos que precisam ser lavrados para o minério ser exposto. Se o valor do cone é positivo, os blocos que fazem parte dos cones são lavrados e se tornam blocos de ar no modelo de blocos utilizado, e a procura de novos blocos de minério continua (WHITTLE, 2005).

O método dos cones flutuantes é utilizado em vários algoritmos, como por exemplo, no algoritmo proposto por Robinson e Prenn (HOCHBAUM, 1997 *apud* DO CARMO, 2001), em que cada cone que possui um bloco de minério é uma base. Caso o peso total dos blocos presentes no cone seja positivo, os blocos são removidos e todos os blocos removidos formam a cava final. Porém este algoritmo pode não atingir uma solução ótima (DO CARMO, 2001).

Ademais, a principal limitação é referente à dificuldade de os cones serem tratados simultaneamente, e ocasionalmente dois ou mais cones sobrepostos possuem um valor maior do que dois cones tratados separadamente. Tal limitação relatada anteriormente é agravada ao se trabalhar em três dimensões (NADER, 2022). Outra limitação apontada por Barnes (1982 *apud* HUSTRULID & KUCHTA 1995), é o fato de que o método estende a cava final além dos limites da cava ótima, e isto ocorre quando o cone inclui na cava final blocos não lucrativos, reduzindo o valor total da cava.

A abordagem clássica de planejamento utilizada na indústria mineral atualmente baseia-se no algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann, em 1965, para a definição de uma cava ótima (SOUZA, 2016). O algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann está presente na maioria dos *softwares* comerciais de planejamento de lavra e é baseado na programação dinâmica aliada à teoria de grafos. A partir dele é possível determinar a cava ótima com melhor economicidade de acordo com os parâmetros e restrições particulares de cada projeto, sendo o resultado obtido fundamentado na premissa de que todos os blocos serão lavrados de uma vez (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

Os algoritmos presentes nos *softwares* comerciais citados executam a seguinte sequência lógica, que foi aprimorada durante os anos a partir do avanço da tecnologia computacional: a construção do modelo de blocos, determinação da cava final ótima, definição das cavas aninhadas e seus *pushbacks* e do sequenciamento de lavra. Logo após a etapa do planejamento de lavra, é realizada a operacionalização da lavra, além da gestão do controle e produção da mina (DA MATA, 2021).

Além do mais, outra razão para a metodologia ser consolidada no mercado e a mais utilizada em estudos de viabilidade de empreendimentos mineiros, consiste no fato de que projetos e relatórios são auditados normalmente a partir de *softwares* comerciais, que possuem algoritmos fechados e não permitem interferências ou alterações nos cálculos (TORRES, 2018).

Outra abordagem que vem ganhando espaço na indústria é a do algoritmo *pseudoflow*, proposto por Hochbaum em 2008. Este algoritmo demonstrou ser mais eficiente, fornecendo resultados mais rápidos do que o algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann, que demanda uma quantidade significativa de tempo para determinar a cava ideal, especialmente à medida que os modelos de blocos e as cavas aumentam em tamanho e em escala. O algoritmo *pseudoflow* já se apresenta disponível, por exemplo, pelo software *GEOVIA Whittle (Dassault Systèmes SE)* (BAI *et al.*, 2017).

Após a definição da cava ótima, a partir de uma das metodologias apresentadas, é realizada a operacionalização desta cava. Nessa etapa os parâmetros operacionais do empreendimento são levados em consideração para que o desenho seja realizado de tal forma que a operação seja segura e eficiente. As rampas de acesso da cava são desenhadas conforme a largura e a inclinação pré-estabelecidas, de acordo com os equipamentos que serão utilizados, bem como há a conferência da largura das praças mínimas presentes na cava, além do direcionamento das drenagens.

Logo após a definição do desenho da cava final, os avanços de lavra de cada ano da operação são realizados e o sequenciamento anual dos blocos, tanto de minério como de estéril, é definido (SOUZA, 2018).

Além do mais, toda a infraestrutura de apoio necessária para o início da lavra deve ser projetada para a posterior construção, a partir de estruturas como pilhas de estéril, barragens de rejeito, escritórios, alojamentos, refeitórios e vias de acesso.

Com todas as etapas previamente abordadas definidas, os custos inerentes ao projeto podem ser estimados para que a avaliação econômica do empreendimento seja realizada. É importante ressaltar que as etapas na abordagem clássica, normalmente, são realizadas de maneira independente, apesar de estarem interligadas.

4.3.2 Planejamento de lavra robusto

Além das abordagens citadas anteriormente, novas abordagens estão sendo estudadas na academia e na indústria, em busca de algoritmos de otimização de cavas mais eficientes.

O sequenciamento da produção de uma mina é uma das áreas mais desafiadoras presentes no planejamento de mina (KUMRAL, 2010). A abordagem mais utilizada para a realização desse sequenciamento, citada anteriormente, é baseada no algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann. Porém, nessa metodologia é utilizado um sistema fixo para um conjunto de condições ou valores esperados, ou seja, os parâmetros que são utilizados comumente são determinados sem que uma análise de sensibilidade dos impactos individuais de suas variações no modelo financeiro seja efetuada (GROENEVELD *et al.*, 2012). Dessa forma, os resultados obtidos nas etapas seguintes podem não fazer parte do melhor cenário possível, gerando um resultado financeiro do projeto inferior ao ótimo.

Alguns dos parâmetros utilizados são variáveis ao longo da vida da mina, como o custo de lavra, o custo de processo, parâmetros geotécnicos e o preço de venda dos produtos, ou seja, podem variar mensalmente, sazonalmente ou serem afetados por outros fatores externos. De forma semelhante, é comum uma simplificação de parâmetros para determinação da cava ótima com níveis de detalhes inferiores aos da análise econômica do projeto, havendo atualizações nos custos médios após detalhamento do sequenciamento de lavra, impactando na avaliação do projeto.

Uma alternativa seria desenvolver um sistema robusto, em que a variação seja considerada a partir de uma série de condições dentro do processo de otimização, no qual as incertezas dos dados possam ser minimizadas (GROENEVELD *et al.*, 2012). Para obter um resultado a partir do sistema robusto é necessário que vários cenários sejam gerados, de forma que a volatilidade dos fatores externos, sujeitos a diferentes configurações operacionais, seja avaliada.

O *design* de produto robusto (*i.e.*, *Robust Product Design*) é um conceito proveniente do Genichi Taguchi (o método também é conhecido como "Método Taguchi"). Desenvolvido nos primórdios da década de 1940 no Japão, essa abordagem tem como objetivo maximizar a qualidade do produto através do controle da variabilidade no processo de *design* (ARVIDSSON & GREMYR, 2007).

A ideia fundamental dos experimentos de *design* de produto robusto é variar os fatores de

controle e os fatores de ruído no mesmo experimento e buscar possíveis interações entre esses fatores. Taguchi argumenta que o principal método para alcançar um *design* robusto é por meio do *design* de parâmetros, sugerindo que pensar na robustez no design do sistema é menos relevante. Além do mais, diversos métodos foram desenvolvidos para a realização do design de produtos robusto, sendo o planejamento de experimentos um desses métodos (ARVIDSSON & GREMYR, 2007).

Ainda segundo Arvidsson & Gremyr (2007), somente nos anos 1980 que a metodologia ficou conhecida internacionalmente e desde então várias indústrias possuem interesse em adotar as práticas. Entre essas indústrias, destaca-se a indústria da mineração, que adotou uma variação da nomenclatura do conceito, chamada de “Planejamento de Lavra Estratégico Robusto”.

Relacionado ao contexto do planejamento estratégico robusto tem-se o conceito da otimização estocástica. A otimização estocástica é um método utilizado no planejamento de lavra para incluir a incerteza no processo de otimização, através do uso de modelos estatísticos e técnicas de simulação para avaliar os resultados potenciais de diferentes cenários de produção, e identificar aquele que maximiza um objetivo especificado, como o valor presente líquido (VPL).

A otimização estocástica se diferencia da otimização determinista da abordagem clássica no que se refere à variabilidade e incerteza dos parâmetros de entrada, como preços de venda, teores e custos de processamento. Em contraste, a otimização determinista assume que esses *inputs* são conhecidos e fixos.

Apesar de fornecer uma abordagem mais robusta e abrangente para o planejamento de lavra, a otimização estocástica também se difere da otimização baseada em cenários, onde se estuda um número limitado de cenários, se escolhendo o melhor deles. Além do mais, diferentemente da abordagem clássica, as etapas não são avaliadas de maneira independente e sequencial, mas sim de forma conjunta.

Esse planejamento baseado na otimização de cenários permite que as decisões sejam tomadas diante da variação de parâmetros, sem a necessidade da inserção de novas ferramentas ou *softwares*, alcançando resultados mais confiáveis.

Para testar a estratégia do planejamento de lavra robusto nesta dissertação serão utilizados métodos estatísticos de planejamento de experimentos. O *software SIMULIA Isight* (Dassault

Systèmes SE) também pode ser utilizado para essa finalidade como uma proposta de integração.

4.4 Otimização de cava

A otimização de cava é realizada para que sejam definidos os limites finais ótimos, ou a geometria ótima, da cava a ser lavrada. A partir da definição desses limites, é possível obter o tamanho e a forma de uma mina a céu aberto no final da sua vida útil, para que a maximização da riqueza futura seja atingida (CARMO *et al.*, 2006). Segundo Peroni (2002), o ótimo seria determinado a partir de um algoritmo que gerasse, em sua configuração resultante, um cenário com:

- máxima lucratividade;
- maior valor presente líquido;
- maior aproveitamento dos recursos minerais.

De acordo com Carmo, Curi e Souza (2006), os contornos obtidos na otimização definem a extensão da reserva lavrável e a quantidade de minério e estéril a ser lavrada, auxiliando na posição das estruturas presentes no empreendimento, uma vez que tais estruturas, como por exemplo, plantas de beneficiamento, pilhas de estéril, escritórios e refeitórios, não devem ser posicionadas sobre a reserva lavrável ou dentro dos limites da cava final.

As dimensões da cava ótima são definidas a partir de uma série de fatores econômicos, do limite legal das licenças vigentes, do direito minerário, além das restrições inerentes ao projeto e à produção. Se o preço do produto, considerando que os demais parâmetros permanecem constantes, aumenta, a cava ótima tende a aumentar e acontece o inverso caso o preço do produto diminua (WHITTLE, 1990).

Além do mais, segundo Silva (2008), os ângulos de taludes são capazes de afetar significativamente as dimensões da cava e determinar a quantidade de estéril que deverá ser removida na vida útil da mina para que o minério possa ser lavrado. Portanto, é necessário que ensaios geotécnicos sejam realizados previamente, criando-se um modelo de ângulos de estabilidade de taludes para as diferentes unidades geológica-geotécnicas da jazida.

O desafio do profissional, ao elaborar o planejamento de lavra, é realizar a otimização e o sequenciamento da lavra de forma que a produção seja alcançada, a remoção do estéril seja minimizada, a segurança dos equipamentos e dos operadores seja garantida e o valor presente líquido seja maximizado.

Ademais, é importante reiterar o dinamismo do conceito da cava ótima e do planejamento de lavra, pois ambos necessitam constantemente de revisões, uma vez que são oriundos de todas as variáveis técnicas e econômicas de um projeto de lavra, e desse modo, tanto o benefício operacional da mina quanto a reserva lavrável podem variar constantemente (SILVA, 2008). Em todos os estágios é necessário que exista um monitoramento que permita o desenvolvimento do melhor planejamento de curto, médio e longo prazo, para que a exploração da reserva seja realizada de maneira eficiente (CACCEA, 2003).

Os *softwares* comerciais de otimização de lavra a céu aberto que são utilizados atualmente na indústria utilizam o algoritmo de Lerchs e Grossmann, sendo o *GEOVIA Whittle (Dassault Systèmes SE)* o que se destaca nesse quesito.

4.4.1 Modelo de blocos

A base para realizar o planejamento de lavra a partir dos métodos computacionais é o modelo de blocos decorrente de um modelo geológico, com teores usualmente gerados por um estimador tradicional, a krigagem ordinária (DO CARMO, 2001). De acordo com Poniewierski (2019), o modelo de blocos é uma representação simplificada, matemática, de um depósito mineral a ser lavrado (Figura 4.4).

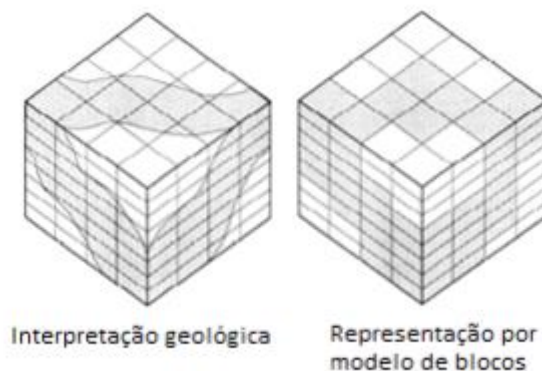


Figura 4.4: Uso do modelo de blocos para a representação do modelo geológico.

Fonte: Hartman (1992 *apud* CAMPOS 2017).

De acordo com Johnson (1968), devido ao padrão retangular da malha de desmonte de rochas e de todo o material do banco ser carregado em uma unidade de transporte, a utilização de blocos é muito adequada e precisa para representar as operações de um empreendimento mineiro.

O tamanho dos blocos é influenciado diretamente pela malha de sondagem adotada,

capacidade dos equipamentos, estrutura geológica, parâmetros geotécnicos, acurácia dos dados amostrais e método de lavra a ser realizado. Teores, densidades e tipos litológicos são exemplos de atributos adicionados no modelo de blocos. Quanto menor o tamanho do bloco, maior a flexibilidade e o refinamento no planejamento, entretanto o número de blocos é maior. Blocos muito pequenos tendem a não ser realistas, já que as informações geológicas e econômicas que os caracterizam são baseadas em informações provenientes de amostras de testemunhos que podem estar separadas entre 10 e 300 metros (JOHNSON, 1968).

Informações geológicas, metalúrgicas e características econômicas são exemplos de possíveis variáveis que são combinadas para que se possa obter o valor econômico líquido dos blocos unitariamente. Por consequência, pode se afirmar que a cava ótima é o produto do planejamento otimizado da lavra do modelo de blocos da jazida, que considera a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) global do projeto (DA MATA, 2021).

O modelo de blocos econômico gerado é utilizado no planejamento de lavra nas etapas de otimização de cava, sequenciamento de lavra e operação de lavra.

4.4.1.1 Definição do valor econômico dos blocos

Os blocos inseridos dentro do modelo de blocos podem ser classificados como minério, por possuírem uma concentração elevada de determinado elemento, ou podem ser considerados como estéril, caso não possuam um interesse econômico significativo para justificarem o seu processamento. Sendo assim, a definição do que é minério, e do que não é, é uma definição técnica e econômica (MORALES, 2016 *apud* DE OLIVEIRA MIRANDA, 2018).

O valor econômico inserido em cada bloco é capaz de refletir o valor financeiro individual que este bloco retorna ao ser extraído e classificado como minério ou estéril. Quanto maior o valor econômico obtido, maior a importância financeira do bloco em questão. Dessa forma, é chamada de função benefício a função que valoriza os blocos com base nos teores estimados (CAMPOS, 2017).

A função benefício pode ser calculada a partir da seguinte Equação (4.1):

$$VEB = [(P - Cv) \times g \times R \times T] - [(Cm + Cp) \times T] \quad (4.1)$$

Sendo:

- VEB = Valor econômico do bloco;
- P = Preço de venda do elemento de interesse;
- g = Teor do elemento de interesse;
- R = Recuperação do elemento de interesse;
- T = Tonelagem do bloco;
- Cv = Custo de venda;
- Cm = Custo de lavra;
- Cp = Custo de processamento.

O critério adotado na otimização é o de maximizar o valor total da cava, ou seja, o problema de definir os limites de uma cava torna-se encontrar o grupo de blocos que fornecerá o valor máximo, respeitando a estabilidade da mina e as restrições de lavra (DO CARMO, 2001). Portanto, conforme citado anteriormente, definir o valor econômico de um bloco é imprescindível, já que a partir dele é possível encontrar os blocos que maximizam o valor total da cava.

4.4.1.2 Parâmetros físicos

Os parâmetros físicos considerados na otimização podem ser restrições como a área diretamente afetada (ADA), limite da licença de operação, áreas de preservação, rios, proximidade de habitações populacionais, entre outros. Essas informações podem ser adicionadas ao modelo de blocos, como por exemplo, em forma de um atributo em que os blocos que estejam posicionados internamente à essas restrições possuam um custo de lavra extremamente alto, ou seja, não sejam economicamente viáveis e, portanto, não sejam considerados viáveis no processo de otimização.

Além dos parâmetros físicos supracitados, existem os fatores que são inerentes ao corpo mineralizado e às litologias existentes adjacentes, tais como os parâmetros geotécnicos de estabilidade. Parâmetros como altura de bancada, largura de berma, inclinação da rampa e largura de acessos não são diretamente utilizados neste momento, porém são definidos a partir dos estudos geotécnicos e do porte de equipamentos que serão utilizados, influenciando diretamente no ângulo geral da cava ótima.

4.4.2 Método de otimização a partir do algoritmo Lerchs-Grossmann

As cavas finais, que irão definir a reserva mineral de um empreendimento, podem ser

alteradas com frequência durante a vida útil do empreendimento mineiro do projeto, já que os parâmetros de otimização podem ser modificados e influenciar os valores técnicos e econômicos. Durante os últimos 40 anos, a pesquisa para a definição de cavas ótimas foi uma das áreas mais ativas da indústria da mineração e, conseqüentemente, vários algoritmos foram desenvolvidos e publicados (SILVA, 2008).

Helmut Lerchs e Ingo Grossman apresentaram em 1965 dois algoritmos de otimização, para que o problema da determinação dos limites da cava ótima fosse solucionado. O primeiro algoritmo era baseado em uma simples programação dinâmica para cavas bidimensionais, ou para uma seção vertical da mina, já o segundo algoritmo era mais elaborado, baseado na teoria dos grafos, para cavas tridimensionais (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

O algoritmo Lerchs-Grossmann para cavas tridimensionais está presente na maioria dos *softwares* comerciais de otimização de cavas a céu aberto. O algoritmo proposto permitiu que a diferença entre o valor total da mineração explotada e o custo total da extração do minério e do estéril fosse maximizada na cava ótima (PINTO & DUTRA, 2008).

Apesar de ter sido o algoritmo que introduziu as aplicações da informática na otimização de cavas a céu aberto, além de ser a metodologia com maior aplicação na indústria mineira, algumas razões fazem que o seu uso não seja universalmente aceito (CAMPOS, 2017):

- a complexidade do método em termos de compreensão e programação;
- o tempo requerido, em termos de ordenação para obtenção do desenho. Fato que aumenta quando existe a necessidade de realizar uma análise de sensibilidade, gerando múltiplos cenários em função de mudanças em variáveis como custos, preços, teor de corte, entre outras. Entretanto, ferramentas potentes de baixo custo estão chegando ao mercado e minimizado, notavelmente, este problema;
- dificuldade para incorporar alterações nos ângulos de taludes da cava;
- o critério de otimização é baseado no benefício total, enquanto deveria ser baseado no valor presente líquido. Este problema é comum na maior parte dos algoritmos de otimização existentes e tem uma solução difícil (PINTO & DUTRA, 2008).

4.4.2.1 Algoritmo Lerchs-Grossmann 3D

De acordo com Carmo, Curi e Souza (2006), matematicamente, a otimização de cava pode ser representada por um grafo $G = (V, A)$, estabelecido como o agrupamento de um conjunto V de elementos V_j ($j=1,2,...,n$) nomeados de nós de G , com um conjunto A de pares de

elementos de x , chamados de arcos ou de ramos do grafo.

A teoria dos grafos é uma parte importante do algoritmo Lerchs-Grossmann. O algoritmo utiliza uma representação gráfica da mina, onde cada nó do grafo representa um bloco tridimensional de minério, a cada nó é atribuído um “peso” B_i que representa o valor individual do bloco e as arestas representam as relações entre os blocos. Com base nos ramos estruturais e nos valores dos blocos, o algoritmo inicia a construção do grafo a partir da base da exploração. O grafo obtido é semelhante a uma árvore com diversos ramos, sendo que esses ramos são denominados fortes caso o resultado do valor dos blocos incluídos no mesmo seja positivo, já os ramos que possuem o valor total dos blocos negativos são considerados fracos (CARMO *et al* , 2006).

O algoritmo começa escolhendo um nó inicial e, em seguida, segue as arestas do grafo para encontrar o contorno ótimo da cava, ou seja, o fecho máximo em um grafo associado. Os ramos são criados e se unem ou se separam de acordo com as características dos arcos estruturais. O fluxo máximo seria obtido a partir da soma de todos os blocos de minério, porém não é possível somente a retirada desses blocos (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

O benefício (B) associado à lavra i é representado por B_i , e desse modo, o problema da otimização citado pode ser formulado como sendo a busca da combinatória de blocos que maximizam $\sum B_i$, respeitando as restrições pertinentes ao problema. O contorno que satisfaz as restrições geométricas impostas é representado por um fecho do grafo $G=(X,A)$ (PINTO & DUTRA, 2008).

Ademais, o algoritmo funciona através da determinação de uma solução ótima para uma função objetivo, geralmente a maximização do lucro, sujeita a restrições. Ele divide a mina em uma série de blocos tridimensionais, cada um representando uma porção do minério. O algoritmo então determina a ordem e a quantidade de minério a ser lavrada em cada bloco, a fim de maximizar o lucro. Ele também considera restrições como a capacidade de processamento, disponibilidade de equipamentos e acesso ao minério.

Segundo Khalokakie (1999), o algoritmo descrito pode ser demonstrado a partir de um simples exemplo bidimensional, ilustrado na Figura 4.5. O número pequeno na parte de cima do bloco é referente ao número do bloco e o número no centro do bloco faz referência ao valor que esse bloco possui. Além disso, o ângulo de talude considerado é de 45° e os blocos possuem o formato de um quadrado. Cada bloco da ilustração será representado por vértices na teoria dos grafos, e os vértices sucessores precisam ser removidos antes de um determinado bloco

ser lavrado.

1 -1	2 -1	3 +1	4 +1	5 -1	6 -1	7 -1
8 -2	9 +2	10 +1	11 -2	12 +3	13 -2	14 -2
15 -3	16 -3	17 +3	18 -3	19 +1	20 -3	21 -3

Figura 4.5: Modelo de Blocos exemplificativo.

Fonte: Khalokakaie (1999).

O procedimento é realizado a partir das seguintes etapas (KHALOKAKAIE, 1999):

1. Inicialmente, no primeiro nível, linha i , os arcos são adicionados partindo da raiz imaginária X_0 para todos os vértices da linha em questão;
2. Os arcos gerados são classificados em fortes ou fracos;
3. Caso não existam ocorrências em que vértices negativos estão sobrepostos aos vértices positivos, seguir para a etapa 5, porém, se um vértice fraco j está acima de um vértice forte k , é necessário que um arco (k,j) seja adicionado na árvore T_i e que o arco (X_0, T_i) seja substituído pelo arco (X_0, j) ;
4. Uma vez que a árvore T_i contenha algum arco positivo não conectado à raiz imaginária X_0 , é fundamental que a árvore seja normalizada e que a etapa 3 seja iniciada;
5. Os vértices fortes que fazem parte do fecho máximo são removidos e o procedimento é reiniciado na linha $i+1$.

A Figura 4.6 representa o sistema após as duas primeiras etapas, já as etapas 3 e 5 são demonstradas na Figura 4.7. Na Figura 4.8 é possível observar o recomeço das etapas 1 e 2 no segundo nível, já o resultado das etapas 3 e 4 são observadas na Figura 4.9. A última etapa consiste na remoção dos vértices fortes que fazem parte do fecho máximo. Quando as etapas são realizadas para todos os três níveis do modelo, o sistema final é obtido (Figura 4.10).

