

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS EM PROJETOS DE MINERAÇÃO: ESTUDO
EXPLORATÓRIO INTEGRANDO ASPECTOS TÉCNICOS E NÃO TÉCNICOS**

**MARCO ANTONIO KONRAT MARTINS
ENGENHEIRO DE MINAS**

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

**PORTO ALEGRE
2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS EM PROJETOS DE MINERAÇÃO: ESTUDO
EXPLORATÓRIO INTEGRANDO ASPECTOS TÉCNICOS E NÃO TÉCNICOS**

**MARCO ANTONIO KONRAT MARTINS
ENGENHEIRO DE MINAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica

Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Dr. Carlos Petter

PORTO ALEGRE

2020

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública, analisada e julgada adequada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aprovado _09_/_07_/2020.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Carlos Petter

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rejane Maria Candiota Tubino (PPGE3M / UFRGS)

Prof. Dr. Guilherme Marques (IPH / UFRGS)

Prof. Dr. Vidal Félix Navarro Torres (Instituto Tecnológico Vale / ITV)

COORDENADOR

Prof. Dr. Afonso Reguly

RESUMO

O setor mineral passa por um crescente questionamento em relação a aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável. Tais aspectos podem ser definidos como não-técnicos ou intangíveis, relacionados a aspectos sociais e partes interessadas, em contraste a aspectos técnicos ou tangíveis, relacionados aos recursos geológicos, de engenharia e impactos ambientais quantificáveis. Há evidências da materialidade dos aspectos sociais e ambientais a um empreendimento mineiro causando atrasos, perdas de produtividade e maiores custos operacionais e de capital. Torna-se, portanto, necessária a consideração de tais fatores não-técnicos desde estágios iniciais de avaliação de um projeto. Abordagens tradicionais tendem a enfatizar aspectos tangíveis e financeiros. O objetivo deste estudo é explorar a aplicação de uma técnica para avaliar projetos que permita a inclusão de tais aspectos técnicos e não-técnicos bem como suas interrelações. Tal ferramenta permite uma avaliação sistêmica de fatores-chave para o desenvolvimento sustentável na mineração como geração de rejeitos, uso da água e energia, além do impacto de possíveis conflitos sociais. Para isso, é proposto o uso de simulação por dinâmica. O modelo desenvolvido foi dividido em quatro subsistemas: produção (relativo ao processo produtivo do bem mineral), ambiental, financeiro e socioeconômico. Realizou-se um estudo de caso a partir de dados conhecidos de um projeto de cobre combinado a valores de referência da literatura (e.g. Inventário de Ciclo de Vida), gerando um modelo com 222 variáveis. Nove indicadores foram propostos para ilustrar a performance do projeto sob aspectos técnicos e socioeconômicos. Além de reproduzir os resultados de um fluxo de caixa descontado, o modelo baseado em dinâmica de sistemas se mostra flexível e robusto para lidar com a complexidade de fatores técnicos e não-técnicos.

Palavras-chave: Mineração, Sustentabilidade, Dinâmica de Sistemas, Cobre

ABSTRACT

The mineral sector is going through increasing scrutiny regarding Sustainable Development aspects. Such aspects can be defined as non-technical or intangibles, as related to stakeholders, whereas technical or tangible aspects can be defined as factors related to the geological setting, engineering and environmental impacts. In the context of projects evaluation at scoping stage, there is mounting evidence of the intangible risks' materiality to projects development. Thus, the consideration of such non-technical aspects from the outset becomes critical. Traditional approaches tend to emphasize geological and engineering aspects. The goal of this study is to create a tool for supporting the evaluation of projects including technical and non-technical aspects as well as interrelationships therein. Such framework can improve the systemic evaluation of key factors as well as simulate different scenarios. A Literature Review highlighted different methods such as Life Cycle Assessments (LCA) e System Dynamics (SD) as tools to manage problems of that nature. Data sources as well as reference values were collected and utilized to format a methodology based in SD. The model was divided in 4 subsystems: production (entailing the productive process of the raw material), environmental, financial and socioeconomic. This model was applied to a copper project data as a case study and combined with complementary reference values (e.g. Life Cycle Inventory), generating a model with 222 variables. In addition, nine indicators were proposed to illustrate the performance of the project under different technical, environmental and socioeconomic factors. Besides the reproduction of a Discounted Cash Flow model, the System Dynamics-based model also showed flexibility and robustness to deal with the complexity of technical and non-technical factors.