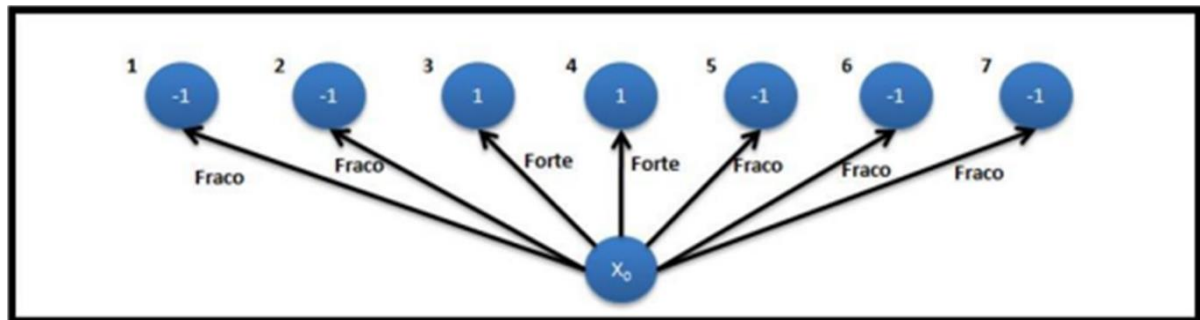


Figura 4.6: Configuração linha 1 após passo 2.

Fonte: Khalokakaie (1999 *apud* CAMPOS 2017).

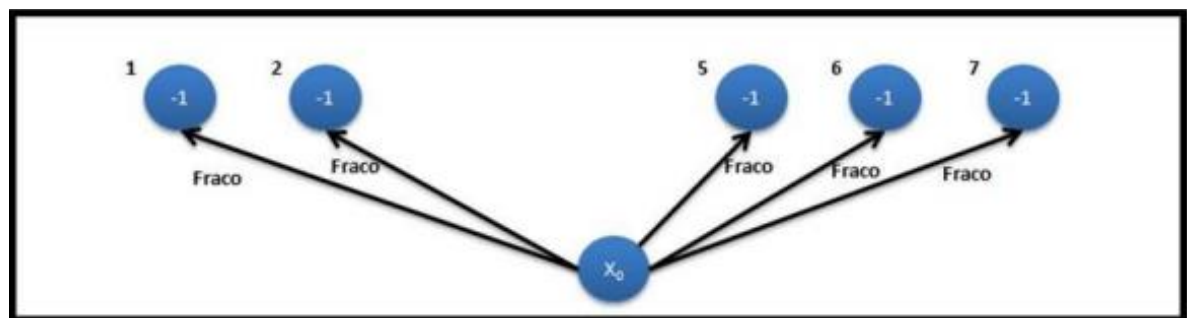


Figura 4.7: Configuração linha 1 após passo 5.

Fonte: Khalokakaie (1999 *apud* CAMPOS 2017).

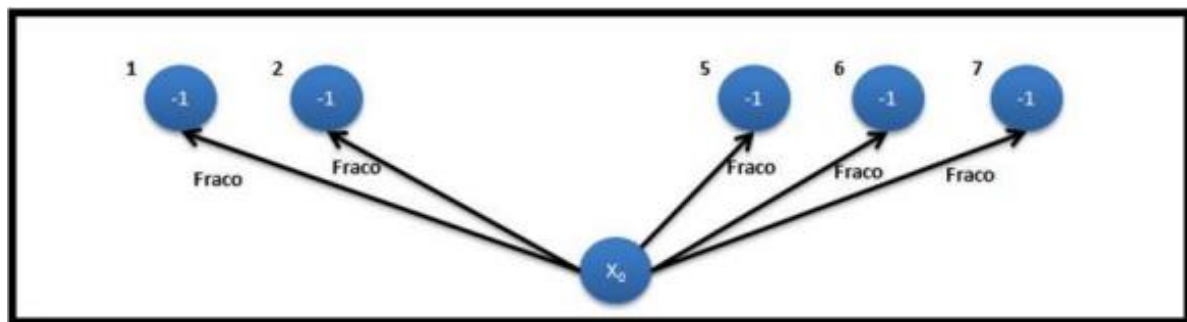


Figura 4.8: Configuração linha 2 após passo 2.

Fonte: Khalokakaie (1999 *apud* CAMPOS 2017).

de desconto, o preço da *commodity*, a superfície topográfica, os custos de processamento e de lavra, entre outros.

4. Otimização: O algoritmo utiliza técnicas de programação linear para encontrar a solução ótima para a função objetivo sujeita às restrições. Isso é feito através da resolução do sistema de equações lineares resultante.
5. Implementação: A solução encontrada é implementada e os resultados são analisados. Isso pode incluir a análise de parâmetros, como a capacidade de equipamentos, lucro e tempo de extração.

4.4.3 Teor de corte

Geralmente, o teor de corte é definido como a quantidade mínima de minério, que uma tonelada métrica (*i.e.*, 1000 kg) do material a ser lavrado precisa conter antes de ser direcionado para a planta de processamento. A definição do teor de corte é utilizada para distinguir o que é estéril do que é minério. O material definido como estéril, quando lavrado, geralmente é disposto em pilhas de estéril, enquanto o material definido como minério é direcionado para a usina (RENDU, 2014).

Ademais, segundo Rendu (2014), o teor de corte também pode ser utilizado nos seguintes cenários:

- para empreendimentos com uma alta complexidade geológica;
- em decisões sobre as possíveis rotas do minério lavrado quando dois ou mais processos estão disponíveis;
- em decisões a respeito de materiais lavrados que podem ser estocados para beneficiamento futuro ou para o beneficiamento imediato.

O cálculo do teor de corte é realizado a partir da comparação entre custos e lucros. Nos casos em que a geologia e a metalurgia do material são consideradas simples, apenas um número, como, por exemplo, o valor mínimo de metal contido, é suficiente para definir o teor de corte. Entretanto, em situações mais complexas, a qualidade do material que está sendo processado e a presença de deletérios são fatores que também precisam ser levados em consideração (RENDU, 2014).

Na maioria das minas a céu aberto, os teores de corte utilizados para desenvolver um plano de produção são calculados a partir do teor mínimo, obtido com base em uma análise econômica de equilíbrio, em que os custos de lavra e processamento do material são pagos, ou seja, a receita gerada a partir da venda do minério é igual ao custo associado para que ele seja lavrado (*i.e.*, *break-even*). A utilização desse teor nos planos de produção resulta em

sequenciamentos de lavra que maximizam o lucro não descontado (DAGDELEN, 2001).

Kenneth F. Lane, em 1964, propôs um algoritmo com o objetivo de determinar o teor de corte ótimo, que maximizasse o VPL (valor presente líquido) utilizando restrições do projeto referentes à lavra, moagem e capacidade da refinaria, já que utilizando só os fatores econômicos não seria garantido um teor de corte ótimo. Vários *softwares* foram elaborados a partir do algoritmo desenvolvido por Lane (DAGDELEN, 2001).

O teor de corte define a lucratividade e o tempo de vida útil de uma mineração. Quando esse teor possui valores altos, o VPL e o lucro de curto prazo aumentam, no entanto o tempo de vida útil do empreendimento diminui (RENDU, 2014).

Segundo Dagdelen (2001), a estratégia para se obter um teor de corte que resulta no alto valor presente líquido em um dado projeto, começa com um alto teor durante os anos iniciais. Porém, quando a vida útil do empreendimento diminui, o teor de corte também diminui gradualmente até se igualar ao *break-even*, teor em que o benefício final é zero, ou em alguns casos, se igualar ao teor marginal.

4.4.4 *Software Whittle*

O *Whittle™* 3D é um *software* de planejamento estratégico de lavra a céu aberto, renomado na indústria mineral, elaborado por Jeff Whittle em 1984. Usualmente é utilizado no planejamento de longo prazo para que a cava ótima, com o maior valor presente líquido (VPL), seja definida de acordo com todos os fluxos de caixa, incluindo as despesas de capital (WHITTLE, 2018).

O *software* foi pioneiro quanto à utilização do algoritmo proposto por Lerchs-Grossmann e revolucionou a otimização na indústria da mineração. Após o seu desenvolvimento, foi adquirido pela *Geovia* em 2001, antiga *GemCom Company*, e atualmente é disponibilizado pela *Dassault Systèmes*, empresa que o obteve em 2012. O algoritmo *Pseudoflow*, renomado pela rapidez na geração das cavas aninhadas mesmo para grandes conjuntos de dados, também está presente no *Whittle™*.

Ademais, o *software* é uma importante ferramenta no estudo de viabilidade de um projeto, na avaliação de oportunidades do projeto, em análises de sensibilidade, em análises de risco e no sequenciamento econômico de lavra de longo prazo. Ele leva em consideração a natureza do depósito, o *design* da cava, os custos operacionais e de processo e os fatores econômicos,

como por exemplo, o preço de venda das *commodities*.

O *WhittleTM* também pode ser utilizado na execução de múltiplos cenários, com o objetivo de se obter alternativas econômicas mais vantajosas, compreender as oportunidades e riscos, além de indicar os principais impulsionadores de valor para um projeto.

Desse modo, o *software* será utilizado para a execução dos cenários dimensionados a partir do planejamento de experimentos.

4.5 Valoração de projetos

Um método de valoração de projetos é necessário para que o planejamento estratégico possa ter prosseguimento. É essencial que o valor do projeto seja obtido, para que assim, mudanças que possam alterar o seu valor, tanto para melhor quanto para pior, possam ser mapeadas. Em uma economia de mercado é comum representar todos os projetos em termo do seu impacto, ou do seu potencial impacto, a partir de um fluxo de caixa. Obter o resultado de um fluxo de caixa dá uma medida de valor para um projeto, o que permite uma fácil comparação com todos os outros (WHITTLE *et al.*, 2005).

4.5.1 Métricas de avaliação de investimento sem risco

Algumas métricas de valoração de projetos, em que os riscos não estão associados, serão apresentadas a seguir.

4.5.1.1 Período de *payback*

O período de *payback* pode ser definido como o tempo, geralmente medido em anos, necessário para que o investimento inicial efetuado seja recuperado por meio de dividendos. De acordo com Rudenno (2012), esta é uma abordagem que possui um cálculo simples, porém, o valor do dinheiro no presente não é levado em consideração, além de que os ganhos e perdas de capital que podem ser obtidos no período também são ignorados.

O período de *payback* é determinado a partir da divisão do investimento inicial pela média dos fluxos de caixa futuros previstos por ano. Evidentemente, quanto menor for o tempo do período de *payback* necessário para que o investimento seja recuperado, melhor para o projeto.

O período de *payback* é um método simples e de fácil entendimento, mas pode ter limitações

em sua aplicação. Por exemplo, conforme citado anteriormente, ele não considera o valor presente dos fluxos de caixa futuros, nem o tempo após o período de *payback*. Além disso, ele não considera a taxa de desconto, o que pode levar a uma subestimação do valor real dos fluxos de caixa futuros. Desse modo, é importante utilizar outros métodos de avaliação de investimentos, como o valor presente líquido, para uma avaliação mais completa.

4.5.1.2 Valor presente líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) é um indicador de avaliação financeira, considerado sofisticado, que permite analisar a rentabilidade de um investimento. De acordo com Gitman (2010), o valor presente líquido é calculado a partir da subtração do investimento inicial de um projeto do valor presente de suas entradas de caixa, descontadas a uma taxa igual ao custo de capital da empresa, conforme apresentado na Equação (4.3) a seguir.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I \quad (4.3)$$

Onde,

FC_t = valor presente das entradas de caixa

r = taxa de custo de capital da empresa

I = investimento inicial

n = número de períodos do projeto

Se o VPL for positivo, o investimento é considerado rentável, pois o valor presente dos fluxos de caixa futuros é maior que o investimento inicial. Por outro lado, se o VPL for negativo, o investimento é considerado não rentável, uma vez que o valor presente dos fluxos de caixa futuros é menor que o investimento inicial. Em resumo, o VPL é uma ferramenta útil para a tomada de decisão em investimentos, ajudando a avaliar a rentabilidade esperada de um projeto ou investimento.

4.5.1.3 Taxa interna de retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) pode ser definida como a taxa de desconto que iguala o valor presente a zero quando aplicada em todos os fluxos de caixas de um projeto (RUNGE, 1998). É uma medida financeira usada para avaliar o desempenho econômico de um projeto ou investimento. Em outras palavras, a TIR representa a taxa de juros que equivale à

rentabilidade do projeto, considerando seus fluxos de caixa futuros descontados para o presente.

Segundo Gitman (2010), a TIR é matematicamente definida como o valor de "r" na Equação (4.4), tal que o Valor Presente Líquido (VPL) seja igual a zero.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I \quad (4.4)$$

Onde,

FC_t = valor presente das entradas de caixa

r = taxa interna de retorno

I = investimento inicial

n = número de períodos do projeto

A partir do cálculo realizado, caso a Taxa Interna de Retorno seja maior que o custo de capital, o projeto poderá ser aceito, entretanto, se a Taxa Interna de Retorno for menor que o custo de capital, é mais vantajoso que o projeto não seja aceito (GITMAN, 2010).

A TIR é amplamente utilizada por investidores e empresas como uma forma de comparar diferentes projetos ou investimentos e determinar qual é mais rentável. Ela é útil na decisão de investimento, e está intimamente relacionada ao VPL, pois permite ao investidor determinar se o retorno do investimento será suficientemente elevado para compensar o risco envolvido. Ademais, a TIR é uma medida independente do prazo de investimento, o que a torna uma ferramenta útil para comparações de projetos de diferentes durações.

Entretanto, a metodologia possui algumas desvantagens. A TIR pode resultar em decisões equivocadas na comparação entre projetos de investimento mutuamente exclusivos, e para fluxos de caixa atípicos, pode haver mais de uma taxa de desconto que resulte em um Valor Presente Líquido (VPL) igual a zero, para um determinado investimento.

4.5.1.4 Índice de rentabilidade (IR)

A decisão de prosseguir ou não com um investimento pode ser auxiliada pelo índice de rentabilidade. Tal índice é estabelecido a partir da divisão do valor presente dos fluxos de caixa futuros de um investimento pelo seu custo inicial, além do mais, também é denominado como quociente benefício custo ou VPL/VPI, onde o VPI representa o valor presente do

investimento (PESSOA, 2006).

Ademais, este método é um indicador financeiro que mede a eficiência de um investimento em relação ao capital investido. Ele permite a comparação entre investimentos diferentes, avaliando o retorno esperado em relação ao valor investido.

De acordo com Pessoa (2006), a partir do resultado obtido no cálculo do índice de rentabilidade, o administrador financeiro poderá tomar a decisão de aceitar ou não um projeto, adotando os seguintes critérios:

- Se o IR for > 1 , favorável a aceitação do projeto;
- Se o IR for < 1 , desfavorável a aceitação do projeto, pois o projeto apresenta um VPL negativo;
- Se o IR for $= 1$, indica em princípio que o projeto é considerado como atraente, pois remunera o acionista em sua taxa requerida de atratividade.

Em geral, o método de índice de rentabilidade é uma medida importante para avaliar o desempenho de um investimento em relação ao capital investido. Além disso, o método é simples e de fácil compreensão, pode ser útil quando os fundos disponíveis para investimento forem limitados e está intimamente relacionado com o VPL, que geralmente conduz a mesma decisão (PESSOA, 2006).

No entanto, ele deve ser utilizado como uma referência ao tomar decisões de investimento e não como uma medida exclusiva. Outros fatores, como risco e liquidez, também devem ser considerados ao avaliar a viabilidade de um investimento.

4.5.2 Método do fluxo de caixa descontado

Para a valoração de projetos, incluindo projetos de mineração, o método mais utilizado é o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), uma vez que o valor de um projeto depende dos benefícios futuros que ele irá produzir. Esse método tem como premissa a variação do valor do dinheiro no tempo. Além do mais, é possível estabelecer que o valor de um ativo é o somatório dos valores presentes dos seus fluxos de caixa futuros (previstos) (GALDI *et al.*, 2008).

A aplicação de uma taxa de desconto é o que diferencia o fluxo de caixa descontado de uma simples análise de fluxo de caixa (WHITTLE, 2005). A inflação e a taxa de desconto apropriadas e que reflitam os riscos inerentes aos fluxos estimados, são alguns dos fatores responsáveis pela alteração no fluxo de caixa futuro em relação ao atual (ENDLER, 2004).

O fato de a contabilização do risco nesse método ser realizada a partir de um mecanismo rudimentar, a dificuldade de previsão de impostos futuros como, por exemplo, os passivos fiscais, além da limitação em se adaptar a futuras mudanças à medida que ocorrem, são algumas das desvantagens do método (WHITTLE, 2005).

Entretanto, de acordo com Pessoa (2006), para a literatura de finanças tradicional, entre os métodos do FCD, o método do valor presente dos fluxos de caixa, em que são consideradas as relações entre os riscos, incertezas, investimentos e custos de capital, é o mais utilizado e apontado como o mais apropriado para a avaliação de investimentos de capital.

O resultado do fluxo de caixa descontado é obtido a partir dos seguintes passos:

1. cálculo do fluxo de caixa esperado do projeto para cada período futuro;
2. aplicação de uma taxa de desconto a cada fluxo de caixa futuro para refletir o valor presente;
3. somatório dos fluxos de caixa descontados para obter o fluxo de caixa descontado total do projeto.

Segundo Endler (2004), o cálculo utilizado para a avaliação pelo método do fluxo de caixa descontado é determinado pela Equação (4.5) a seguir:

$$VPFC = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (4.5)$$

Sendo:

VPFC = Valor Presente dos Fluxos de Caixa

n = Vida útil do empreendimento mineiro (neste caso)

r = Taxa de desconto

FCt = Fluxo de caixa no período t

O fluxo de caixa descontado total é então comparado com o investimento inicial do projeto para determinar se o projeto é financeiramente viável. Se o fluxo de caixa descontado total for maior que o investimento inicial, o projeto é considerado rentável, caso contrário, o projeto é considerado não rentável.

O método do fluxo de caixa descontado é amplamente utilizado por acionistas para avaliar o

retorno de um investimento, e geralmente é expresso em termos de Valor Presente Líquido (VPL) (PERONI, 2002). Peroni (2002) afirma que, normalmente, o VPL de um projeto é mais sensível aos seguintes parâmetros:

- preço do produto;
- taxa de desconto;
- sequência temporal do cronograma de extração dos blocos de lavra;
- custos de produção.

É importante notar que, como a taxa de desconto é aplicada a fluxos de caixa futuros, os projetos com fluxos de caixa futuros previsíveis e consistentes tendem a se sair melhor na avaliação do fluxo de caixa descontado. Além disso, avaliar a sensibilidade da taxa de desconto é importante para avaliar a precisão da análise.

4.5.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma abordagem que visa avaliar como o desempenho financeiro do projeto pode ser afetado por mudanças em suas variáveis mais importantes. O objetivo da análise de sensibilidade é identificar quais variáveis são cruciais para o sucesso do projeto e o quanto elas podem influenciar o resultado.

É uma abordagem de avaliação de risco, ou seja, permite quantificar a variação de um resultado econômico, medido pelas metodologias de avaliação econômica (VPL, TIR etc.), de um investimento devido a alterações em variáveis estimadas do fluxo de caixa (PESSOA, 2006).

Para realizar a análise de sensibilidade, é preciso desenvolver uma metodologia que inclua as principais variáveis e hipóteses do projeto, como os custos de produção, o teor do minério, o preço de venda dos produtos, os investimentos necessários, os custos envolvidos, entre outros. Em seguida, é preciso testar a metodologia com diferentes cenários, alterando as variáveis de forma a simular diferentes condições e avaliar o impacto dessas mudanças no resultado.

A análise de sensibilidade pode ser realizada de forma manual, alterando as variáveis do modelo econômico e recalculando o resultado, ou pode ser feita com o auxílio de ferramentas de análise de dados, como o *Microsoft Excel* e o *Minitab*.

4.6 Estimativas de custos

A estimativa de custo em projetos de mineração é uma atividade fundamental para o sucesso do empreendimento, pois permite identificar e avaliar os investimentos necessários para a sua execução e, conseqüentemente, determinar a viabilidade econômica do projeto.

Uma estimativa precisa e realista do fluxo de receitas de uma mina é um fator crítico na análise de sua viabilidade econômica. Esta etapa é incorporada na avaliação de projetos para iniciativas novas ou de expansão. Ademais, é necessário ter compreensão sobre a natureza dos mercados minerais relevantes e seus processos comerciais associados (AUSIMM, 2012).

Para alcançar sucesso operacional, é imprescindível ter conhecimento de conceitos essenciais na intersecção entre a ciência do processamento mineral e o aspecto comercial, incluindo questões como a eficiência de recuperação da planta de processamento e a qualidade do produto, enquanto os preços do produto, as condições comerciais de venda e os custos de transporte para colocar o produto no mercado representam os principais indicadores econômicos-chave (AUSIMM, 2012).

Os projetos de mineração possuem diferentes custos associados e distintos modos em que esses custos podem ser reportados. Os custos de capital, os custos operacionais e os custos gerais e administrativos, são as três categorias mais utilizadas para reportar esses custos e normalmente são traduzidas em custos do proprietário, custos de produção e custos gerais e administrativos, respectivamente (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

Os custos de capital referem-se aos custos de investimento da mina e da planta de beneficiamento. Incluem os custos com equipamentos, infraestrutura, engenharia, construção, licenças, estudos de viabilidade e outros gastos pré-operacionais.

Os custos operacionais refletem os custos das operações unitárias de perfuração, desmonte, carregamento e transporte, por exemplo, expressos por tonelada (HUSTRULID; KUCHTA, 1995). São custos que variam conforme o tipo de minério, a complexidade das operações, as tecnologias utilizadas e as regulamentações locais.

Entretanto, os custos gerais e administrativos podem ser expressos por ano e podem incluir, por exemplo, royalties federais, benefícios dos colaboradores, seguros, depreciação da planta, serviços administrativos, serviços jurídicos, consultoria, serviços financeiros e pesquisa de desenvolvimento (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

A estimativa de custos é apropriada para fins de tomada de decisão, permitindo tanto o avanço do projeto para a próxima fase quanto a interrupção do mesmo para minimizar as perdas (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

Existem diversos métodos para realizar a estimativa de custos, que variam de acordo com a fase do projeto e com as características específicas da operação. Métodos como a análise comparativa, em que os custos são comparados com projetos anteriores considerando a similaridade entre eles, e a estimativa paramétrica, em que os custos são derivados de algoritmos gerais e modelos matemáticos, são exemplos representativos.

Os custos que serão utilizados para a realização da presente pesquisa são provenientes da estimativa detalhada. Nessa metodologia, cada atividade necessária para a realização da operação é analisada em detalhes, a fim de se obter uma estimativa precisa do tempo e dos recursos necessários para executá-la.

Na primeira etapa do método da estimativa detalhada, é elaborado um plano discriminado das atividades da operação, incluindo uma análise minuciosa dos recursos necessários para cada atividade. Na segunda etapa, são estimados os custos associados a cada atividade, levando em consideração os recursos necessários e as taxas de custo.

4.6.1 Custos de capital

Os custos de capital (*i.e.*, *capital expenditures* (CAPEX)) em projetos de mineração, são referentes aos investimentos necessários para a implementação e desenvolvimento de um empreendimento mineiro, tais como os custos para que lavra tenha início e para a instalação da planta de processamento (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

Além do mais, segundo Rudenno (2010), o CAPEX necessário para desenvolver uma mina depende de uma série de fatores. Entre os fatores necessários estão:

- o tipo do minério;
- o método de lavra;
- a infraestrutura existente;
- suprimentos de água e de energia;
- a topografia do terreno e a disponibilidade de áreas para as instalações de mina e para a disposição de estéril e/ ou rejeito;

- o clima do local, o impacto de chuvas, neve, umidade e temperatura.

Desse modo, é possível afirmar que é uma etapa importante, que demanda informações adequadas e detalhadas sobre um depósito particular. Normalmente essas informações não estão disponíveis no mercado e valores aproximados ou estimativas empíricas são utilizados para atribuir alguns valores em um projeto (RUDENNO, 2010). Caso o escopo do projeto seja alterado em algum momento, em teoria, um novo CAPEX deveria ser calculado com a finalidade de gerar um novo NPV para que o projeto seja aprovado novamente (SILVA, 2008).

Geralmente, o custo de capital final de um projeto é diferente do custo obtido a partir do estudo de viabilidade. Tal fato acontece por vários motivos, como por exemplo, o redesenho das cavas, alterações no processamento do minério, mudança no escopo, cotações não confirmadas para equipamentos e serviços, variações no dimensionamento de frota, e até mesmo fraude em compras e/ou falta de controle durante a implantação do empreendimento (SILVA, 2008).

Ademais, incluir uma reserva para o capital de giro na contabilização dos custos de capital é crucial, pois ele representa o custo operacional inicial que será necessário antes da receita ser obtida ou em caso de insuficiência de receitas para cobrir os custos. Assim, o capital de giro cria uma diferença temporal entre os gastos e a receita, que pode variar ao longo do tempo de vida do projeto. Ao final do ciclo de vida do projeto, o capital de giro será restituído aos investidores ou ao banco (RUDENNO, 2012).

Portanto, o controle do CAPEX é fundamental para garantir que os projetos de mineração sejam executados dentro do orçamento previsto, além de garantir a rentabilidade do projeto a longo prazo. Desse modo, é importante avaliar cuidadosamente os custos de capital, a fim de minimizar desperdícios e maximizar o retorno sobre o investimento. Ademais, é uma parte crítica da gestão financeira de projetos de mineração e requer uma análise cuidadosa dos custos de capital para garantir a viabilidade financeira a longo prazo.

4.6.2 Custos operacionais

Para que os custos operacionais (*i.e.*, *operating expenditures* (OPEX)) sejam estimados, a localização do empreendimento, o método de lavra, o método de beneficiamento, além da escala de produção precisam ser definidos, visto que são fatores essenciais.

O OPEX é composto por custos referentes às atividades diárias, executadas para que a lavra

e o processamento da *commodity* em questão sejam realizados (RUDENNO, 2012). Estes custos podem incluir, por exemplo:

- o consumo de materiais para a realização da perfuração e desmonte;
- o consumo de combustível utilizado pelos equipamentos de carregamento e transporte;
- a manutenção e reparo dos equipamentos;
- a mão de obra;
- a energia necessária para o funcionamento do empreendimento.

Além do mais, o custo obtido em contratos com empresas terceirizadas também faz parte da contabilização dos custos operacionais (RUDENNO, 2012).

Os custos operacionais podem ser considerados variáveis ou fixos. Os custos de transporte e os custos com materiais para a perfuração e desmonte são exemplos de custos variáveis, ou seja, podem ser alterados com a variação da tonelada de material lavrado ou tratado.

Entretanto, os custos fixos são aqueles que não variam com mudanças na lavra e no beneficiamento, como por exemplo, os salários dos colaboradores. Normalmente os custos operacionais são expressos em tonelada lavrada ou processada, ou em uma unidade do produto (RUDENNO, 2012).

4.7 Avaliação econômica

A avaliação econômica do projeto é realizada com base nos estudos de viabilidade. Essa etapa tem como objetivo determinar a viabilidade financeira do projeto, ou seja, verificar se o projeto pode gerar retornos financeiros satisfatórios que justifiquem o investimento. É um processo rigoroso que envolve a identificação de todos os custos, receitas, taxas e impostos associados ao projeto, assim como a avaliação dos riscos e incertezas envolvidos.

Primeiramente, é realizada a estimativa dos custos de capital e dos custos operacionais, incluindo gastos com equipamentos, instalações, mão de obra, materiais, além de outros gastos relacionados ao projeto. A análise de sensibilidade pode ser usada para avaliar como mudanças nas variáveis estimadas afetarão os resultados financeiros.

Após a estimativa dos custos e receitas, é realizada a análise de viabilidade financeira, que compara os resultados financeiros esperados com os investimentos requeridos. As métricas financeiras comuns incluem o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR)

e o período de *Payback*.

Em resumo, a avaliação econômica em projetos de mineração é uma parte crítica da avaliação de projetos, que determina a viabilidade financeira do projeto e fornece uma base para tomar decisões informadas sobre investimentos. É um processo rigoroso que requer uma estimativa precisa dos custos e receitas, uma avaliação cuidadosa dos riscos e incertezas e uma comparação dos resultados financeiros com os investimentos requeridos.

4.8 Simulação

A simulação pode ser usada para testar uma ampla variedade de cenários em um curto período, o que permite avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições. Isso pode levar a um melhor entendimento do processo e à identificação de possíveis melhorias no projeto.

Ademais, a simulação pode ser usada para avaliar a robustez dos resultados de um experimento, permitindo a possibilidade de determinar se os resultados obtidos em um experimento real são confiáveis e se podem ser generalizados para outras situações.

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram realizadas simulações de diferentes cenários, dimensionados a partir da metodologia do *planejamento* de experimentos.

4.8.1 Planejamento de experimentos para o planejamento robusto

O planejamento de experimentos (*i.e.*, *Design of experiments* (DOE)) é uma metodologia estatística que visa planejar, conduzir e analisar experimentos de forma eficiente e eficaz, permitindo a melhoria e a otimização de processos e a redução dos custos gerais. Além do mais, é uma metodologia amplamente utilizada para desenvolver processos robustos, com o intuito de reduzir os impactos de fontes externas de variabilidade, ou seja, reduzir a variabilidade do processo (FAROOQ *et al.*, 2016).

De acordo com Montgomery *et al.* (2000), os objetivos dos experimentos são:

- determinar quais variáveis possuem maior influência na resposta do sistema;
- determinar onde são definidos os fatores controláveis significativos, que podem ser ajustados e mantidos em condições específicas, para assegurar que as respostas

obtidas estejam próximas ao seu valor alvo;

- determinar onde os fatores controláveis significativos são definidos para assegurar que os efeitos de variáveis incontroláveis no(s) resultado(s) sejam mínimos.

Ademais, a abordagem de investigar as características de um sistema, de modo a identificar quais fatores afetam o processo, possui a capacidade de auxiliar de forma satisfatória a redução do uso de dados, uma vez que o número de testes necessários para que as análises sejam realizadas reduz drasticamente. Dessa forma, além da redução do uso de dados, são economizados principalmente o tempo e os custos necessários para a realização dos estudos (MALIAKAL, 2007).

A Figura 4.11 representa um guia, com oito passos, para *designs* de experimentos. O DOE é constituído a partir de três importantes fases:

1. planejamento pré-experimental;
2. execução dos experimentos;
3. análise estatística dos dados obtidos e recomendações.

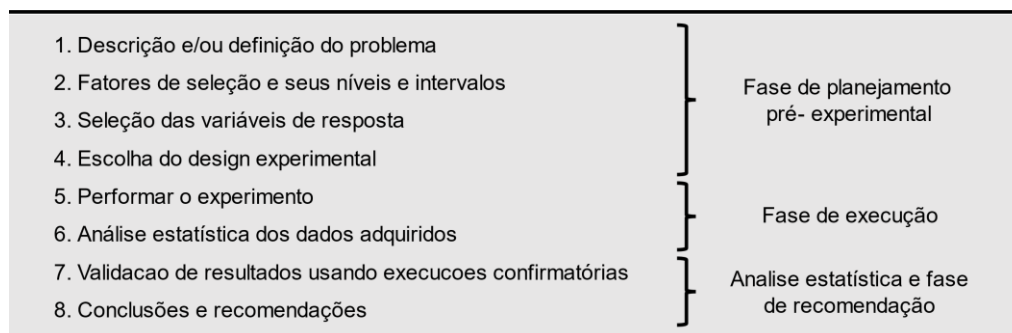


Figura 4.11:Guia de *designs* de experimentos.

Fonte: Adaptado de Farooq *et al.* (2014).

Conforme ilustrado, o DOE tem início com a definição do processo, ou sistema, e com a identificação do problema que será analisado. A função objetivo e o conjunto de experimentos a serem realizados são denominados, respectivamente, de variáveis de resposta e espaço amostral. Ao final da fase do planejamento pré-experimental espera-se que os objetivos do experimento estejam estabelecidos, as variáveis de resposta estejam selecionadas e os fatores e seus níveis e intervalos requeridos estejam claramente definidos (FAROOQ *et al.*, 2016).

É necessário que uma região de interesse, ou espaço amostral, seja definida, isto é, uma faixa de variação que deve ser estabelecida para cada variável selecionada. A técnica utilizada no planejamento de experimentos e o número de níveis são selecionados de acordo com o número de experimentos que podem ser executados. O termo “nível” é utilizado para fazer uma referência aos diferentes valores que uma variável assume, de acordo com a sua discretização. Normalmente o número de níveis é o mesmo para todas as variáveis. (CAVAZZUTI, 2013).

Algumas abordagens utilizadas para facilitar a definição dos fatores e seus níveis e intervalos são: o diagrama de Pareto e a matriz de não conformidade. Essas análises auxiliam na listagem dos fatores controláveis, incontroláveis e os fatores de ruídos que afetam o processo, contribuindo para a redução do número de fatores e simplificando o DOE (FAROOQ *et al.*, 2016).

Dentre as técnicas utilizadas para a realização do planejamento de experimentos, as mais relevantes para o projeto em questão foram o planejamento fatorial completo (*i.e.*, *Full Factorial*) e o planejamento fatorial fracionado (*i.e.*, *Fractional Factorial*), detalhadas no item 4.2.1.1.

Para selecionar a melhor técnica para realizar o planejamento de experimentos, fatores como o tempo disponível para os experimentos, o recurso financeiro, o objetivo desejado e o número de fatores do experimento são relevantes.

A segunda fase (Figura 4.11) abrange a execução do experimento de acordo com a matriz projetada e com a coleta de dados. A terceira e última fase inclui a análise de dados realizada por meio de ferramentas estatísticas, como por exemplo, análise de variância (ANOVA) e outros métodos estatísticos associados, e a interpretação dos resultados, conduzindo a uma melhor compreensão do comportamento do sistema ou sua otimização (JANKOVIC *et al.*, 2021).

A análise de variância (*i.e.*, *Analysis of Variance* (ANOVA)), citada anteriormente, é uma ferramenta estatística utilizada para determinar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos de dados. A técnica especifica se as diferenças existentes entre os grupos estudados existem devido à aleatoriedade ou podem ser atribuídas a alguma causa (JANKOVIC *et al.*, 2021).

No DOE, as amostras representam uma série de execuções determinadas com base em um planejamento. Entretanto, os grupos de uma amostra são um conjunto de execuções

associadas com um nível, fator ou interação particular (JANKOVIC *et al.*, 2021). A ANOVA avalia a variação total nos dados, decompondo-a em componentes atribuíveis à variação entre os grupos e à variação dentro dos grupos.

A ANOVA envolve a comparação da variância entre os grupos com a variância dentro dos grupos. Se a variância entre os grupos for significativamente maior do que a variância dentro dos grupos, isso indica que há diferenças significativas entre as médias dos grupos. Caso contrário, se a variância dentro dos grupos for maior, não há diferenças significativas entre as médias dos grupos.

A análise de regressão (*i.e.*, *Response Surface Methodology* (RSM)) é outra técnica que pode ser empregada, posteriormente à execução dos cenários, para analisar os resultados obtidos. Diferente da ANOVA, a análise de regressão é uma metodologia não-linear que utiliza uma equação de regressão, geralmente a partir do método dos mínimos quadrados, para modelar a relação entre as variáveis do processo e a variável resposta. O coeficiente de determinação obtido indica o quanto a regressão estimada explica a variância da variável de resposta (JANKOVIC *et al.*, 2021).

Por fim, constata-se que as técnicas de planejamento de experimentos têm sido empregadas em conjunto com a simulação de desempenho para investigar diversas problemáticas distintas. Uma vez que permite a variação de mais de um fator simultaneamente, possibilita a determinação dos efeitos de interação, bem como fornece mais informações sobre os efeitos principais (RANGA *et al.*, 2014). As vantagens de experimentos bem planejados incluem:

- obtenção de mais informações por experimento, redução do tempo necessário para a execução e melhoria da eficácia;
- organização e aprovação facilitadas;
- confiança nas informações obtidas;
- capacidade de avaliar as interações e obter previsões mais confiáveis.

4.8.1.1 Planejamento fatorial completo

O planejamento fatorial é uma técnica de experimentação empregada na engenharia para avaliar o efeito simultâneo de múltiplos fatores em um processo ou sistema. Essa técnica é realizada por meio do uso de experimentos que variam os níveis de um ou mais fatores ao mesmo tempo, de forma que seus efeitos possam ser avaliados de forma conjunta e individual.

O planejamento fatorial completo provavelmente é a técnica do DOE mais comum e intuitiva. Em sua forma mais simples, o planejamento fatorial completo de dois níveis, é composto por k fatores, com cada fator tendo $L = 2$ níveis. As amostras são obtidas a partir de todas as combinações possíveis dos valores dos fatores. Dessa forma, o tamanho total da amostra é igual a $N = 2^k$ (CAVAZZUTI, 2013).

Os dois níveis são identificados como "alto" ("h") e "baixo" ("l"), ou "+1" e "-1". Partindo de qualquer amostra dentro do esquema fatorial completo, as amostras em que os fatores são alterados individualmente ainda fazem parte do espaço amostral. Essa propriedade evita que o efeito de cada fator sobre a variável de resposta seja confundido com outros fatores (CAVAZZUTI, 2013).

Ainda de acordo com Cavazzuti (2013), é possível observar na Tabela 4.2 um planejamento fatorial completo com três fatores e dois níveis por fator.

Tabela 4.2: Exemplo do *design* experimental do fatorial completo de 2^3 .

Número do experimento	Nível do Fator			Variável Responsável	Interações de 2 e 3 fatores			
	X_1	X_2	X_3		$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$
1	-1 (l)	-1 (l)	-1 (l)	$y_{l,l,l}$	+1	+1	+1	-1
2	-1 (l)	-1 (l)	+1 (h)	$y_{l,l,h}$	+1	-1	-1	+1
3	-1 (l)	+1 (h)	-1 (l)	$y_{l,h,l}$	-1	+1	-1	+1
4	-1 (l)	+1 (h)	+1 (h)	$y_{l,h,h}$	-1	-1	+1	-1
5	+1 (h)	-1 (l)	-1 (l)	$y_{h,l,l}$	-1	-1	+1	+1
6	+1 (h)	-1 (l)	+1 (h)	$y_{h,l,h}$	-1	+1	-1	-1
7	+1 (h)	+1 (h)	-1 (l)	$y_{h,h,l}$	+1	-1	-1	-1
8	+1 (h)	+1 (h)	+1 (h)	$y_{h,h,h}$	+1	+1	+1	+1

Fonte: Adaptado de Cavazzuti (2013).

O planejamento fatorial completo é um método de *design* experimental ortogonal. O termo "ortogonal" deriva do fato de que o produto escalar das colunas de quaisquer dois fatores é igual a zero. A interação principal M de uma variável X é definida como a diferença entre a média da variável de resposta nas amostras de nível alto e a média da variável de resposta nas amostras de nível baixo. No exemplo apresentado na Tabela 4.2, para a variável X_1 , tem-se que (Equação (4.6)):

$$M_{x1} = \frac{y_{h,l,l} + y_{h,l,h} + y_{h,h,l} + y_{h,h,h}}{4} - \frac{y_{l,l,l} + y_{l,l,h} + y_{l,h,l} + y_{l,h,h}}{4} \quad (4.6)$$

Podem ser obtidas expressões semelhantes para M_{x2} e M_{x3} . O efeito de interação de dois ou mais fatores é definido de maneira similar à diferença entre as médias de resposta nos níveis alto e baixo na coluna de interação. O efeito de interação de dois fatores entre X_1 e X_2 ,

conforme apresentado na Tabela 4.2, é dado por (Equação (4.7)):

$$M_{x1,x2} = \frac{y_{l,l,l} + y_{l,l,h} + y_{h,h,l} + y_{h,h,h}}{4} - \frac{y_{h,l,l} + y_{h,l,h} + y_{l,h,l} + y_{l,h,h}}{4} \quad (4.7)$$

O planejamento em questão considera os efeitos de todos os fatores (efeitos principais) e suas interações, tornando-o uma ferramenta poderosa e que fornece uma visão mais abrangente do comportamento do sistema, em comparação com outros *designs* experimentais. Se todos os k fatores tiverem o mesmo número de níveis n , o número total de experimentos é igual a n^k . O aumento do número de fatores e níveis resulta em um enorme aumento no número de experimentos (FAROOQ *et al.*, 2016).

Desse modo, o planejamento fatorial completo consiste em testar todos os possíveis níveis de todos os fatores em estudo, em todas as combinações possíveis, gerando assim um número completo de ensaios. Isso permite avaliar os efeitos principais dos fatores e suas interações, o que pode fornecer informações detalhadas sobre a relação entre os fatores. Porém, esse método pode ser caro e demorado, devido ao grande número de ensaios requeridos.

Além do mais, de acordo com Ranga *et al.* (2014), conforme observado na Tabela 4.3, quando o número de fatores é igual ou superior a cinco, o número de experimentos necessários é alto, o que não é muito eficiente.

Tabela 4.3: Número de execuções para o planejamento fatorial completo.

Número de fatores	Número de execuções
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64

Fonte: Adaptado de Ranga *et al.* (2014).

4.8.1.2 Planejamento fatorial fracionado

O planejamento fatorial fracionado é um método de experimentação que tem como objetivo reduzir o número de combinações necessárias em um planejamento fatorial completo, mantendo a capacidade de avaliar a influência dos fatores principais e suas interações. Isso

é proporcionado através da seleção de uma fração dos níveis de cada fator.

Este planejamento pode ter um tamanho de amostra igual à metade, um quarto, ou outras frações do tamanho de amostra do planejamento fatorial completo. Para que o planejamento fatorial fracionado funcione corretamente, é importante escolher amostras balanceadas e ortogonais. O balanceamento significa que o espaço de amostra deve ser criado de tal forma que cada fator tenha o mesmo número de amostras para cada um dos seus níveis (CAVAZZUTI, 2013).

Existem diferentes tipos de planejamentos fatoriais fracionados, com base na fração selecionada. A técnica do planejamento fatorial fracionado 2^{k-p} (onde k é o número de fatores de controle do experimento e p é o número de colunas inseridas na matriz experimental) é uma técnica altamente aplicável em diferentes processos, uma vez que permite a análise da influência de muitos fatores com uma quantidade reduzida de ensaios (ARANDA *et al.*, 2007).

Por exemplo, em um planejamento fatorial completo com 4 fatores, cada um com 2 níveis, seriam obtidas um total de 16 combinações experimentais. No entanto, com a utilização da metodologia do planejamento fatorial fracionado $2^{(4-1)}$, selecionando um fator para ser avaliado em todos os níveis, seriam obtidas apenas 8 combinações experimentais.

A Tabela 4.4 apresenta um exemplo de um planejamento $2^{(6-2)}$, incluindo a avaliação de sua resolução e a lista das aliases correspondentes aos principais efeitos e interações de dois fatores (CAVAZZUTI, 2013).

Tabela 4.4: Exemplo do *design* experimental do fatorial fracionado de 2^{6-2} .

<i>Design</i> 2^{6-2}	Alias de efeito principal			Alias de interação de dois fatores		
Palavras de definição	$A = BCE = ABCDF = DEF$ $B = ACE = CDF = ABDEF$			$AB = CE = ACDF = BDEF$ $AC = BE = ABDF = CDEF$		
$I = ABCE$	$C = ABE = BDF = ACDEF$			$AD = EF = BCDE = ABCF$		
$I = BCDF$	$D = ABCDE = BCF = AEF$			$AE = BC = DF = ABCDEF$		
$I = ADEF$	$E = ABC = BCDEF = ADF$			$AF = DE = BDEF = ABCD$		
Resolução	$F = ABCEF = BCD = ADE$			$BD = CF = ACDE = ABEF$		
IV				$BF = CD = ACEF = ABDE$		
Número do experimento	Nível do fator					
	$X_1(A)$	$X_2(B)$	$X_3(C)$	$X_4(D)$	$X_5(E)$	$X_6(F)$
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1	-1	+1
3	-1	-1	+1	-1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	+1	-1
5	-1	+1	-1	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1
8	-1	+1	+1	+1	-1	+1
9	+1	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1	+1
11	+1	-1	+1	-1	-1	+1
12	+1	-1	+1	+1	-1	-1
13	+1	+1	-1	-1	-1	+1
14	+1	+1	-1	+1	-1	-1
15	+1	+1	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Fonte: Adaptado de Cavazzuti (2013).

Em um planejamento fatorial, aliases são combinações que produzem o mesmo efeito na resposta do experimento. Essas combinações podem surgir quando um experimento é projetado com um número limitado de testes. Se duas ou mais combinações de efeitos geram o mesmo resultado na resposta, elas são consideradas aliases.

O planejamento fatorial fracionado é útil quando o número total de combinações experimentais é muito grande, tornando impraticável a realização de um experimento completo, ou quando o custo ou o tempo para realizar o experimento completo é muito elevado. No entanto, é importante ressaltar que o planejamento fatorial fracionado tem algumas limitações, como a perda da capacidade de avaliar o efeito de alguns fatores em determinados níveis, ou a impossibilidade de avaliar alguns efeitos de interação. Por isso, é importante selecionar cuidadosamente os fatores que serão avaliados em todos os níveis e escolher a fração adequada para cada experimento específico.

Dessa forma, é possível concluir que o planejamento fatorial completo é um método detalhado para análise dos fatores e suas interações, enquanto o planejamento fatorial fracionado é uma

técnica mais eficiente e precisa para avaliação de múltiplos fatores com menos ensaios experimentais. A escolha entre esses métodos depende dos recursos e objetivos do estudo.

5. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo da dissertação, foi realizada uma comparação entre os resultados de um projeto de mineração, utilizando os dados obtidos a partir da abordagem do planejamento de lavra convencional e da abordagem do planejamento de lavra robusto. Os resultados foram adquiridos a partir da análise de dados de um projeto de lítio em um depósito de rochas pegmatíticas no estado de Minas Gerais. É importante citar que nessa dissertação não é objeto de estudo o desenvolvimento de simulações de modelos estocásticos representando recursos minerais.

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma simplificado das etapas do projeto desenvolvido.

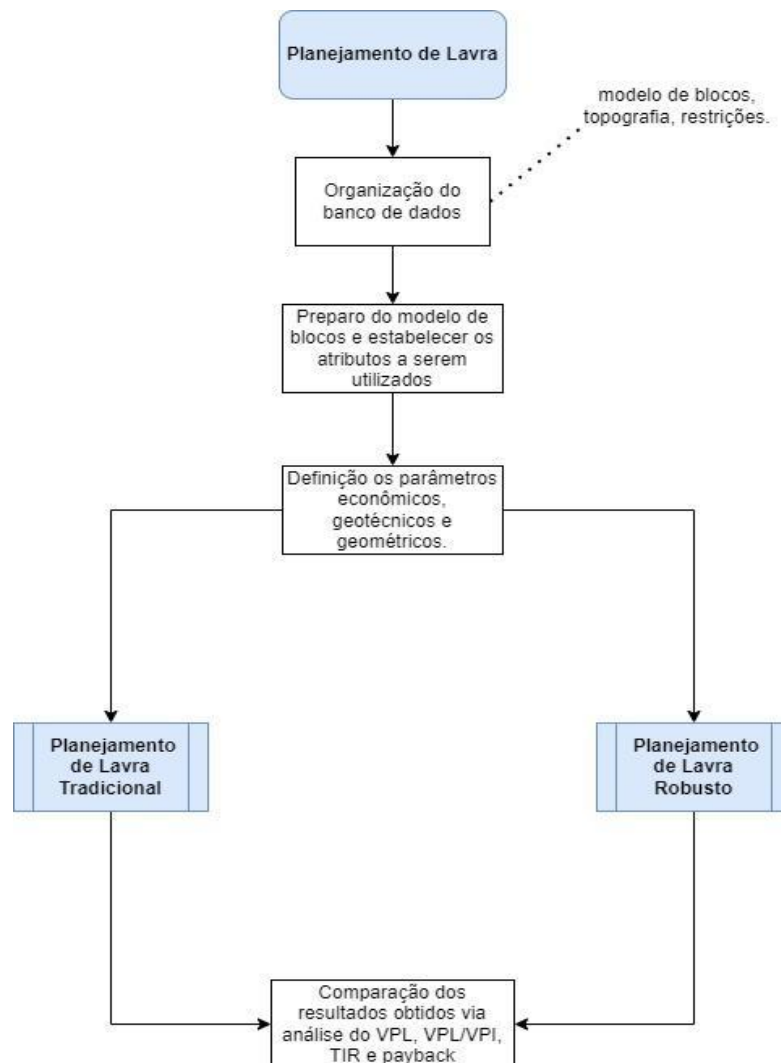


Figura 5.1: Fluxograma simplificado das etapas do projeto.