Keywords: Mining, sustainability, ESG, System Dynamics, Copper

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desalinhamento de perspectivas de diferentes stakeholders na mineração (Espinoza & Morris, 2017).....	26
Figura 2 - Interesses, desafios e consequências de diferentes stakeholders na mineração (adaptado de Reggio & Lane, 2012)	27
Figura 3 - Representação das três dimensões de sustentabilidade (Rendu, 2016) ..	35
Figura 4 - Balanço de água simplificado na mineração (adaptado de Rankin, 2011)	40
Figura 5 - Fluxos de materiais e energia (entradas e saídas) típicos em uma operação (Rankin, 2011)	44
Figura 6 - Correlação entre Produção de cobre (t/ano) e consumo de energia (PJ/ano) a partir de Northey, 2013	48
Figura 7 - Relação de tipo de fonte de eletricidade e intensidade de emissões equivalentes (adaptado de Northey, 2013).....	49
Figura 8 - Correlação entre intensidade de consumo energético e emissões GEE a partir de Northey, 2013 - Linha vermelha representa regressão para fontes de eletricidade a carvão e linha verde para o resto (hidro, híbridas e grids locais)	50
Figura 9 - Componentes de um sistema de gestão de rejeitos (adaptado de Rankin, 2011).....	51
Figura 10 - Níveis de identificação e limites de confiança da comunidade com o projeto (Thomson & Boutillier, 2011).....	54
Figura 11 - Classificação McKelvey de recursos minerais (Revuelta, 2018).....	69
Figura 12 - - Integração de aspectos técnicos e não-técnicos e sua expressão na definição de reservas (Sykes & Trench, 2014)	70
Figura 13 - Etapas de um estudo em dinâmica de sistemas (adaptado de Forrester, 1994).....	73
Figura 14 - Exemplo de diagrama de loops causais - arquétipo de impacto da aceitação de um projeto no seu valor econômico (Fonte: o autor)	74

Figura 15 - Estrutura metodológica proposta	79
Figura 16 - Subsistemas do modelo e perfil de variáveis associadas	81
Figura 17 - Diagrama de Loops Causais - Subsistema de Produção	82
Figura 18 - Subsistema de Produção em ambiente de dinâmica de sistemas	83
Figura 19 - Complemento do subsistema de produção com inputs primários de produção (energia, insumos etc.)	84
Figura 20 - Diagrama de Loops Causais - Subsistema Financeiro	85
Figura 21 - Subsistema Financeiro em ambiente de dinâmica de sistemas – sem fluxo de caixa e investimentos	85
Figura 22 - Fluxo de caixa e investimento modelados no subsistema financeiro	86
Figura 23 - Diagrama de Loops Causais – Subsistema Ambiental	87
Figura 24 - Subsistema Ambiental modelado em ambiente de dinâmica de sistemas	87
Figura 25 - Diagrama de loops causais – Subsistema Socioeconômico	88
Figura 26 - Subsistema Socioeconômico modelado em ambiente de dinâmica de sistemas	89
Figura 27 - Lógica de conflitos e suspensão do projeto modelados em ambiente de dinâmica de sistemas	89
Figura 28 - Caso inicial - taxas de produção e geração de estéril e rejeito	95
Figura 29 - Caso inicial - principais custos de capital e operação	96
Figura 30 - Receita anual gerada pela venda de concentrado de cobre e subprodutos (ouro e prata)	96
Figura 31 - Nível de geração de renda anual por meio de impostos e investimentos locais	97
Figura 32 - Distribuição da frequência de conflitos simulados durante o desenvolvimento (pré-operação)	98