Fonte: Contribuição do autor.

Inicialmente, foram realizados a validação e o preparo do banco de dados utilizado. Elementos como modelo de blocos, topografia do terreno e parâmetros econômicos, geométricos e geotécnicos foram os principais componentes do banco de dados adotado. Logo após o preparo do banco de dados, foi realizado o processo de planejamento de lavra, utilizando tanto a metodologia clássica quanto a robusta, sendo que para a última foi efetuado um planejamento de experimentos.

A etapa do planejamento de lavra, em ambas as metodologias, contemplou a otimização das cavas, o sequenciamento de lavra, a obtenção anual dos custos de capital e dos custos operacionais, além da análise econômica, que foi responsável por gerar os resultados para cada metodologia.

A comparação dos resultados obtidos foi realizada a partir da obtenção dos seguintes valores, de cada projeto, no passo da análise econômica:

- valor presente líquido (VPL);
- taxa interna de retorno (TIR);
- valor presente líquido pelo valor presente do investimento (VPL/VPI);
- período de *payback*.

O *software GEOVIA Whittle* foi utilizado na etapa da otimização dos limites das cavas ótimas. Outro *software* utilizado foi o *software* estatístico *Minitab*, para o planejamento de experimentos elaborado na etapa do planejamento robusto.

5.1 Modelo de blocos

O modelo de blocos disponibilizado para utilização neste trabalho representa uma mina de lítio no estado de Minas Gerais. O método de estimativa utilizado no modelo foi o da krigagem ordinária e tal modelo apresenta atributos com dados referentes à localização, densidade, teor de Li_2O , classificação de recurso, litologias, diluição e geotecnia.

Nas figuras seguintes, Figura 5.2 a Figura 5.5, é possível observar o modelo de blocos do corpo mineralizado utilizado.

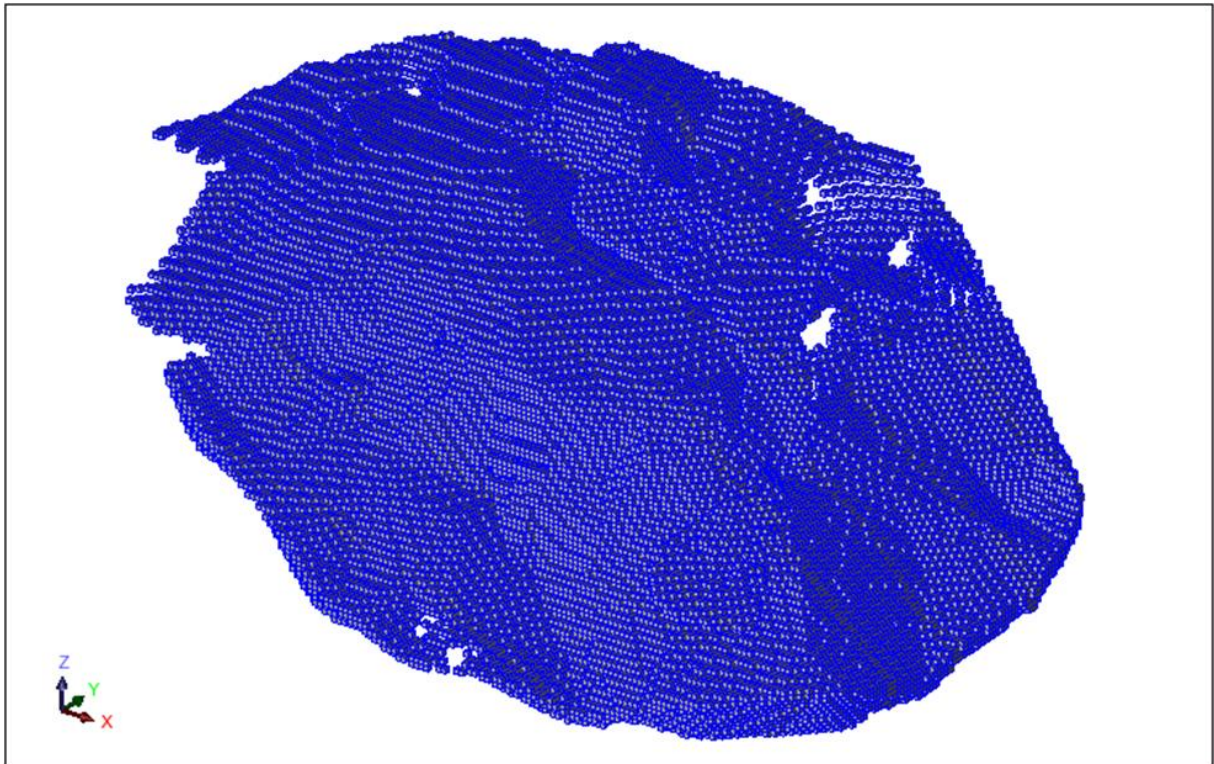


Figura 5.2: Visualização gráfica do modelo de blocos - 3D.

Fonte: Contribuição do autor.

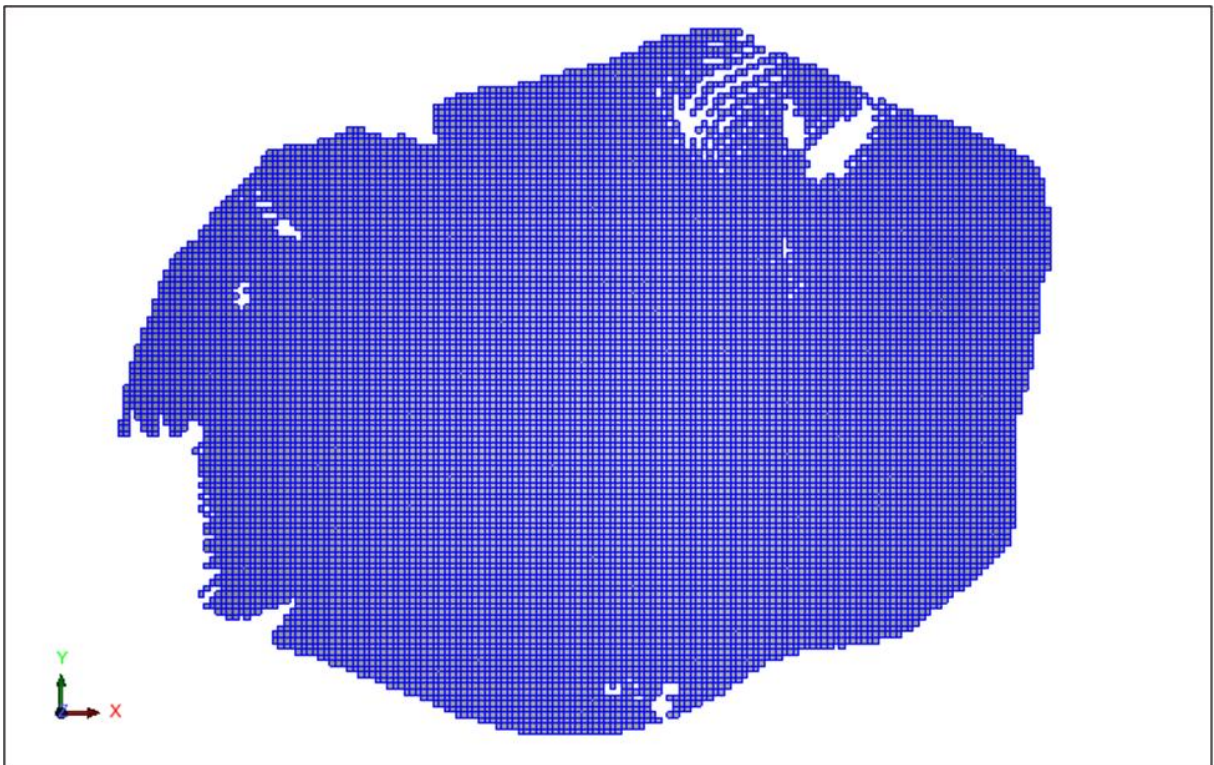


Figura 5.3: Visualização gráfica do modelo de blocos - 2D.

Fonte: Contribuição do autor.

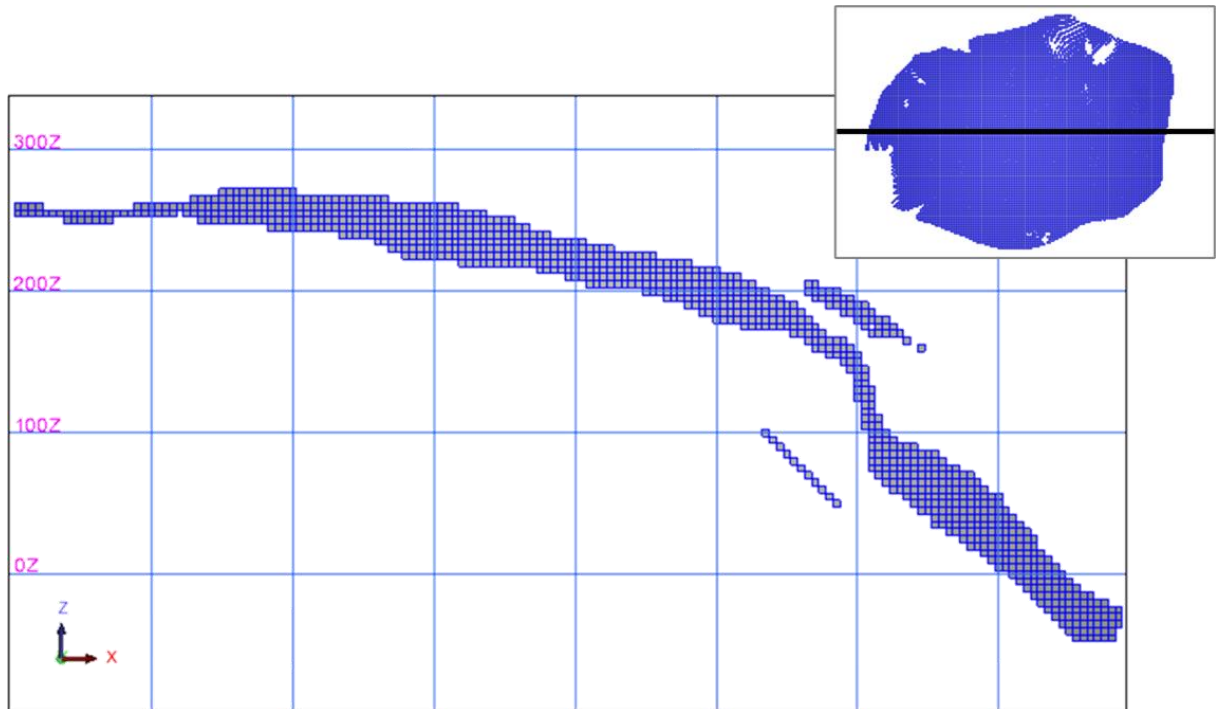


Figura 5.4: Visualização gráfica do modelo de blocos - Seção 1.

Fonte: Contribuição do autor.

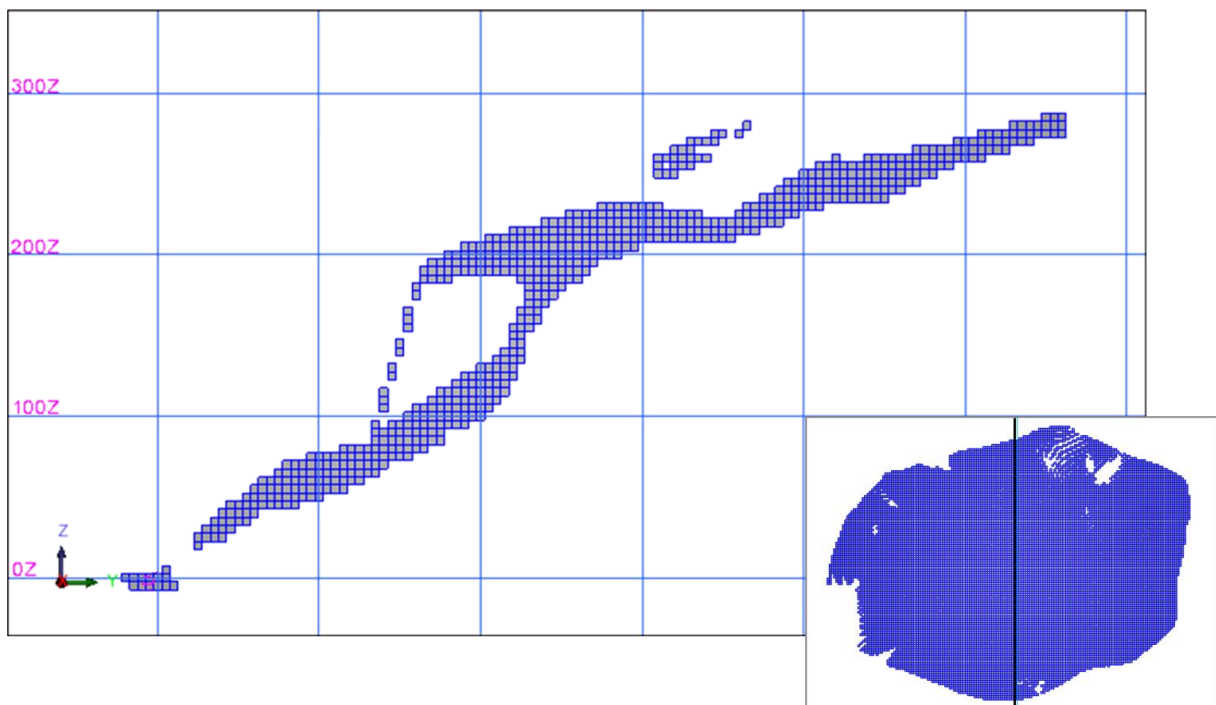


Figura 5.5: Visualização gráfica do modelo de blocos - Seção 2.

Fonte: Contribuição do autor.

Para a definição dos blocos de minério, passíveis de processamento, assim como dos blocos de estéril, foram utilizados os atributos contendo as informações da classificação do recurso e do teor de lítio.

O atributo que contém informações a respeito dos ângulos gerais foi definido a partir de uma análise geotécnica previamente realizada, que resultou na seguinte setorização, evidenciada na Figura 5.6.

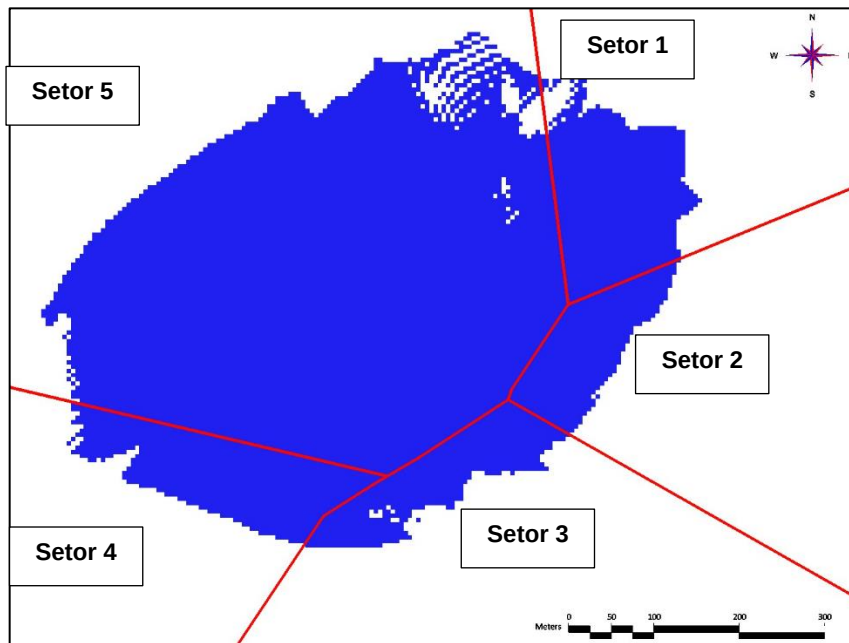


Figura 5.6: Setorização geotécnica.

Fonte: Contribuição do autor.

A setorização, conforme indicada na Figura 5.6, foi definida a partir de setores delimitados espacialmente (setores 1 a 5) e da litologia principal, rocha fresca e solo (*overburden*).

5.2 Abordagem clássica

Nesta etapa, visando a obtenção de um resultado econômico satisfatório, o planejamento estratégico foi realizado por meio da metodologia convencional, com a aplicação de parâmetros predeterminados, assumidos e estimados.

5.2.1 Otimização de cava

A partir da preparação dos dados e com a definição do material que foi classificado como minério ou estéril, o modelo em formato *GEOVIA Surpac* foi exportado e inserido no *software* de otimização *GEOVIA Whittle 4.7*. O algoritmo de Lerchs-Grossmann (1965) foi utilizado para possibilitar a determinação dos limites finais ótimos da cava. Os parâmetros técnicos-econômicos, geométricos e geotécnicos necessários para que a otimização fosse realizada são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros de otimização. - Abordagem clássica.

Item			Unidade	Valor
Taxa de produção			Mtpa	1.8
Econômicos	Parâmetros Financeiros	Preço de Venda	US\$/t produto	1500
		Taxa de desconto	%	10
Físicos	Minério	Densidade	g/cm³	Modelo
		Teores	%Li2O	Modelo
	Lavra	Recuperação de Lavra	%	Modelo
		Diluição		Modelo
	Dimensões do Modelo de Blocos	X x Y x Z	m	5 x 5 x 5
	Ângulo geral	Overburden* - 1, 2, 4 e 5	°	35
		Overburden* - 3		37
		Rocha Fresca - 1, 2, 4 e 5		55
		Rocha Fresca - 3		52
Metalúrgicos	Processamento	Recuperação Metalúrgica	%	60
		Recuperação Mássica	%	Calculada
		Teor do concentrado	% Li2O	6
		Teor de corte	% Li2O	0.5
Custos		Lavra - Minério	US\$/t lavrada	2.2
		Lavra - Estéril	US\$/t lavrada	1.88
		Processamento	US\$/t minério	10.7
		G&A (Ajustado pelo OPEX)		4
		Royalties (CFEM 2%)	US\$/t produto	30

*Litologias de solo e saprólito

Fonte: Contribuição do autor.

Posteriormente, as seguintes configurações necessárias foram inseridas no *software* de otimização supracitado:

- as unidades dos elementos;
- os ângulos interrampa;
- os custos de lavra, a diluição de lavra e a recuperação de lavra;
- os custos de processo e a recuperação metalúrgica;
- o preço de venda dos produtos;
- o intervalo dos fatores de receita (0.3 - 2).

Os valores dos fatores modificadores, utilizados como premissas, foram retirados do banco de dados utilizado nessa dissertação e fazem parte de um projeto com o nível de pré-viabilidade. Como exemplo, os custos de lavra foram definidos a partir de cotações com empresas terceiras, os ângulos interrampa foram definidos com base em estudos geotécnicos

e a recuperação de lavra e seletividade foram relacionadas ao porte dos equipamentos terceirizados a serem utilizados.

A partir dos resultados gerados na otimização realizada no *software Whittle*, com os parâmetros apresentados na Figura 5.3, uma série de cavas aninhadas foram geradas. Logo em seguida, a cava ótima foi selecionada com base nas informações sobre a tonelagem de minério, a relação estéril-minério, o teor de lítio e o valor presente líquido.

5.2.2 Sequenciamento de lavra

A partir da obtenção da cava ótima, o sequenciamento de lavra matemático foi efetuado no *software Whittle*, para que fossem obtidas as cavas anuais até a exaustão da reserva do projeto em questão.

A taxa de produção pré-estabelecida foi de 1.8 Mtpa, alimentadas à planta, e os fatores modificadores a serem utilizados, apresentados anteriormente, são a recuperação de lavra e a diluição da massa e do teor. Além do mais, para o sucesso dessa etapa, a definição das restrições da planta de beneficiamento e a definição das especificações dos produtos (Tabela 5.1) são imprescindíveis.

Essa etapa teve como objetivo estabelecer o sequenciamento anual de produção para o minério (ROM) e o estéril durante a vida útil do empreendimento.

5.3 Abordagem do planejamento robusto

Para a segunda abordagem, o planejamento de lavra robusto, vários cenários foram gerados e analisados, a partir de simulações com a metodologia do planejamento de experimentos. Através desse processo, avaliou-se a volatilidade dos parâmetros de planejamento e determinou-se um resultado ótimo em um nível considerado de robustez, ou seja, alcançou-se o melhor cenário possível.

Para aplicação do planejamento de lavra robusto foram utilizadas metodologias estatísticas, embasamento teórico de simulação e o *software Minitab*. O custo de lavra, o custo de processo, o valor de venda, a taxa de produção e os ângulos geotécnicos interrampa foram as variáveis estudadas para a geração dos cenários analisados.

Posteriormente, a partir do resultado ótimo obtido por meio do uso do *software* de planejamento (*i.e.*, *Whittle*), foram gerados o sequenciamento de lavra e a análise econômica,

utilizando o mesmo modelo econômico aplicado na abordagem convencional.

5.3.1 *Software Minitab*

O *software Minitab* foi utilizado para a realização do planejamento de experimentos, em virtude de ser projetado com uma interface simples e intuitiva que permite que dados de diferentes fontes sejam importados, incluindo bancos de dados e planilhas, possibilitando a realização de análises estatísticas. O *software* supracitado suporta uma variedade de métodos avançados (MATHEWS, 2004).

O *Minitab* oferece recursos para a realização de planejamentos de experimentos e análises que auxiliam na identificação da relação entre variáveis e a otimização dos processos. Esses recursos incluem o planejamento de experimentos e a análise de variância (ANOVA), que contribuem para a determinação de quais fatores possuem o maior impacto nos processos e quais podem ser ajustados para melhorar a qualidade e eficiência.

Além de possuir as ferramentas necessárias para o planejamento e análise de experimentos, o *software* suporta a maior parte de outras ferramentas estatísticas que o usuário pode precisar, como descrições básicas e estatística inferencial. Também possui uma geração de gráficos com uma interface prática, fácil de configurar e que possibilita edições após finalizações (MATHEWS, 2004).

Por fim, o *Minitab* é um *software* que é compatível com uma variedade de sistemas operacionais, possui um suporte técnico de qualidade e contempla resultados precisos.

5.3.2 Planejamento de experimentos

O planejamento de experimentos foi a metodologia estatística utilizada para que o planejamento de lavra se tornasse mais robusto. A metodologia permite a análise sistemática de variáveis que influenciam a lavra, permitindo a identificação dos fatores críticos de sucesso e a otimização dos processos. Com essa técnica, foi possível avaliar diferentes cenários e definir a melhor estratégia de lavra para maximizar o retorno financeiro do projeto.

Para realizar o planejamento de experimentos, o *software Minitab* foi utilizado, conforme citado anteriormente. Os parâmetros que foram analisados, com dois níveis, foram:

- o custo de lavra;
- o custo de processo;
- o valor de venda dos produtos;
- a taxa de produção anual;
- os ângulos interrampa.

De acordo com o que foi mencionado no item 4.2.1.1, por se tratar de mais de 4 parâmetros, é mais interessante que seja realizado um planejamento fatorial fracionado, para que o número de experimentos seja reduzido, sendo tal abordagem realizada no projeto em questão. Além da redução do número de experimentos, a partir dessa metodologia existe uma economia de recursos, uma maior eficiência, a detecção de interações entre os fatores e a identificação dos fatores mais importantes. Entretanto, pode levar a menos informações sobre as interações entre os fatores.

Para realizar o planejamento fatorial fracionado no *Minitab* existem duas ferramentas. O " $2^{(k-p)}$ ", apresentado no item 4.2.1.1, e o "*Plackett-Burman*". O " $2^{(k-p)}$ " é um *design* fatorial fracionado, que é utilizado quando o número de fatores é maior do que o número de experimentos que podem ser realizados. Ele permite que sejam avaliados todos os possíveis efeitos principais e interações de 2 níveis, mas apenas um subconjunto desses efeitos de ordem superior é avaliado. O número de experimentos é reduzido em um fator de " 2^p ", onde p é o número de fatores que não são avaliados em todos os possíveis níveis.

A outra ferramenta disponível no *software*, o "*Plackett-Burman*", é um método de planejamento experimental, que permite avaliar um elevado número de fatores com um número relativamente pequeno de experimentos (MATHEWS, 2004). O método é baseado em uma matriz resolvente que utiliza apenas dois níveis (-1 e +1) para estimar os efeitos

principais de vários fatores. Os experimentos são selecionados de forma equilibrada para que cada fator seja testado em metade dos experimentos com nível positivo e em metade com nível negativo. No entanto, o método é mais adequado para a triagem inicial de muitos fatores quando o experimento não é conhecido, visando a determinação de quais são os mais relevantes, antes de prosseguir com experimentos mais detalhados.

Nessa etapa foi utilizada a ferramenta “ $2^{(k-p)}$ ” para que o planejamento fosse gerado, uma vez que o experimento é conhecido. Após a obtenção dos resultados da execução do planejamento estratégico para cada cenário, foi possível realizar uma análise dos dados com gráficos fatoriais, para identificar quais fatores exercem maior impacto nos processos e quais podem ser ajustados para aprimorar a qualidade e eficiência.

5.3.2.1 Minitab

Conforme mencionado anteriormente, o *software Minitab* foi utilizado para que o planejamento de experimentos fosse obtido.

O planejamento de experimentos foi realizado considerando os seguintes parâmetros (Tabela 5.2):

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no planejamento de experimentos

Variáveis de entrada	Níveis		
	Nível Inferior	Ponto central*	Nível Superior
Custo de lavra (US\$/t lavrada)	-1	0	+1
Custo de processo (US\$/t minério)	8.56	10.7	12.84
Preço de venda dos produtos (US\$/t concentrado)	1200	1 500	1800
Taxa de produção anual (Mtpa)	1.44	1.8	2.16
Ângulos interrampa (°)	-1	0	+1

Fonte: Contribuição do autor.

Os níveis foram definidos utilizando os dados do planejamento convencional como ponto central. O nível superior corresponde aos valores do ponto central com um acréscimo de 20%, enquanto o nível inferior corresponde aos valores do ponto central com um decréscimo de 20%. Essa porcentagem foi selecionada considerando a inevitabilidade de variações, as quais são inerentes a qualquer estágio de um projeto de mineração. O preço do produto é um exemplo de uma variável de entrada que teve uma variação de mais de 20%, variou 86% no ano de 2023, conforme indicado na Figura 5.7.

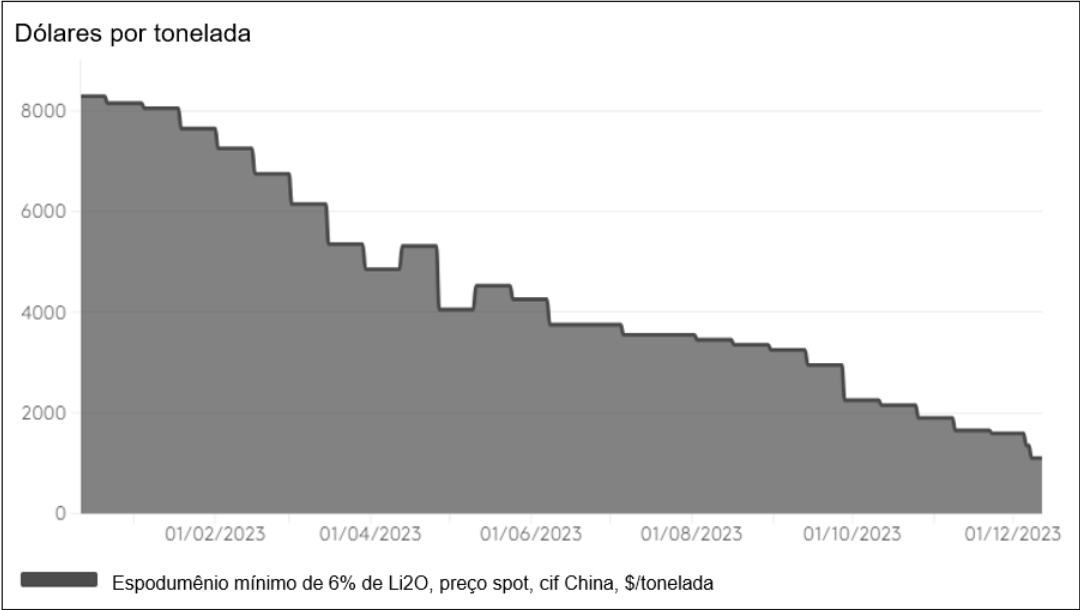


Figura 5.7: Variação do preço de espodumênio em 2023.

Fonte: Adaptado de Fastmarkets (2024).

Os parâmetros “custo de lavra” e “ângulos interrampa” foram simplificados para os números +1 e -1 nas Tabelas 5.3 e 5.4, uma vez que correspondem a mais de um valor, conforme apontado a seguir.

Tabela 5.3: Custo de lavra detalhado

Custo de lavra US\$/t lavrada	Nível Inferior (-1)	Ponto Central	Nível Superior (+1)
Minério	1.76	2.20	2.64
Estéril	1.50	1.88	2.26

Fonte: Contribuição do autor.

Tabela 5.4: Ângulos interrampa detalhado

Ângulos interrampa (°)		Nível Inferior (-1)	Ponto Central (0)	Nível Superior (+1)
<i>Overburden</i> (°)	Setores 1, 2, 4 e 5	28	35	42
	Setor 3	29.6	37	44.4
Rocha Fresca (°)	Setores 1, 2, 4 e 5	44	55	66
	Setor 3	41.6	52	62.4

Fonte: Contribuição do autor.

5.3.3 Otimização das cavas

A etapa de otimização de lavra foi realizada para todos os cenários gerados a partir do planejamento de experimentos. Os custos de lavra e processo, o valor de venda, bem como os ângulos interrampa selecionados para serem utilizados em cada cenário, foram definidos de acordo com o planejamento de experimentos.

A otimização foi realizada de forma semelhante à realizada na metodologia clássica. O *software Whittle* foi utilizado e as cavas ótimas de cada cenário foram selecionadas de acordo com as informações sobre a tonelagem de minério, a relação estéril-minério, o valor presente líquido e o teor de lítio.

5.3.4 Sequenciamento de lavra dos cenários

O sequenciamento de lavra dos cenários referentes à abordagem robusta foi realizado utilizando como base o resultado obtido no sequenciamento de lavra da abordagem clássica. Isso foi possível uma vez que, para o desenvolvimento do sequenciamento, foi adotada a premissa de ter somente uma frente de lavra que avança verticalmente, devido ao formato do corpo mineralizado. Desse modo, o sequenciamento de todos os cenários seguiu a mesma sequência de lavra, ajustada de acordo com a taxa de produção de cada experimento.

Com base no resultado obtido na abordagem clássica, foram elaborados dois fatores de ajuste para serem utilizados no sequenciamento da abordagem robusta, um fator referente à relação estéril-minério e outro para os teores de lítio.

A partir da realização dessa etapa foi obtida a variação dos custos de lavra, uma vez que os custos foram embasados na variação da REM de cada período do sequenciamento.

5.4 Análise econômica

A análise econômica de todos os cenários foi realizada a partir da metodologia do fluxo de caixa descontado. O objetivo dessa etapa foi avaliar a viabilidade financeira do projeto, isto é, analisar se o investimento foi justificado pelos retornos financeiros satisfatórios que o projeto pode gerar.

Uma vez que a análise econômica foi efetuada para todos os cenários, foram analisados os impactos que a variação dos parâmetros de planejamento, obtidos por meio das duas metodologias, geraram no resultado econômico do projeto. Os cenários foram comparados com base no VPL, VPL/VPI, TIR e no *payback*. Por fim, foi realizada uma análise de quais parâmetros estudados na abordagem robusta do planejamento de lavra mais influenciaram na avaliação econômica por meio de gráficos fatoriais.

5.4.1 Custos de capital

Para a realização dessa etapa, os custos de capital e os custos operacionais precisam estar definidos. A base do custo de capital utilizada para o projeto em questão faz parte do banco de dados e está listada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: CAPEX do projeto.

Custos de Capital	
Item	Valor (US\$ x 1 000)
Pré produção	97 797
Manutenção (de 5 em 5 anos)	4 080
Custo de fechamento de mina	1 455

Fonte: Contribuição do autor.

Para o desenvolvimento dos resultados referentes à abordagem clássica, foram utilizados os valores do banco de dados listados na Tabela 5.5. Para a definição dos custos de capital na abordagem robusta, adotou-se a regra dos seis décimos conforme descrito por Mular em 1978 (AUSIMM, 2012) na Equação 5.1:

$$\frac{\text{Custo desconhecido com capacidade 1}}{\text{Custo conhecido com capacidade 2}} = \left(\frac{\text{Capacidade 1}}{\text{Capacidade 2}} \right)^{0,6} \quad (5.1)$$

A regra representada pela Equação (5.1) pode ser utilizada para que os estimadores, em

etapas iniciais dos projetos, determinem a magnitude dos custos do projeto (AUSIMM, 2012). Essa regra simples demonstra que o custo de capital desconhecido é estimado ao inserir a capacidade da operação em estudo nessa fórmula, junto com a capacidade e o custo de capital conhecidos de uma operação similar, porém com um rendimento diferente. Os custos e a capacidade da operação, empregados na abordagem clássica, foram utilizados para definir o custo de capital em cada cenário da abordagem robusta.

5.4.2 Custos operacionais

Os custos operacionais anuais variaram de acordo com os resultados obtidos na etapa do sequenciamento de lavra, uma vez que a taxa de produção anual de estéril e de minério é essencial para que esses valores sejam definidos.

Foram utilizados os custos de lavra e os custos de processo apresentados anteriormente para que os resultados dos custos operacionais fossem obtidos, uma vez que esse parâmetro variou entre as abordagens apresentadas.

Além disso, também foram incluídos como custos operacionais outros custos relacionados ao transporte e às despesas administrativas gerais (G&A), que foram padronizados para todas as análises econômicas realizadas. Tais custos estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Custos operacionais fixos.

Custos Operacionais Fixos	
Item	Valor
Transporte (US\$/ t do concentrado)	120
G&A (US\$/ t do ROM)	4

Fonte: Contribuição do autor.

5.4.3 Impostos e *royalties*

Para que a análise econômica fosse realizada, também foram levantadas algumas das taxas e dos impostos relevantes aplicados em empreendimentos mineiros no país. É importante ressaltar que os valores utilizados nesse estudo foram simplificados.

A proprietária do empreendimento, pela localização, pode requerer o subsídio governamental (incentivo fiscal) fornecido pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do

Nordeste), de acordo com a Lei Federal Nº 6.674 de 3 de dezembro de 2008, a fim de reduzir em 75% a alíquota do imposto de renda como incentivo fiscal por um período de 10 anos, a partir do ano em que o Certificado de Avaliação da SUDENE for emitido, após atingir pelo menos 20% da sua capacidade de produção.

A taxa de imposto de renda brasileira considerada é presumida como sendo 15,25%, refletindo o benefício fiscal da Sudene aplicado à alíquota máxima de imposto corporativo brasileiro, que é de 34% sobre o lucro tributável (25% de imposto de renda mais 9% de contribuição social). Estima-se que o empreendimento estará isento de todos os impostos de importação para produtos que não possuam equivalente produzido no Brasil. Os *royalties* utilizados incluem:

- CFEM: Compensação financeira pela exploração de recursos minerais;
- NSR #1: *Net Smelter Return*, também conhecido como Retorno líquido da fundição, com deduções permitidas da receita bruta, englobando a CFEM royalty, eventuais descontos comerciais, custos de transporte e impostos pagos.

Os valores referentes aos *royalties* e aos impostos são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Impostos e *royalties*.

Impostos e <i>royalties</i>	
CFEM ¹ (%)	2
NSR #1 (%)	0.8
Impostos (%)	15.25
1 – 2% taxa de <i>royalties</i> atual para o lítio.	

Fonte: Contribuição do autor.

Outros impostos, como PIS (Programa de integração social), COFINS (Contribuição social sobre o lucro líquido), ISS (Imposto sobre serviços) e ICMS (Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços de transporte interestadual e intermunicipal e comunicação) foram aplicados nos custos de capital, apresentados no item 5.4.1.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, serão abordados os resultados obtidos a partir da metodologia apresentada anteriormente. A apresentação dos resultados seguirá a seguinte estrutura: inicialmente, serão discutidos os resultados relacionados à abordagem clássica; em seguida, serão discutidos os resultados oriundos da abordagem do planejamento de lavra robusto; e por fim, será apresentada a análise econômica realizada para a comparação desenvolvida entre as abordagens.

6.1 Abordagem clássica

As etapas de otimização de cava e sequenciamento de lavra realizadas por meio da abordagem clássica são evidenciadas nos itens a seguir.

6.1.1 Otimização de cava

Os resultados da otimização de cava realizada para a abordagem clássica são apresentados na Tabela 6.1, a seguir.

Tabela 6.1: Resultado da otimização a partir da abordagem clássica.

Cavas	Fator de Receita	Preço de venda (US\$/t)	Minério (Mt)	Estéril (Mt)	Movimentação total (Mt)	REM (t/t)	Li ₂ O (%)
1	0.3	450	20.60	179.64	200.24	8.72	1.41
2	0.4	600	22.15	210.62	232.77	9.51	1.41
3	0.5	750	22.76	227.01	249.77	9.97	1.40
4	0.6	900	23.19	241.49	264.68	10.41	1.40
5	0.7	1 050	23.42	250.10	273.52	10.68	1.39
6	0.8	1 200	23.52	254.24	277.76	10.81	1.39
7	0.9	1 350	23.56	256.73	280.29	10.90	1.39
8	1.0	1 500	23.59	258.75	282.34	10.97	1.39
9	1.1	1 650	23.63	260.63	284.26	11.03	1.39
10	1.2	1 800	23.64	261.87	285.51	11.08	1.39
11	1.3	1 950	23.65	263.49	287.14	11.14	1.39
12	1.4	2 100	23.66	264.18	287.84	11.17	1.39
13	1.5	2 250	23.67	264.6	288.27	11.18	1.39
14	1.6	2 400	23.68	265.58	289.26	11.22	1.39
15	1.7	2 550	23.68	266.37	290.05	11.25	1.39
16	1.8	2 700	23.69	267.26	290.95	11.28	1.39
17	1.9	2 850	23.69	267.87	291.56	11.31	1.39
18	2.0	3 000	23.7	268.14	291.84	11.31	1.39

Fonte: Contribuição do autor.

A cava ótima escolhida, destacada na Tabela 6.1 (*i.e.*, Cava 5), foi a de fator de receita 0.7.

Essa cava foi a escolhida prezando por um cenário de menor risco, uma vez que as cavas com os preços de venda acima de U\$1050/t não demonstraram possíveis ganhos significativos. A variação da movimentação de minério torna-se pequena quando em comparação com a variação da movimentação de estéril.

6.1.2 Sequenciamento de lavra

Logo após a etapa de otimização das cavas, foi realizado o sequenciamento de lavra da cava ótima selecionada. O resultado do sequenciamento de lavra da cava ótima com o fator de receita 0.7 está apontado na Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2: Sequenciamento de lavra da abordagem clássica.

Ano	Minério (Mt)	Li2O (%)	Estéril (Mt)	REM (t/t)
1	1.80	1.35%	14.16	7.9
2	1.80	1.40%	15.23	8.5
3	1.80	1.40%	16.49	9.2
4	1.80	1.40%	25.56	14.2
5	1.80	1.40%	34.25	19.0
6	1.80	1.40%	35.43	19.7
7	1.80	1.40%	24.70	13.7
8	1.80	1.40%	17.82	9.9
9	1.80	1.40%	19.44	10.8
10	1.80	1.40%	16.74	9.3
11	1.80	1.40%	17.28	9.6
12	1.80	1.40%	6.06	3.4
13	1.85	1.40%	6.08	3.3

Fonte: Contribuição do autor.

6.2 Abordagem do planejamento robusto

6.2.1 Planejamento de experimentos

Os cenários obtidos a partir do planejamento de experimentos, realizado no *software Minitab*, estão evidenciados na Tabela 6.3 e Tabela 6.4 a seguir. É importante destacar que esses cenários já contêm os parâmetros técnicos-econômicos, geotécnicos e geométricos que foram utilizados na etapa de otimização das cavas.

Tabela 6.3: Cenários (1 ao 8) obtidos a partir do planejamento de experimentos.

Item			Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Taxa de produção			Mtpa	1.44	2.16	1.44	2.16	1.44	1.44	2.16	2.16
Econômicos	Parâmetros Financeiros	Preço de Venda	US\$/t produto	1800	1200	1800	1800	1800	1200	1200	1200
		Taxa de desconto	%	10	10	10	10	10	10	10	10
Físicos	ROM	Densidade	g/cm ³	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
		Teores	%Li ₂ O	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
	Lavra	Recuperação de Lavra	%	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
		Diluição		Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
	Dimensões do Modelo de Blocos		X x Y x Z	m	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5
	Ângulo geral	Overburden* - 1, 2, 4 e 5	°	42	28	28	42	42	42	42	28
		Overburden* - 3		44.4	29.6	29.6	44.4	44.4	44.4	44.4	29.6
		Rocha Fresca - 1, 2, 4 e 5		66	44	44	66	66	66	66	44
		Rocha Fresca - 3		62.4	41.6	41.6	62.4	62.4	62.4	62.4	41.6
Metalúrgicos	Processamento	Recuperação Metalúrgica	%	60	60	60	60	60	60	60	60
		Recuperação Mássica	%	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada
		Teor do concentrado	\$ Li ₂ O	6	6	6	6	6	6	6	6
		Teor de corte	\$ Li ₂ O	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Custos	Todos os custos	Lavra - Minério	US\$/t lavrada	1.76	1.76	2.64	2.64	2.64	1.76	2.64	2.64
		Lavra - Estéril	US\$/t lavrada	1.50	1.50	2.26	2.26	2.26	1.50	2.26	2.26
		Processamento	US\$/t minério	12.84	8.56	12.84	12.84	8.56	8.56	8.56	12.84
		G&A (Ajustado pelo OPEX)		4	4	4	4	4	4	4	4
		Royalties (CFEM 2%)	US\$/t produto	36	24	36	36	36	24	24	24

* Litologias de solo e saprólito

Fonte: Contribuição do autor.

Tabela 6.4: Cenários (9 ao 16) obtidos a partir do planejamento de experimentos.

Item			Unidade	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
Taxa de produção			Mtpa	2.16	1.44	1.44	1.44	1.44	2.16	2.16	2.16
Econômicos	Parâmetros Financeiros	Preço de Venda	US\$/t produto	1200	1200	1800	1200	1200	1800	1800	1800
		Taxa de desconto	%	10	10	10	10	10	10	10	10
Físicos	ROM	Densidade	g/cm ³	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
		Teores	%Li ₂ O	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
	Lavra	Recuperação de Lavra	%	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
		Diluição		Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
	Dimensões do Modelo de Blocos		m	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5	5 x 5 x 5
	Ângulo geral	Overburden* - 1, 2, 4 e 5	°	42	28	28	42	28	28	42	28
		Overburden* - 3		44.4	29.6	29.6	44.4	29.6	29.6	44.4	29.6
		Rocha Fresca - 1, 2, 4 e 5		66	44	44	66	44	44	66	44
		Rocha Fresca - 3		62.4	41.6	41.6	62.4	41.6	41.6	62.4	41.6
Metalúrgicos	Processamento	Recuperação Metalúrgica	%	60	60	60	60	60	60	60	60
		Recuperação Mássica	%	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada	Calculada
		Teor do concentrado	\$ Li ₂ O	6	6	6	6	6	6	6	6
		Teor de corte	\$ Li ₂ O	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Custos	Todos os custos	Lavra - Minério	US\$/t lavrada	1.76	2.64	1.76	2.64	1.76	2.64	1.76	1.76
		Lavra - Estéril	US\$/t lavrada	1.50	2.26	1.50	2.26	1.50	2.26	1.50	1.50
		Processamento	US\$/t minério	12.84	8.56	8.56	12.84	12.84	12.84	8.56	12.84
		G&A (Ajustado pelo OPEX)		4	4	4	4	4	4	4	4
		Royalties (CFEM 2%)	US\$/t produto	24	24	36	24	24	36	36	36

* Litologias de solo e saprólito

Fonte: Contribuição do autor.

6.2.2 Resultado da otimização

A otimização das cavas de cada cenário do planejamento de experimentos foi realizada com a utilização do *software Whittle*, conforme detalhado no item 5.3.3. Para uma comparação coerente dos resultados obtidos a partir das duas abordagens estudadas, foram selecionadas as cavas com o fator de receita de 0.7 de cada cenário, o mesmo fator de receita selecionado para a abordagem clássica, conforme apresentado na Tabela 6.5.

É importante citar que as cavas com o fator de receita 0.7 puderam ser escolhidas, uma vez que foi observado um resultado semelhante ao que foi apresentado na abordagem robusta. Isto é, a variação da movimentação de minério tornou-se pequena quando comparada com a variação da movimentação de estéril.

Tabela 6.5: Resultado da otimização a partir da abordagem robusta.

Cenários	Fator de Receita	Preço de venda (US\$/t)	Minério (Mt)	Estéril (Mt)	Movimentação Total (Mt)	REM (t/t)	Li2O (%)
1	0.7	1260	23.62	200.14	223.76	8.47	1.39
2	0.7	840	22.93	318.59	341.52	13.89	1.40
3	0.7	1260	23.05	324.32	347.38	14.07	1.40
4	0.7	1260	23.48	194.05	217.53	8.27	1.40
5	0.7	1260	23.48	194.33	217.82	8.28	1.40
6	0.7	840	23.47	193.86	217.34	8.26	1.40
7	0.7	840	23.07	180.75	203.82	7.84	1.40
8	0.7	840	21.91	278.91	300.82	12.73	1.40
9	0.7	840	23.42	192.09	215.51	8.2	1.40
10	0.7	840	22.01	282.12	304.13	12.82	1.40
11	0.7	1260	23.50	349.68	373.18	14.88	1.39
12	0.7	840	22.99	179.03	202.03	7.79	1.40
13	0.7	840	22.52	301.34	323.85	13.38	1.40
14	0.7	1260	23.05	324.32	347.38	14.07	1.40
15	0.7	1260	23.64	201.40	225.04	8.52	1.39
16	0.7	1260	23.50	349.68	373.18	14.88	1.39

Fonte: Contribuição do autor.

A Figura 6.2 apresenta um gráfico contendo todos os cenários de lavra. A partir do gráfico elaborado é possível perceber uma aleatoriedade no estudo, os resultados não possuem uma tendência a ser seguida.