Figura 33 - Distribuição da frequência de conflitos simulados durante a operação ..	98
Figura 34 - Distribuição da existência de suspensões simuladas durante o desenvolvimento (pré-operação).....	99
Figura 35 - Distribuição da existência de suspensões simuladas durante a operação	99
Figura 36 - VPL do caso determinístico (à esquerda) e do caso simulado com 2000 realizações (à direita).....	100
Figura 37 - Caso probabilístico - Valor Presente Líquido	101
Figura 38 - Resultado da simulação com perfil de 'risco social' conforme Tabela 29	101
Figura 39 - Caso inicial - Taxa interna de retorno.....	102
Figura 40 - Caso Inicial - Eficiência Material	103
Figura 41 - Caso probabilístico - Eficiência Material.....	104
Figura 42 - Caso Inicial - Ineficiência de Extração.....	105
Figura 43 - Caso Probabilístico - Ineficiência de Extração	105
Figura 44 - Estresse de água	106
Figura 46 – Caso Inicial - Intensidade de Emissões de CO2 equivalente (kgCO2eq/ton concentrado).....	107
Figura 47 - Caso Inicial – Divisão contribuição de diferentes inputs para emissões de CO2	108
Figura 48 - Caso probabilístico - Intensidade de Emissões de CO2 equivalente (kgCO2eq/ton concentrado)	108
Figura 49 - Caso Inicial - Demanda Primária de Energia (MJ/ ton concentrado)	109
Figura 50 - Caso probabilístico - Demanda Primária de Energia	109
Figura 51 - Contribuições para a demanda primária de energia (caso inicial)	110
Figura 52 - Caso Inicial - Potencial de Neutralização Líquido - Critério NP/AP	112

Figura 53 - Caso Inicial - Potencial de Neutralização Líquido - Critério NNP.....	112
Figura 54 - Caso Inicial - Receita sobre custos sociais	113
Figura 55 - Caso probabilístico - Receita sobre custos sociais.....	114
Figura 56 - Caso inicial - contribuição local por tonelada de concentrado de cobre	115
Figura 57 - Caso probabilístico - contribuição local por tonelada de concentrado de cobre.....	115
Figura 58 - Simulador proposto de avaliação de projetos baseado em dinâmica de sistemas.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modificações na proposição de Taylor (1986) para estimativa de taxa de produção em função do tipo de mina	25
Tabela 2 - Fatores e categorias de risco típicos na mineração (Rendu, 2016)	28
Tabela 3 - Diferentes fatores de risco e contextos na literatura	29
Tabela 4 – Consequências de atrasos em projetos de mineração	30
Tabela 5 - Exemplo de categorias reportadas em relatórios de sustentabilidade com os critérios GRI (Antofagasta Minerals, 2018)	33
Tabela 6 - Fatores de risco no contexto de responsabilidade social corporativa (CSR) (Frederiksen, 2018).....	36
Tabela 7 - Indicadores ambientais na mineração na estrutura DPSIR (adaptado de Lottermoser, 2017).....	38
Tabela 8 - Valores de referência para consumo de água - Cobre e Ouro (Rankin, 2011)	40
Tabela 9 - Valores de referência para Demanda de Energia Bruta (DEB) (Rankin, 2011).....	45
Tabela 10 - Premissas para cálculo de DEB e resultados (a partir de Rankin, 2011)	46
Tabela 11 - Contribuição de energia por processo e estágio (cobre) a partir de Rankin (2011)	47
Tabela 12 - Tipos de rejeito na mineração (Rankin, 2011)	50
Tabela 13 - Ocorrência e resultados de conflitos por estágio do projeto (Davis & Franks, 2014).....	55
Tabela 14 – Exemplos práticos de custos associados a problemas socioambientais a partir de entrevistas de Davis & Franks (2014).....	56
Tabela 15 - Tipos de custos que podem ser incorridos por empresas em virtude de conflitos com a comunidade (adaptado de Davis & Franks, 2014)	57

Tabela 16 - Categorias de impacto em análise de impacto de ciclo de vida (tirado de de Haes, 2002)	61
Tabela 17 – Publicações relevantes de ACV na mineração na última década	62
Tabela 18 - Resultados da análise de inventário de ciclo de vida e categorias de impacto (International Copper Association)	64
Tabela 19 - Indicadores inspirados em MFA para a mineração (Lèbre, 2017)	65
Tabela 20 - Exemplos de fatores ESG (adaptado de Lins & Horowitz, 2007)	67
Tabela 21 - Prós e contras de dinâmica de sistemas (adaptado da European Foresight Platform)	76
Tabela 22 - Publicações aplicando DS na mineração	77
Tabela 23 - Subsistemas de análise propostos	81
Tabela 24 - Premissas gerais de cada caso.....	90
Tabela 25 - Premissas adotadas no modelo e fonte de referência dos valores utilizados	91
Tabela 26 - Valores de referência adotados para intensidade de CO2 utilizadas (Rötzer & Schmidt, 2020)	92
Tabela 27 – Distribuições associadas a variáveis-chave de projeto	93
Tabela 28 - Dados de entrada para cenário com risco social de conflitos e suspensão	93
Tabela 29 - Lógica de modelagem para risco de conflito e suspensão no software Stella Architect	94
Tabela 30 - Comparativo entre estudo de caso e valores de referência para demanda primária de energia e intensidade de emissões de CO2 equivalente	110