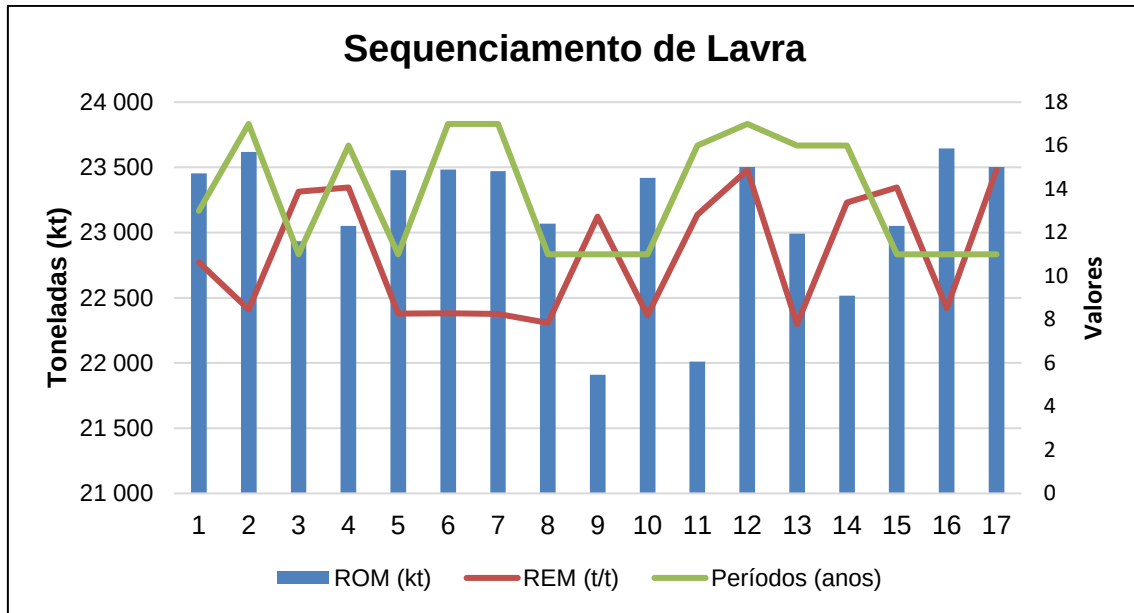


Figura 6.1: Cenários de lavra.

Fonte: Contribuição do autor.

Foram utilizados gráficos, gerados no software *Minitab*, para analisar a influência dos seguintes fatores no resultado da reserva (representado pela quantidade de minério na Tabela 6.5): custo de lavra, custo de processo, valor de venda, taxa de produção anual e ângulos interrampa.

O primeiro gráfico gerado, é apresentado na Figura 6.2.

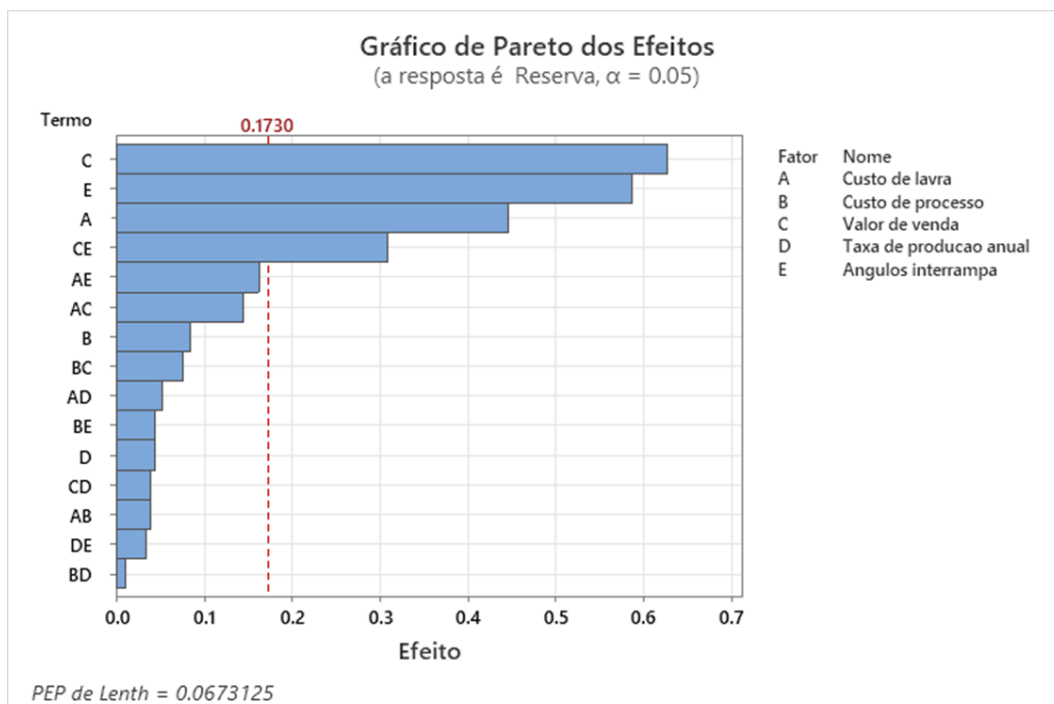


Figura 6.2: Gráfico de Pareto dos efeitos para a reserva.

Fonte: Contribuição do autor.

A partir do gráfico de Pareto dos efeitos, é possível identificar que os fatores que mais influenciaram no resultado da reserva são representados pelas barras C, E, A e CE, que correspondem, respectivamente, ao valor de venda, aos ângulos interrampa, ao custo de lavra e à interação entre os efeitos valor de venda e ângulos interrampa.

Logo após, foram analisados os fatores que mais influenciaram no resultado da reserva. Nas Figuras 6.3 e 6.4, é possível visualizar os gráficos de interação e de efeitos principais com os resultados gerados.

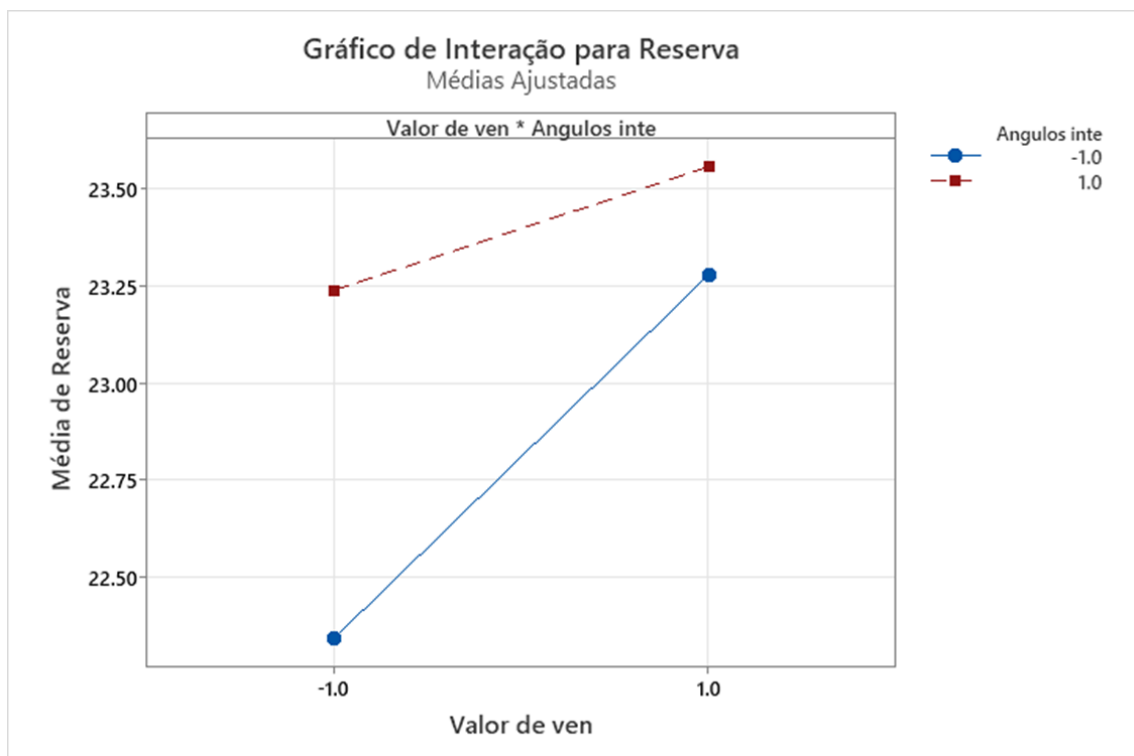


Figura 6.3: Gráfico de interação para o valor de venda e os ângulos interrampa.

Fonte: Contribuição do autor.

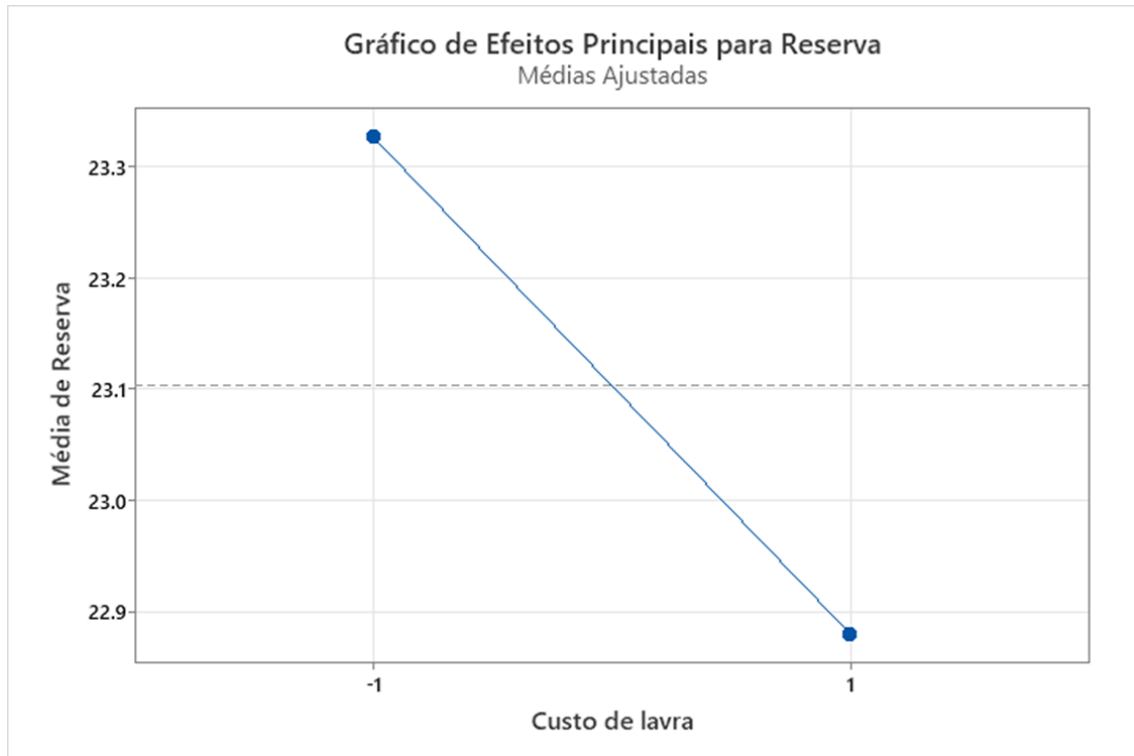


Figura 6.4: Gráfico de efeitos principais para o custo de lavra.

Fonte: Contribuição do autor.

A partir da Figura 6.3, que contém o resultado do gráfico de interação para o valor de venda e para os ângulos interrampa, é possível observar que quanto mais suaves forem os ângulos utilizados, maior será a influência do valor de venda na reserva, como demonstrado no impacto da mesma variação do valor de venda, que passou de 0.25Mt para 1Mt. Por outro lado, o resultado apresentado no segundo gráfico, representado na Figura 6.3, é mais trivial, uma vez que quanto maior o custo de lavra, menor será a reserva e o oposto também é válido.

Com base na análise dos gráficos gerados (Figuras 6.3 e 6.4), os níveis em que são obtidos os melhores resultados para a reserva estão listados a seguir:

- preço de venda: nível 1, que corresponde ao valor US\$1800 por tonelada de concentrado;
- ângulos interrampa: nível 1, que corresponde aos valores 42° (para o *overburden* nos setores 1, 2, 4 e 5), 44.4° (para o *overburden* no setor 3), 66° (para a rocha fresca nos setores 1, 2, 4 e 5) e 62.4° (para a rocha fresca no setor 3);
- custo de lavra: nível -1, que corresponde aos valores US\$1.76 por tonelada lavrada de minério e US\$1.50 por tonelada lavrada de estéril.

6.2.3 Sequenciamento de lavra

Nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8, exibidas a seguir, serão apresentados os sequenciamentos de lavra de cada cenário, de acordo com a metodologia apresentada no item 5.3.4.

Tabela 6.6: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 1 – 6).

Cenário	Item	Ano																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cenário 1	Minério (Mt)	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.58
	Estéril (Mt)	9.48	9.70	9.10	10.28	18.81	20.59	20.73	21.95	14.25	10.62	13.66	11.71	10.84	9.28	3.65	3.66	1.83
	Li2O (%)	1.34%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%
	REM (t/t)	6.6	6.7	6.3	7.1	13.1	14.3	14.4	15.2	9.9	7.4	9.5	8.1	7.5	6.4	2.5	2.5	3.2
Cenário 2	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.33	-	-	-	-	-	-
	Estéril	23.47	21.53	35.43	49.17	56.61	34.03	26.92	31.06	24.85	9.69	5.83	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.37%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	10.9	10.0	16.4	22.8	26.2	15.8	12.5	14.4	11.5	4.5	4.4	-	-	-	-	-	-
Cenário 3	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.45	-
	Estéril	15.36	15.71	14.74	16.66	36.03	33.42	33.92	35.56	22.79	17.92	18.97	18.97	20.03	11.39	5.92	6.92	-
	Li2O	1.35%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-
	REM	10.7	10.9	10.2	11.6	25.0	23.2	23.6	24.7	15.8	12.4	13.2	-	-	-	-	-	-
Cenário 4	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.88	-	-	-	-	-	-
	Estéril	14.30	13.11	18.26	29.91	34.28	22.59	16.19	17.03	15.56	8.08	4.73	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.36%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	6.6	6.1	8.5	13.8	15.9	10.5	7.5	7.9	7.2	3.7	2.5	-	-	-	-	-	-
Cenário 5	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.44
	Estéril	9.20	9.42	8.83	9.98	18.27	20.00	20.13	24.86	11.97	10.53	11.37	11.37	10.53	9.01	3.54	4.15	1.19
	Li2O	1.34%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%
	REM	6.4	6.5	6.1	6.9	12.7	13.9	14.0	17.3	8.3	7.3	7.9	7.9	7.3	6.3	2.5	2.9	2.7
Cenário 6	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.43
	Estéril	9.18	9.39	8.81	9.96	18.22	19.95	20.08	24.80	11.94	10.50	11.34	11.34	10.50	8.99	4.12	3.55	1.18
	Li2O	1.34%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%
	REM	6.4	6.5	6.1	6.9	12.7	13.9	13.9	17.2	8.3	7.3	7.9	7.9	7.3	6.2	2.9	2.5	2.7

Fonte: Contribuição do autor.

Tabela 6.7: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 7 – 12).

		Ano																
Cenário	Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cenário 7	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.47	-	-	-	-	-	-
	Estéril	13.32	12.22	20.10	27.89	28.81	22.61	15.27	15.86	15.86	4.94	3.86	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.37%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	6.2	5.7	9.3	12.9	13.3	10.5	7.1	7.3	7.3	2.3	2.6	-	-	-	-	-	-
Cenário 8	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	0.31	-	-	-	-	-	-
	Estéril	20.55	21.24	33.39	47.90	50.13	26.85	27.19	23.57	17.89	8.49	1.70	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.37%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	-	-	-	-	-	-
	REM	9.5	9.8	15.5	22.2	23.2	12.4	12.6	10.9	8.3	3.9	5.5	-	-	-	-	-	-
Cenário 9	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.82	-	-	-	-	-	-
	Estéril	14.15	12.98	18.08	29.61	33.94	22.37	16.02	16.86	17.06	6.33	4.69	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.36%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	6.6	6.0	8.4	13.7	15.7	10.4	7.4	7.8	7.9	2.9	2.6	-	-	-	-	-	-
Cenário 10	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.41	-
	Estéril	13.36	15.75	13.16	19.31	28.93	33.99	30.08	30.67	14.67	18.95	16.50	18.34	15.53	5.14	6.02	1.72	-
	Li2O	1.35%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	-
	REM	9.3	10.9	9.1	13.4	20.1	23.6	20.9	21.3	10.2	13.2	11.5	12.7	10.8	3.6	4.2	4.2	-
Cenário 11	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.46
	Estéril	16.56	16.94	15.89	17.97	32.87	35.98	36.22	44.73	21.54	18.94	20.46	20.46	18.94	16.21	6.37	7.46	2.13
	Li2O	1.34%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%
	REM	11.5	11.8	11.0	12.5	22.8	25.0	25.2	31.1	15.0	13.2	14.2	14.2	13.2	11.3	4.4	5.2	4.6
Cenário 12	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.39	-
	Estéril	8.48	8.67	8.14	10.73	18.36	18.45	18.73	22.90	9.31	9.89	10.47	12.22	9.31	6.29	3.27	3.82	-
	Li2O	1.35%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-
	REM	5.9	6.0	5.7	7.5	12.7	12.8	13.0	15.9	6.5	6.9	7.3	8.5	6.5	4.4	2.3	2.7	-

Fonte: Contribuição do autor.

Tabela 6.8: Sequenciamento de lavra da abordagem robusta (Cenários 13 – 16).

Cenário	Item	Ano																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cenário 13	Minério	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	0.92	-
	Estéril	14.27	14.60	16.28	15.48	30.90	36.26	31.82	35.65	15.67	16.97	20.57	17.30	18.28	7.19	5.50	4.60	-
	Li2O	1.35%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	1.41%	-
	REM	9.9	10.1	11.3	10.7	21.5	25.2	22.1	24.8	10.9	11.8	14.3	12.0	12.7	5.0	3.8	5.0	-
Cenário 14	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.45	-	-	-	-	-	-
	Estéril	23.90	21.92	36.07	50.05	51.70	40.57	27.41	28.46	28.46	8.87	6.92	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.37%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	11.1	10.1	16.7	23.2	23.9	18.8	12.7	13.2	13.2	4.1	4.8	-	-	-	-	-	-
Cenário 15	Minério	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	-	-	-	-	-	-
	Estéril	14.8	13.6	19.0	31.0	31.9	25.4	16.6	19.6	16.1	7.8	5.5	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.36%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	6.9	6.3	8.8	14.4	14.8	11.8	7.7	9.1	7.5	3.6	2.7	-	-	-	-	-	-
Cenário 16	Minério	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.90	-	-	-	-	-	-
	Estéril	25.76	23.63	32.91	53.90	55.39	47.10	29.17	30.68	28.03	13.49	9.60	-	-	-	-	-	-
	Li2O	1.36%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%	-	-	-	-	-	-
	REM	11.9	10.9	15.2	25.0	25.6	21.8	13.5	14.2	13.0	6.2	5.0	-	-	-	-	-	-

Fonte: Contribuição do autor.

6.3 Análise econômica

A Tabela 6.9 contém o resumo do resultado dos indicadores financeiros relevantes analisados a partir dos fluxos de caixa realizados (VPL, VPL/VPI, TIR e período de *payback*).

Tabela 6.9: Resumo dos indicadores financeiros analisados.

Cenário	Reserva (Mt)	VPL (MUS\$)	TIR (%)	Payback (anos)	VPL/VPI
Abordagem clássica	23.617	1 680	233%	0.43	17.17
Abordagem robusta					
Cenário 1	22.933	2 023	269%	0.38	23.29
Cenário 2	23.052	1 284	183%	0.55	11.47
Cenário 3	23.478	1 759	191%	0.55	15.56
Cenário 4	23.484	2 333	402%	0.25	27.33
Cenário 5	23.472	1 994	272%	0.37	23.33
Cenário 6	23.067	1 194	168%	0.60	13.99
Cenário 7	21.91	1 352	254%	0.40	16.46
Cenário 8	23.42	1 226	194%	0.51	11.82
Cenário 9	22.01	1 386	246%	0.41	16.32
Cenário 10	23.504	951	123%	0.82	9.11
Cenário 11	23.453	1 925	195%	0.52	16.30
Cenário 12	22.993	1 095	170%	0.60	13.41
Cenário 13	22.516	1 020	122%	0.83	9.41
Cenário 14	23.052	2 114	288%	0.35	18.69
Cenário 15	23.644	2 486	413%	0.24	28.53
Cenário 16	23.503	2 264	287%	0.35	19.18

Fonte: Contribuição do autor.

A partir da avaliação econômica realizada, é possível notar que os cenários 1, 4, 5, 14, 15 e 16 da abordagem robusta apresentam resultados financeiros superiores aos da análise econômica da abordagem clássica. A Tabela 6.10 e a Tabela 6.11 foram geradas para possibilitar a avaliação dos parâmetros estudados, que diferem entre a abordagem clássica e a abordagem robusta, os quais resultaram em cenários melhores.

Tabela 6.10: Parâmetros utilizados nos cenários da abordagem robusta com melhores resultados econômicos em relação à abordagem clássica (Parte 1).

Parâmetros	Abordagem Clássica	Abordagem Robusta		
		Cenário 1	Cenário 4	Cenário 5
Taxa de produção (Mtpa)	1.8	1.44	2.16	1.44
Preço de venda (US\$/t conc)	1500	1800	1800	1800
Ângulo interrampa (°)	35 / 37 / 55 / 52	42 / 44.4 / 66 / 62.4	42 / 44.4 / 66 / 62.4	42 / 44.4 / 66 / 62.4
Custo de lavra - Minério (US\$/t lavrada)	2.2	1.76	2.64	2.64
Custo de lavra - Estéril (US\$/t lavrada)	1.88	1.50	2.26	2.26
Custo de processamento (US\$/t minério)	10.7	12.84	12.84	8.56

Fonte: Contribuição do autor.

Tabela 6.11: Parâmetros utilizados nos cenários da abordagem robusta com melhores resultados econômicos em relação à abordagem clássica (Parte 2).

Parâmetros	Abordagem Robusta		
	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
Taxa de produção (Mtpa)	2.16	2.16	2.16
Preço de venda (US\$/t conc)	1800	1800	1800
Ângulo interrampa (°)	28 / 29.6 / 44 / 41.6	42 / 44.4 / 66 / 62.4	28 / 29.6 / 44 / 41.6
Custo de lavra - Minério (US\$/t lavrada)	2.64	1.76	1.76
Custo de lavra - Estéril (US\$/t lavrada)	2.26	1.50	1.50
Custo de processamento (US\$/t minério)	12.84	8.56	12.84

Fonte: Contribuição do autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 6.9, torna-se evidente que todos os cenários que demonstraram resultados financeiros superiores na análise econômica, em relação à abordagem clássica, possuem o preço de venda do concentrado 20% maior do que o utilizado na abordagem clássica, ou seja, de US\$1800. Contudo, é importante destacar que o valor de venda não é o único parâmetro que determina a superioridade de um cenário em relação à abordagem clássica, uma vez que nem todos os cenários da abordagem robusta que adotaram o valor de venda de US\$1800 alcançaram um desempenho econômico superior ao apresentado pela abordagem clássica.

Além disso, observa-se uma relação entre os parâmetros taxa de produção e os ângulos interrampa. Quando a taxa de produção é maior, de 2.16Mtpa, podem ser utilizados os ângulos interrampa mais suaves (35 / 37 / 55 / 52) e os mais agressivos (42 / 44.4 / 66 / 62.4). No entanto, quando a taxa de produção é reduzida para 1.44Mtpa, somente os cenários que consideram os ângulos interrampa mais agressivos apresentam resultados satisfatórios em comparação ao obtido com a abordagem clássica.

Ademais, pode-se afirmar que nos cenários com resultados financeiros melhores do que o apresentado pela abordagem clássica, os custos de lavra e de processamento não foram parâmetros determinantes, uma vez que variaram desde os valores máximos até os mínimos.

Por fim, como evidenciado na Tabela 6.9, o cenário que se destaca por apresentar resultados mais promissores, de acordo com os indicadores financeiros analisados, é o cenário 15 da abordagem robusta. Os parâmetros avaliados nessa abordagem e aplicados nesse cenário específico estão presentes na Tabela 6.10, que foi apresentada anteriormente.

6.3.1 Influência dos parâmetros nas métricas financeiras

Para analisar a influência dos parâmetros usados no planejamento de experimentos sobre as métricas financeiras, foi realizada uma análise com base em gráficos gerados no *software Minitab*.

Primeiramente, foi realizado um gráfico de Pareto dos efeitos para cada variável resposta, VPL, TIR, *payback* e IR com nível padrão de confiança para todos os intervalos de 95%. Logo após, foram analisados quais parâmetros usados no planejamento de experimentos mais influenciaram no resultado de cada variável resposta, com gráficos de interação ou de efeitos principais.

6.3.1.1 Valor presente líquido (VPL)

A Figura 6.5 contempla o resultado do gráfico de Pareto dos efeitos para a variável resposta VPL. A partir do resultado gerado, é possível identificar que os fatores que mais influenciaram no resultado do VPL são representados pelas barras C, D, E e A, que correspondem, respectivamente, ao valor de venda, à taxa de produção anual, aos ângulos interrampa e ao custo de lavra.

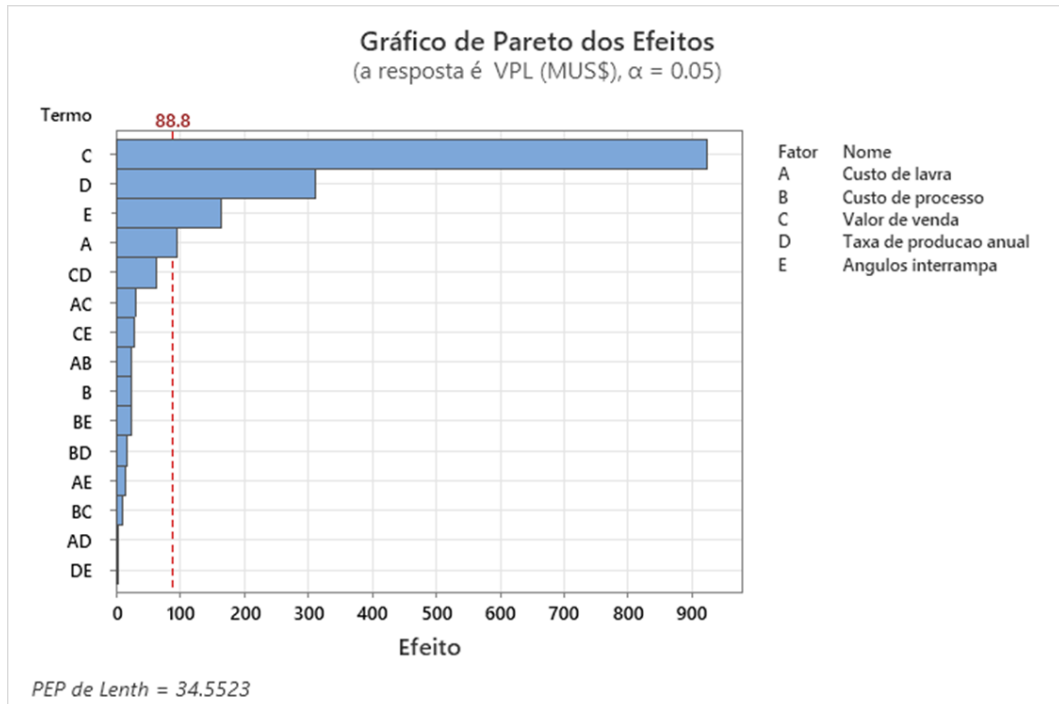


Figura 6.5: Gráfico de Pareto dos efeitos para o VPL.

Fonte: Contribuição do autor.

Posteriormente, em um gráfico de efeitos principais (Figura 6.6), foram analisados os fatores que mais influenciaram no resultado do VPL. O valor de venda é o fator que mais influencia essa métrica financeira, e a variação desse parâmetro causa uma grande alteração no valor do VPL, seguido pela taxa de produção, pelos ângulos interrampa e, por fim, pelo custo de lavra.

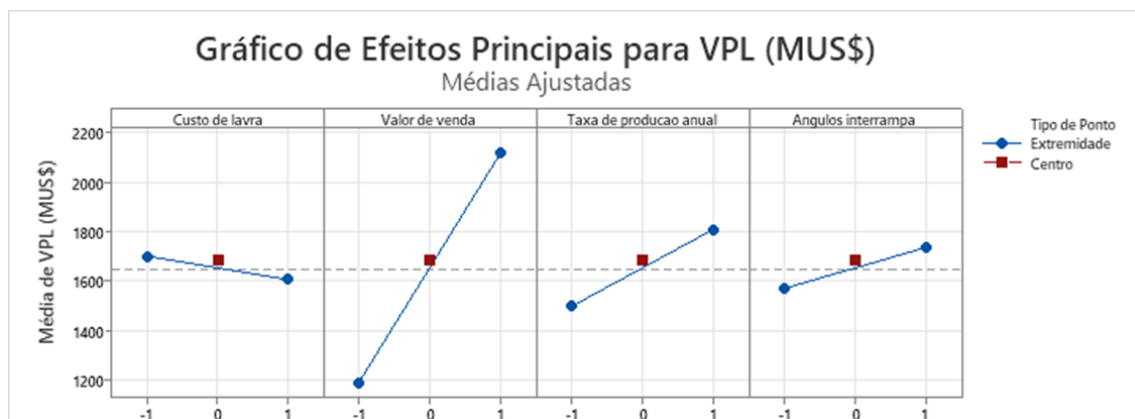


Figura 6.6: Gráfico de efeitos principais para o VPL.

Fonte: Contribuição do autor.

Desse modo, para maximizar o valor do VPL, os níveis dos parâmetros analisados mais adequados seriam:

- custo de lavra: nível -1, que corresponde aos valores US\$1.76 por tonelada lavrada de minério e US\$1.50 por tonelada lavrada de estéril;
- valor de venda: nível 1, que corresponde ao valor US\$1800 por tonelada de concentrado;
- taxa de produção anual: nível 1, que corresponde ao valor 2.16Mtpa;
- ângulos interrampa: nível 1, que corresponde aos valores 42° (para o *overburden* nos setores 1, 2, 4 e 5), 44.4° (para o *overburden* no setor 3), 66° (para a rocha fresca nos setores 1, 2, 4 e 5) e 62.4° (para a rocha fresca no setor 3).

6.3.1.2 Taxa interna de retorno (TIR)

De acordo com o gráfico de Pareto dos efeitos gerado (Figura 6.7), os parâmetros que mais influenciam a variável de resposta taxa interna de retorno (TIR) são, respectivamente, o valor de venda, a taxa de produção anual e os ângulos interrampa.

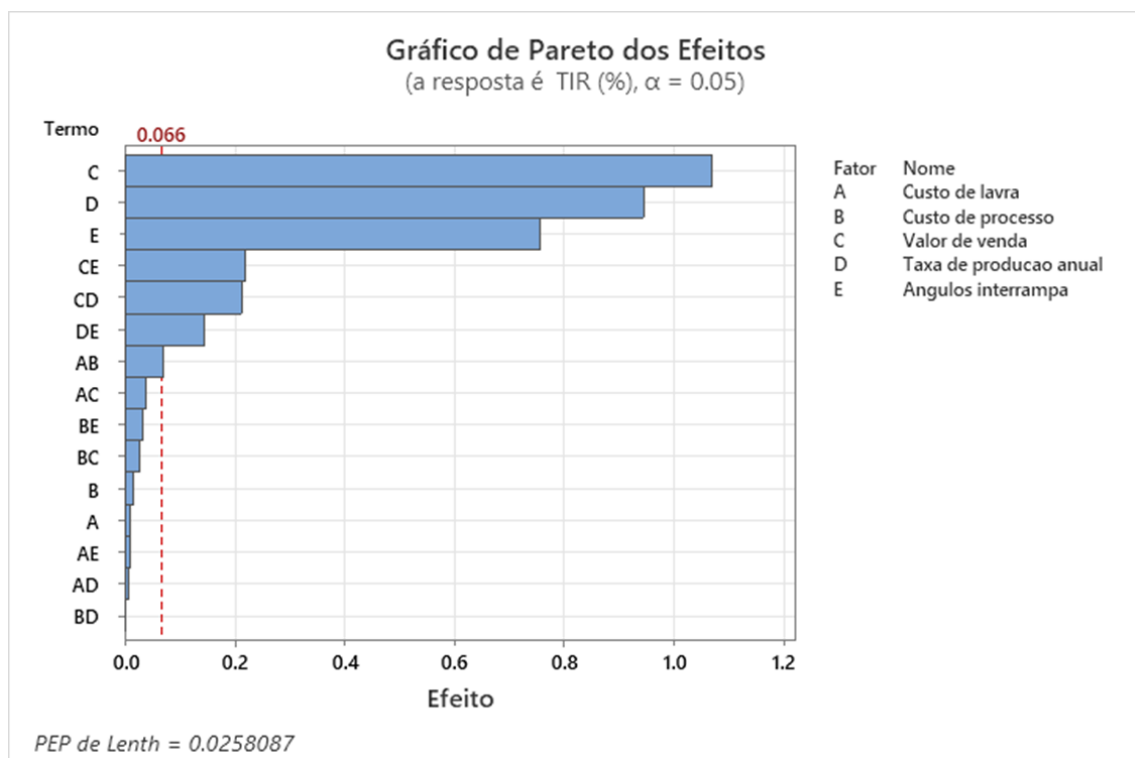


Figura 6.7: Gráfico de Pareto dos efeitos para a taxa interna de retorno.

Fonte: Contribuição do autor.

Para analisar os fatores que mais influenciaram no resultado da TIR, foi gerado um gráfico de efeitos principais (Figura 6.8). O valor de venda é o fator que mais influencia essa métrica financeira, conforme observado, e a variação dos níveis desse parâmetro causa uma grande alteração no valor da TIR, seguido pela taxa de produção e pelos ângulos interrampa.

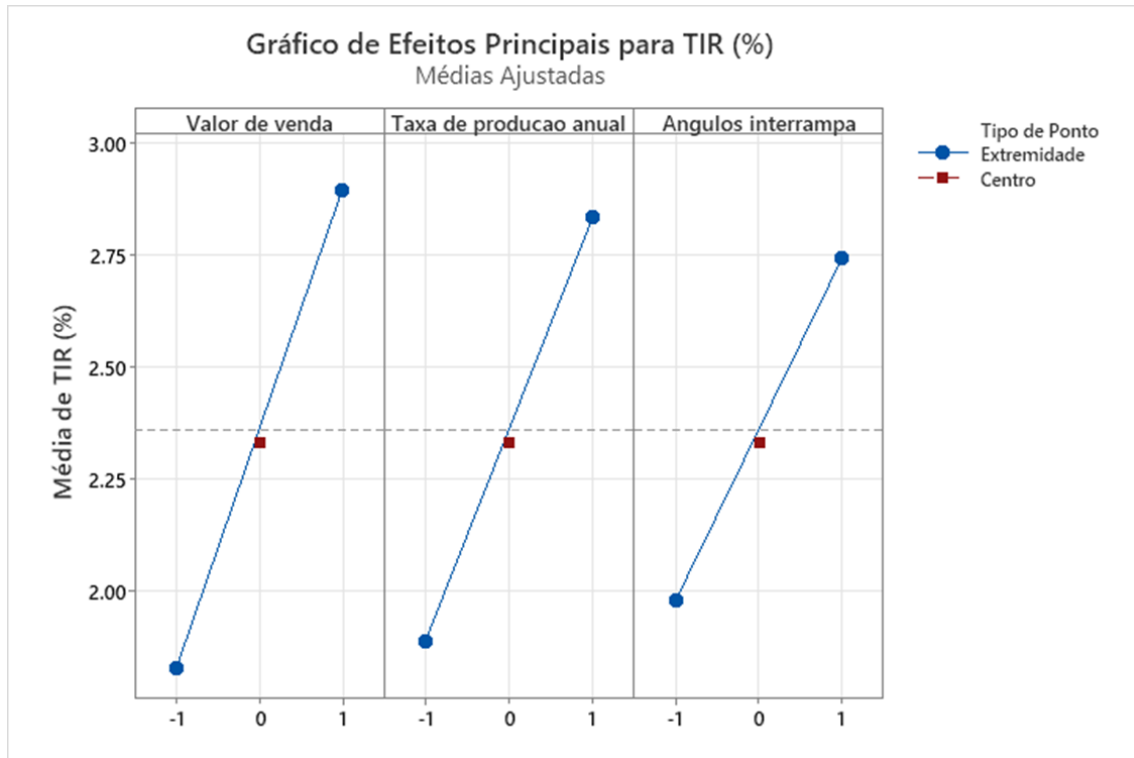


Figura 6.8: Gráfico de efeitos principais para a taxa interna de retorno.

Fonte: Contribuição do autor.

Portanto, para maximizar o valor da TIR os níveis dos parâmetros analisados mais adequados seriam:

- valor de venda: nível 1, que corresponde ao valor US\$1800 por tonelada de concentrado;
- taxa de produção anual: nível 1, que corresponde ao valor 2.16Mtpa;
- ângulos interrampa: nível 1, que corresponde aos valores 42° (para o *overburden* nos setores 1, 2, 4 e 5), 44.4° (para o *overburden* no setor 3), 66° (para a rocha fresca nos setores 1, 2, 4 e 5) e 62.4° (para a rocha fresca no setor 3).

6.3.1.3 Período de *Payback*

O gráfico de Pareto dos efeitos gerado para o período de *payback* é apresentado na Figura 6.9. Os fatores que mais influenciam na variável período de *payback* estão representados pelas barras C, D e E e foram, respectivamente, o valor de venda, a taxa de produção anual e os ângulos interrampa.

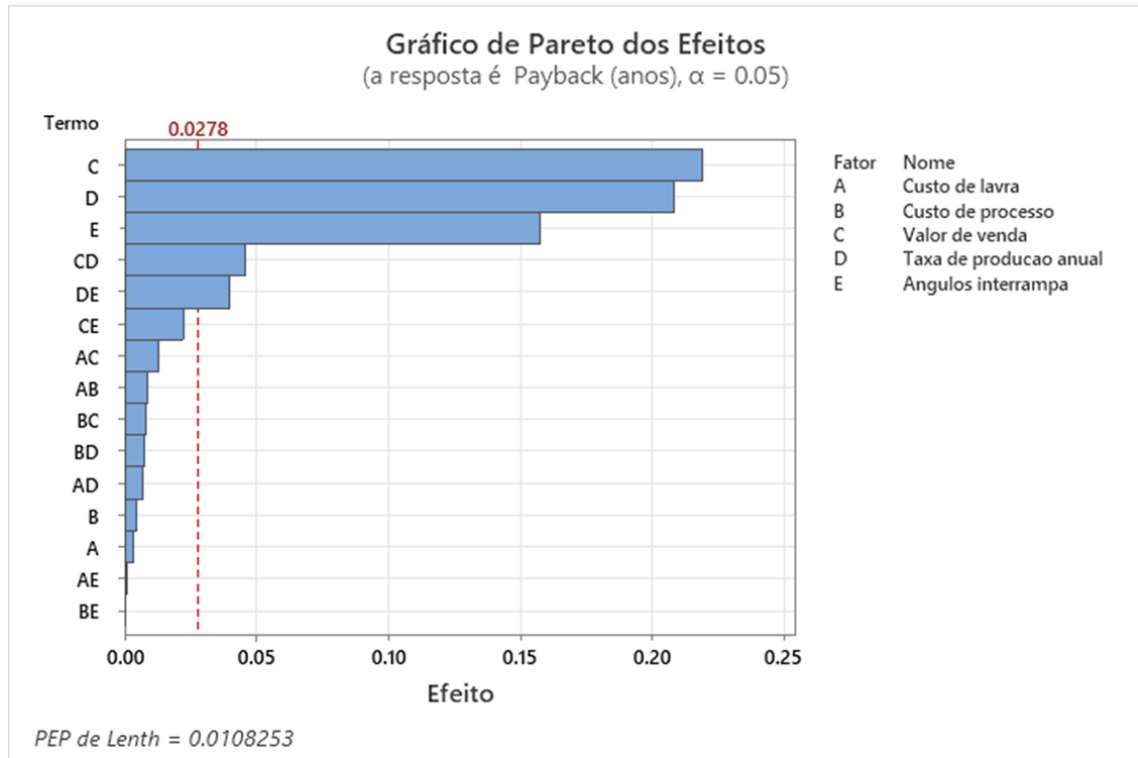


Figura 6.9: Gráfico de efeitos principais para o período de *payback*.

Fonte: Contribuição do autor.

Diferentemente das outras métricas analisadas até então, o valor do período de *payback* é mais vantajoso nos níveis em que são retornados os menores valores para a variável resposta em questão. Na Figura 6.10, no gráfico de efeitos principais, observa-se que, embora a diferença entre a relevância dos fatores valor de venda e taxa de produção anual seja pequena, o fator valor de venda é mais influente. Além disso, nota-se que a variação do ângulo de interrampa é o terceiro na ordem de relevância.

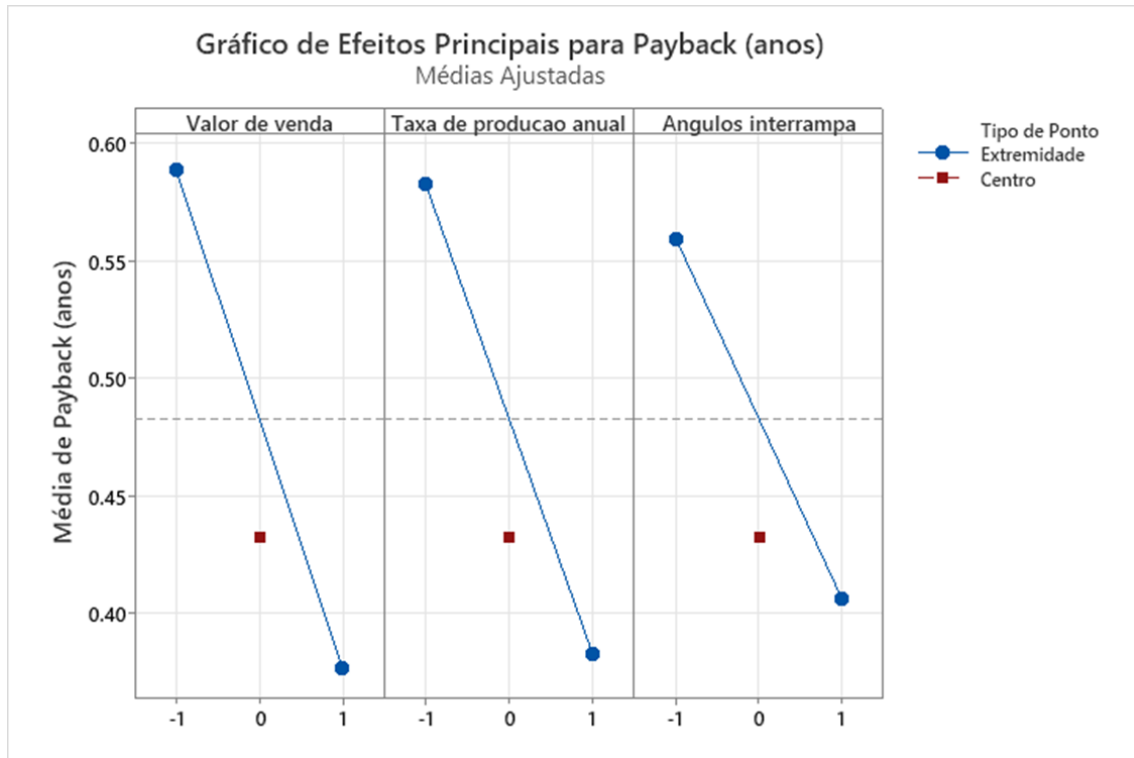


Figura 6.10: Gráfico de efeitos principais para o *payback*.

Fonte: Contribuição do autor.

Dessa forma, para melhores resultados na variável resposta *payback* os níveis dos parâmetros analisados mais adequados seriam:

- custo de lavra: nível -1, que corresponde aos valores US\$1.76 por tonelada lavrada de minério e US\$1.50 por tonelada lavrada de estéril;
- valor de venda: nível 1, que corresponde ao valor US\$1800 por tonelada de concentrado;
- taxa de produção anual: nível 1, que corresponde ao valor 2.16Mtpa;
- ângulos interrampa: nível 1, que corresponde aos valores 42° (para o *overburden* nos setores 1, 2, 4 e 5), 44.4° (para o *overburden* no setor 3), 66° (para a rocha fresca nos setores 1, 2, 4 e 5) e 62.4° (para a rocha fresca no setor 3).

6.3.1.4 Índice de rentabilidade (IR)

Conforme o gráfico de Pareto dos efeitos apresentado na Figura 6.11, os parâmetros que mais influenciam a métrica financeira índice de rendimento foram o valor de venda, os ângulos interrampa, a taxa de produção anual e a interação entre os fatores valor de venda e ângulos interrampa.

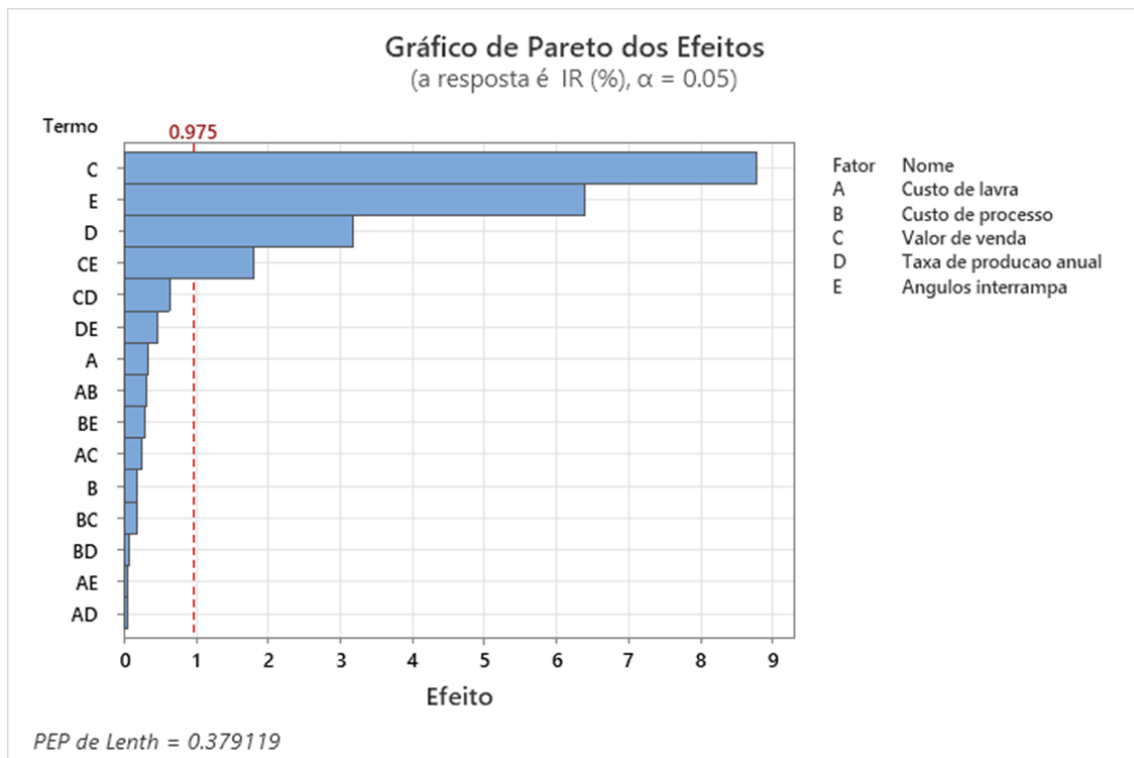


Figura 6.11: Gráfico de Pareto dos efeitos para o índice de rentabilidade.

Fonte: Contribuição do autor.

No gráfico de efeitos principais gerado para o parâmetro taxa de produção (Figura 6.12), é possível observar que no nível mais baixo, referente a 1.44Mtpa, o índice de rentabilidade é menor enquanto no nível mais alto, referente a 2.16Mtpa, o índice de rentabilidade é maior.

A Figura 6.13 contempla o resultado do gráfico de interação para o valor de venda e para os ângulos interrampa. É possível observar que ocorre o mesmo que aconteceu para a variável resposta reserva, ou seja, quanto mais suaves forem os ângulos utilizados, maior será a influência do valor de venda no índice de rentabilidade.

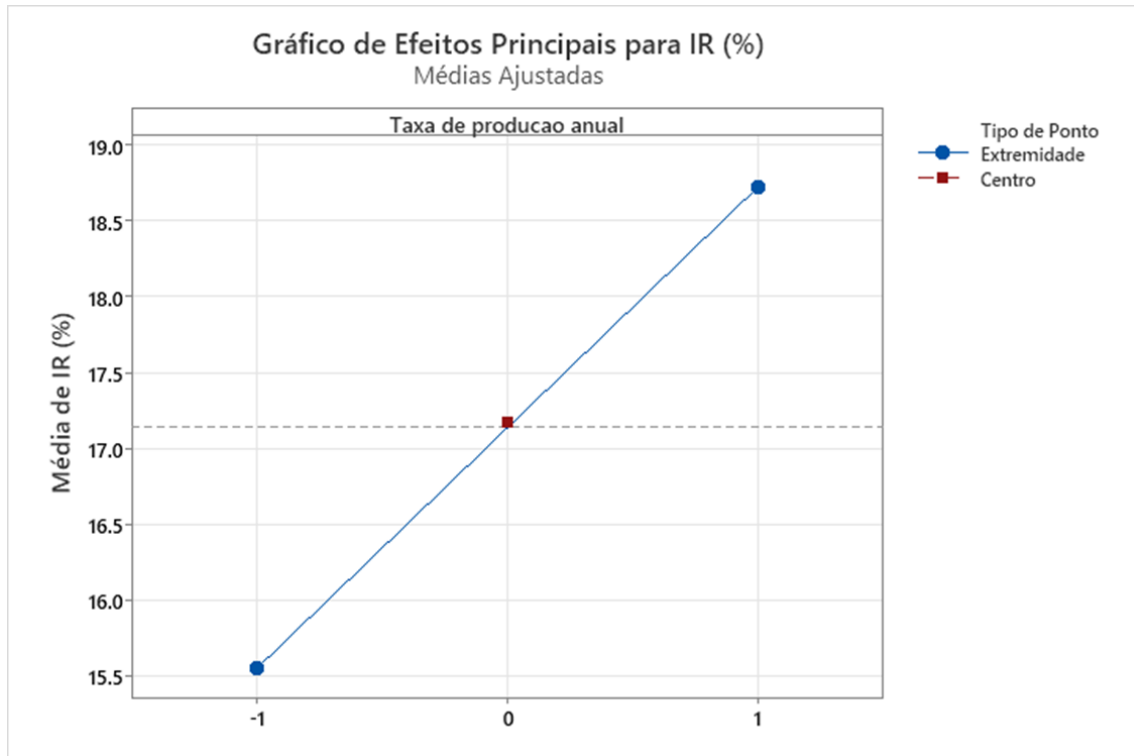


Figura 6.12: Gráfico de efeitos principais para o índice de rentabilidade. autor.

Fonte: Contribuição do autor.

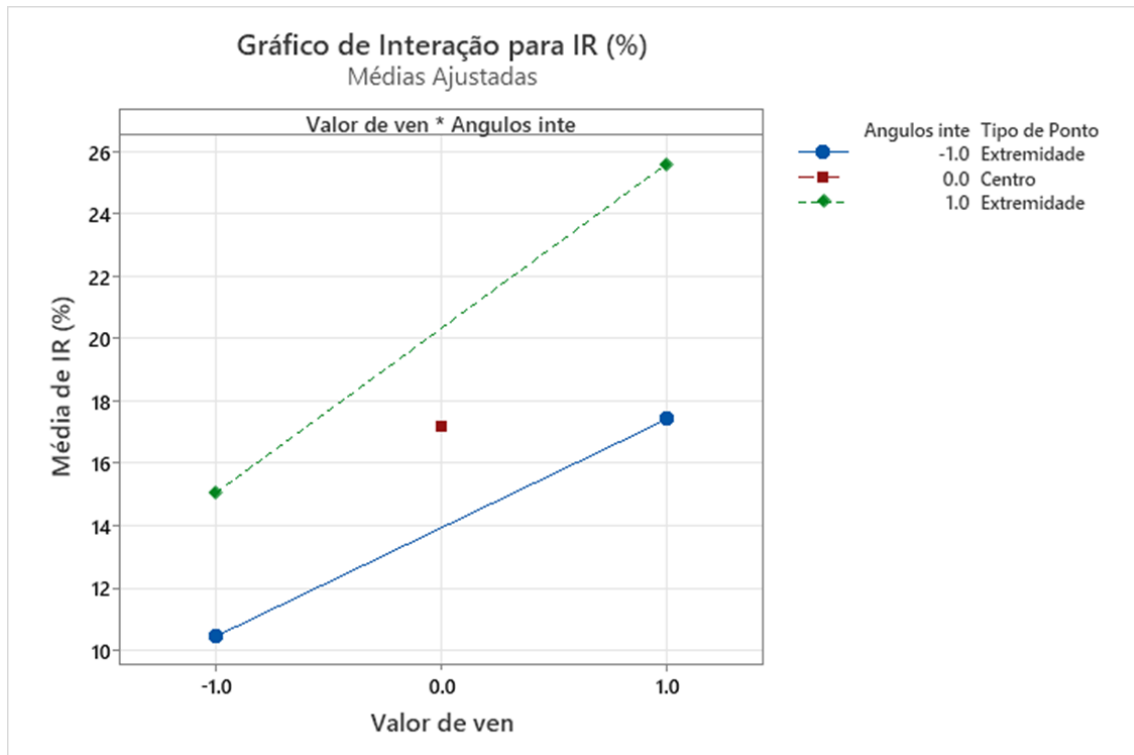


Figura 6.13: Gráfico de interação para o índice de rentabilidade.

Fonte: Contribuição do autor.

Consequentemente, para melhores resultados na variável resposta do índice de rendimento os níveis dos parâmetros analisados mais adequados seriam:

- custo de lavra: nível -1, que corresponde aos valores US\$1.76 por tonelada lavrada de minério e US\$1.50 por tonelada lavrada de estéril;
- valor de venda: nível 1, que corresponde ao valor US\$1800 por tonelada de concentrado;
- taxa de produção anual: nível 1, que corresponde ao valor 2.16Mtpa;
- ângulos interrampa: nível 1, que corresponde aos valores 42° (para o *overburden* nos setores 1, 2, 4 e 5), 44.4° (para o *overburden* no setor 3), 66° (para a rocha fresca nos setores 1, 2, 4 e 5) e 62.4° (para a rocha fresca no setor 3).

A partir da avaliação da influência dos parâmetros utilizados no planejamento de experimentos em termos das métricas financeiras, foi possível elaborar a Tabela 6.12, elucidada a seguir. Os parâmetros que mais influenciam nas métricas financeiras estudadas são, respectivamente, o valor de venda, os ângulos interrampa e a taxa de produção. O valor de venda é o parâmetro que causa o maior impacto, enquanto a taxa de produção causa um impacto menor. Entretanto, é importante ressaltar que a diferença de impacto dos parâmetros nas variáveis resposta varia entre as métricas financeiras avaliadas.

Tabela 6.12: Fatores que possuem maior influência nas métricas financeiras estudadas.

Variável resposta	Fatores
VPL	C, D e E
TIR	C, D e E
Período de <i>payback</i>	C, D e E
IR	C, D, E e CE

Fonte: Contribuição do autor.

6.4 Análise dos resultados

Os parâmetros analisados na dissertação em questão (taxa de produção, preço de venda, ângulos interrampa, custo de lavra e custo de processamentos) foram definidos de acordo com os dados de um projeto de lítio real com o nível de pré-viabilidade.

Por se tratar de um projeto existente, foram escolhidos parâmetros que possuíam uma maior tendência de variabilidade de acordo com os estudos realizados. As variáveis mais conhecidas no projeto não foram objeto de estudo neste caso. Um exemplo de variável conhecida é o teor de corte, o valor utilizado foi determinado pela equipe de processos e por estratégias de mercado.

Os resultados obtidos com a abordagem robusta demonstraram quais variáveis tiveram maior impacto na análise econômica e ressaltaram que a obtenção de resultados mais precisos para essas variáveis implica em uma avaliação econômica mais assertiva para o projeto. No entanto, como se tratam de variáveis independentes em que um valor máximo não foi atingido, como por exemplo uma taxa de produção máxima que tornaria o projeto inviável, é possível que o desempenho da abordagem tenha sido simplificado.

Desse modo, a utilização de variáveis correlacionadas e exploradas em intervalos maiores poderia trazer um resultado mais assertivo com relação aos possíveis ganhos da abordagem robusta utilizada.

7. CONCLUSÕES

As análises conduzidas e apresentadas nessa dissertação, com dados referentes a um projeto de lítio, atingiram os objetivos propostos conforme detalhado a seguir:

- As cavas ótimas e o sequenciamento de lavra foram definidos tanto pela abordagem clássica quanto pela abordagem robusta do planejamento de lavra, a fim de gerar os dados necessários para a realização da avaliação econômica.
- A avaliação econômica foi realizada com os dados obtidos pela abordagem clássica e pela abordagem robusta, e foi efetuada uma comparação entre os resultados obtidos.
- Para classificar os parâmetros estudados na abordagem robusta, foi analisada a influência de cada um deles nas métricas financeiras avaliadas na análise econômica.

Conforme mencionado, a dissertação inicialmente avaliou a abordagem clássica por meio da realização da otimização de cava e do sequenciamento de lavra. A escolha da cava ótima para essa abordagem foi fundamentada em uma estratégia de menor risco, refletindo-se na seleção da cava com o fator de receita de 0.7, uma vez que as cavas com fator de receita maiores não demonstraram ganhos significativos. Além disso, foi realizado o sequenciamento de lavra e foram obtidas as cavas anuais até a exaustão da reserva do projeto.

Posteriormente, a abordagem do planejamento de lavra robusto foi realizada, com os parâmetros estudados, incluindo o valor de venda, o custo de lavra, o custo de processamento, os ângulos interrampa e a taxa de produção. Com os resultados da etapa de otimização foi possível avaliar a influência dos parâmetros estudados na reserva, sendo os fatores que mais influenciaram, o valor de venda, os ângulos interrampa, a interação entre os efeitos valor de venda e ângulos interrampa, e o custo de lavra.

Dentre as etapas realizadas na abordagem do planejamento de lavra robusto, destaca-se o planejamento de experimentos desenvolvido para viabilizar a definição dos cenários com os parâmetros a serem estudados.

Os resultados da análise econômica efetuada para ambas as abordagens revelaram que vários cenários da abordagem robusta superaram os resultados da abordagem clássica, principalmente quando o preço de venda do concentrado foi aumentado em 20% em relação à abordagem clássica.

Ademais, a partir dos cenários com resultados financeiros superiores ao da abordagem

clássica, observou-se uma correlação entre a taxa de produção e os ângulos interrampa. Isso indica que uma taxa de produção maior está associada a resultados mais favoráveis com ângulos interrampa mais suaves ou agressivos, ao contrário da taxa de produção menor, que, juntamente com os ângulos interrampa mais suaves, não apresentou resultados satisfatórios em comparação com os oferecidos pela abordagem clássica.

O cenário 15 da abordagem robusta do planejamento de lavra destacou-se como o mais promissor. A análise da influência dos parâmetros estudados no planejamento de experimentos nas métricas financeiras avaliadas (VPL, TIR, período de *payback* e IR) revelou que os fatores que mais influenciam na avaliação econômica para o empreendimento de lítio avaliado são o valor de venda, os ângulos interrampa e a taxa de produção anual. O valor de venda é o parâmetro que causa o maior impacto, enquanto a taxa de produção causa um impacto menor, mas ainda considerável, entre os fatores que afetam a avaliação econômica.

Esse resultado, referente aos parâmetros que mais influenciam na avaliação econômica do projeto, ressalta a necessidade de um investimento no detalhamento do estudo de mercado, dos parâmetros geotécnicos e da avaliação da capacidade de produção anual para esse empreendimento. A obtenção de resultados mais precisos nessas áreas implica em uma avaliação econômica mais assertiva para o projeto, reduzindo possíveis desvios, uma vez que os parâmetros de maior impacto teriam os seus valores mais bem definidos.

Os resultados de uma melhor avaliação são cruciais para uma análise econômica precisa e são capazes de subsidiar decisões estratégicas na fase de planejamento de um projeto de mineração.

De acordo com o apresentado na dissertação, é possível concluir que a abordagem robusta do planejamento de lavra é capaz de fornecer resultados mais promissores do que os oferecidos pela abordagem clássica do planejamento de lavra. Isso ocorre porque a abordagem robusta permite a análise e consideração dos parâmetros utilizados no planejamento de lavra durante a avaliação econômica, possibilitando a definição dos fatores mais interessantes de acordo com as métricas financeiras que se deseja maximizar em cada projeto.

É importante ressaltar que, apesar das vantagens mencionadas, ainda existe a desvantagem em relação ao maior tempo de execução da abordagem robusta em comparação com a abordagem clássica. Esse tempo é influenciado pela quantidade de parâmetros a serem estudados e pela técnica escolhida do planejamento de experimentos.

Por último, destaca-se a importância de considerar a abordagem robusta e a influência dos parâmetros do planejamento de lavra na avaliação econômica, uma vez que os resultados obtidos com essa abordagem possuem o potencial de orientar decisões estratégicas para maximizar a viabilidade econômica de projetos de mineração. Essas escolhas englobam investimentos em estudos para o detalhamento de áreas de conhecimento específicas, principalmente em fases de um projeto de mineração em que os parâmetros podem variar mais de 20% na prática.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em busca de avanços no estudo dos benefícios da abordagem robusta para o planejamento de lavra realizados nessa pesquisa, recomenda-se realizar a operacionalização da cava para o cenário obtido como o mais promissor, a fim de verificar os impactos observados na análise econômica diante dessa alteração.

Ademais, poderiam ser estudados outros parâmetros no planejamento de experimentos, como por exemplo a diluição do minério. Por fim, também pode ser avaliada a utilização de custos unitários diferentes de acordo com a taxa de produção utilizada em cada cenário, além de desenvolver um detalhamento dos custos de capital utilizado para verificar possíveis ganhos na análise econômica e aumentar o nível de assertividade da abordagem.

REFERÊNCIAS

- ARANDA, Mariela Haidée; JUNG, Carlos Fernando; TEN CATEN, Carla Schwengber. Determinação dos parâmetros operacionais de uma inovação tecnológica através da utilização do Design of Experiments–DOE. **Revista Liberato**, v. 8, n. 9, p. 09-16, 2007.
- ARVIDSSON, Martin; GREMYR, Ida. Principles of robust design methodology. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 1, p. 23-35, 2008.
- AUSIMM. **Cost estimation handbook**. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012.
- AZEVEDO, Ricardo Cabral de. **Modelo de gerenciamento de informações na cadeia de valor de mineração e de petróleo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- BAI, Xiaoyu; TURCZYNSKI, George; BAXTER, Nathaniel; PLACE, David; SINCLAIR-ROSS, Hamish; READY, Shawn. Pseudoflow method for pit optimization. **Whitepaper Geovia Whittle Dassault Systems; Dassault Systemes: Waltham, MA, USA**, 2017.
- CACCETTA, Louis; HILL, Stephen P. An application of branch and cut to open pit mine scheduling. **Journal of global optimization**, v. 27, n. 2, p. 349-365, 2003.
- CAMPOS, Pedro Henrique Alves. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.
- CARMO, Frederico Augusto Rosa do; CURI, Adilson; SOUSA, Wilson Trigueiro de. Otimização econômica de explorações a céu aberto. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, p. 317-321, 2006.
- CARRICONDE, Milton Correa. **Verificação da aplicabilidade do programa MAFMO como ferramenta auxiliar na estimativa de custos em projetos conceituais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.
- CAVAZZUTI, Marco. Design of experiments. **Optimization methods: from theory to design scientific and technological aspects in mechanics**, p. 13-42, 2013.
- CURI, Adilson. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, 2017.
- DAGDELEN, Kadri. Open pit optimization-strategies for improving economics of mining projects through mine planning. In: **17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey. 2001**. p. 121.
- DA MATA, Jônatas Franco Campos; Martins, Sílvia de Castro; Morais, Saulo Sabino; Nader, Alizeibek Saleimen; Mazzinghy, Douglas Batista. **Planejamento de lavra utilizando sequenciamento direto de blocos com inclusão de variáveis geometalúrgicas**. 2021.
- D'ARRIGO, Rafael Freitas. **Modelo de estimativa de custos operacionais e de capital em projetos de mineração em fase conceitual baseado no modelo de O'Hara**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.
- DE OLIVEIRA MIRANDA, Alex Flávio. **Sequenciamento direto de blocos em modelos estocásticos com multiminas e multidestinos**. Dissertação de Mestrado. Universidade

Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

DO CARMO, Frederico Augusto Rosa. **Metodologia para planejamento de cavas finais a minas a céu aberto otimizadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2001.

ENDLER, Luciana. Avaliação de empresas pelo método de fluxo de caixa descontado e os desvios causados pela utilização de taxas de desconto inadequadas. **ConTexto-Contabilidade em Texto**, v. 4, n. 6, 2004.

FAROOQ, Muhammad Arsalan, TAVARES, Sérgio; NÓVOA, Henriqueta; ARAÚJO, Antônio Hitalo Mamedio. An application of Knowledge Management in Design Structure Matrix for a process improvement phase. **MARLE, F.; JANKOVIC, M.; MAURER, M.**, p. 287-296, 2014.

FAROOQ, Muhammad Arsalan; NÓVOA, Henriqueta; ARAÚJO, Antônio Hitalo Mamedio; TAVARES, Sérgio. An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. **European Research on Management and Business Economics**, v. 22, n. 3, p. 155-161, 2016.

GALDI, Fernando Caio; TEIXEIRA, Aridélmo José Campanharo; LOPES, Alexsandro Broedel. Análise empírica de modelos de valuation no ambiente brasileiro: fluxo de caixa descontado versus modelo de Ohlson (RIV). **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 19, p. 31-43, 2008.

GITMAN, Lawrence Jeffrey. **Princípios de Administração Financeira-12ª Edição**, 2010.

GROENEVELD, B.; TOPAL, Erkan; LEENDERS, B. Robust, flexible and operational mine design strategies. **Mining Technology**, v. 121, n. 1, p. 20-28, 2012.

HAQUE, Md Aminul; TOPAL, Erkan; LILFORD, Eric. Evaluation of a mining project under the joint effect of commodity price and exchange rate uncertainties using real options valuation. **The Engineering Economist**, v. 62, n. 3, p. 231-253, 2017.

HUSTRULID, Willian; KUCHTA, Mark. **Open Pit Mine Planning & Design.: SME**. Edição 3, Vol 1. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995. 631 p.

JANKOVIC, Aleksandar; CHAUDHARY, Gaurav; GOIA, Francesco. Designing the design of experiments (DOE)—An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. **Energy and Buildings**, v. 250, p. 111298, 2021.

JOHNSON, Thys Brentwood. **Optimum open pit mine production scheduling**. University of California, Berkeley, 1968.

JUNIOR, Cássio Murilo Borges. **Planejamento de lavra preliminar para uma ocorrência de ouro no estado de Nevada, EUA**. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2017.

KAPLINSKY, Raphael; MORRIS, Mike. **A handbook for value chain research**. Brighton: University of Sussex, Institute of Development Studies, 2000.

KENNEDY, Bruce A. (Ed.). **Surface mining**. SME, 1990.

KHALOKAKAIE, Reza. **Computer-aided optimal open pit design with variable slope angles**. Tese de Doutorado. University of Leeds. 1999.

KUMRAL, Mustafa. Robust stochastic mine production scheduling. **Engineering Optimization**, v. 42, n. 6, p. 567-579, 2010.

MALIAKAL, Jose. Data Reduction with Design of Experiments (DoE) for Data Mining Pre-Processing. In: **Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology**. 2007.

MATHEWS, Paul G. Design of Experiments with MINITAB. Quality Press, 2004.
MONTGOMERY, Douglas; KEATS, John Bert; PERRY, Leonard; THOMPSON, James. Using statistically designed experiments for process development and improvement: an application in electronics manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 16, n. 1, p. 55-63, 2000.

NADER, Alizeibek Saleimen. **Monitoramento de taludes via radar SSR como indicador chave de desempenho geotécnico integrado às atividades primárias da cadeia de valor mineral**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NADER, Alizeibek Saleimen. Notas de Aula. **Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2022.

PERONI, **Rodrigo de Lemos**. **Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

PESSOA, Gerisval Alves. **Avaliação de projetos de mineração utilizando a teoria das opções reais em tempo discreto: um estudo de caso em mineração de ferro**. Tese de Doutorado. 2006.

PINTO, Cláudio Lúcio Lopes; DUTRA, João Ildefonso Gusmão. Introdução ao planejamento e operação de lavra (a céu aberto e subterrânea). **Belo Horizonte: UFMG**, 2008.

PONIEWIERSKI, Julian. Block model knowledge for mining engineers—an introduction. <https://www.deswik.com/wp-content/uploads/2019/07/Block-model-knowledge-formining-engineers-An-introduction.pdf>. [Accessed 15 June 2023], v. 125, n. 345, p. 0.86, 2019.

RANGA, Sonam; JAIMINI, Manish; SHARMA, Sanjay Kumar; CHAUHAN, Bhupendra Singh; KUMAR, Amit. A review on Design of Experiments (DOE). **Int. J. Pharm. Chem. Sci**, v. 3, n. 1, p. 216-24, 2014.

RENDU, Jean-Michel. **An introduction to cut-off grade estimation**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2014.

RUDENNO, Victor. **The mining valuation handbook 4e: mining and energy valuation for investors and management**. John Wiley & Sons, 2012.

RUNGE, Ian Charles. **Mining economics and strategy**. SME, 1998.

SILVA, Nelson Camurugi Senhorinho. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

SMITH, Gilbert. 2012. Strategic long-term planning in mining. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 112(9), 761-774.

SOUZA, Felipe Ribeiro. **Sequenciamento direto de blocos: impactos, limitações e benefícios para aderência ao planejamento de lavra**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

SOUZA, Felipe Ribeiro. **Sequenciamento direto de blocos com ênfase em custos de transporte**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

TORRES, Vidal Félix Navarro; NADER, Alizeibek Saleimen; ORTIZ, Carlos Enrique Arroyo; SOUZA, Felipe Ribeiro; BURGARELLI, Hudson Rodrigues; CHAVES, Leonardo Soares; CARVALHO, Luiz Alberto; CÂMARA, Taís Renata; ZANETTI, Eunírio, GALERY, Roberto. Classical and stochastic mine planning techniques, state of the art and trends. **REM-International Engineering Journal**, v. 71, p. 289-297, 2018.

WHITTLE, Jeff. Open Pit Optimization, **Surface Mining**. 2 nd Edition. SME – Online Digital Library. 1990.

WHITTLE, David; WHITTLE, Jeff; WHARTON, Chris; HALL, George. Strategic Mine Planning. Melbourne: **Gemcom Software International Inc**, 2005.

WHITTLE, Jeff. The global optimiser works—what next? **Advances in applied strategic mine planning**, p. 31-37, 2018.