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Valor Presente Líquido.....	19
Equação 2 - Taxa Interna de Retorno	20
Equação 3 - Custo Médio Ponderado de Capital.....	22
Equação 4 - Retorno esperado de um ativo (CAPM - <i>Capital Asset Pricing Model</i>) .	23
Equação 5 - Formato de equação paramétrica a partir do modelo de custos de O'Hara	23
Equação 6 - Regra de Taylor - Vida útil da mina	24
Equação 7 - Regra de Taylor - Taxa de produção esperada	24
Equação 8 - Formatação geral para determinação paramétrica de taxa de produção	25
Equação 9 - Determinação da energia total incorporada para a produção de um metal (a partir de Rankin, 2011).....	45
Equação 10 - Determinação da taxa de variação de um estoque no tempo t.....	75
Equação 11 - Determinação de um estoque no tempo t sujeito a fluxos de entrada e saída	75
Equação 12 - Critérios de classificação de potencial de drenagem ácida	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV: Avaliação de Ciclo de Vida

CAPM: *Capital Asset Pricing Model*

CAPEX: Despesas com investimentos em bens de capital

CMCP: Custo Médio de Capital Ponderado

CSR: Corporate Social Responsibility

DLC: Diagrama de *Loops* Causais

DS: Dinâmica de Sistemas

ESG: *Environmental, Social and Governance*

FCD: Fluxo de Caixa Descontado

GEE: Gases de Efeito Estufa

MFA: Material Flow Analysis

NSR: Net Smelter Return

LSO: Licença Social de Operação

OPEX: Despesas operacionais

PAG: Potencial de Aquecimento Global

TIR: Taxa Interna de Retorno

VPL: Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS DE MINERAÇÃO	18
2.1.1 Fluxo de Caixa Descontado	19
2.1.2 Perspectivas de valor das partes interessadas	25
2.1.4 Fatores de risco	27
2.2 SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO E FATORES ESG	31
2.2.1 Introdução	31
2.2.2 Fatores-chave – energia, rejeitos e água	37
2.2.3 Licença Social para Operar (LSO)	52
2.2.4 Ecologia Industrial	59
2.2.5 Fatores ESG na mineração	66
2.3 SIMULAÇÃO E DINÂMICA DE SISTEMAS.....	71
2.3.1 Introdução, definições e considerações gerais	71
2.3.2 Aplicações na mineração	77
3 METODOLOGIA	79
3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	79
3.2 DEFINIÇÃO DOS SUBSISTEMAS DO MODELO	80
3.2.1 Subsistema de Produção	81
3.2.2 Subsistema Financeiro	84
3.2.3 Subsistema Ambiental	86
3.2.4 Subsistema Socioeconômico	88
3.3 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS AO SOFTWARE DE DINÂMICA DE SISTEMAS	90
3.4 ESTUDOS DE CASO.....	90
4 RESULTADOS	95
4.1 INDICADORES	100
4.1.1 Indicadores Econômicos	100

4.1.2	Indicadores Ambientais	103
4.1.3	Indicadores Socioeconômicos.....	113
4.2	DISCUSSÃO	116
5	CONCLUSÃO.....	120
5.1	RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
	ANEXO A - INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA PRODUZIDO PELA INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION.....	131
	ANEXO B – VALORES REFERÊNCIA DE CONSUMO DE MATERIAIS E ENERGIA EM CADA ETAPA DE PROCESSO – PRODUÇÃO DE COBRE (ADAPTADO DE RÖTZER & SCHMIDT, 2020).....	133
	ANEXO C – FORMULAÇÃO DOS SUBSISTEMAS (STELLA ARCHITECT).....	135

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios do setor de mineração atualmente está relacionado ao desenvolvimento sustentável. A mineração não é uma atividade sustentável por definição, pois produz recursos não-renováveis. No entanto, a mineração pode ser feita de maneira social e ambientalmente responsável. Projetos de mineração de alto valor econômico, porém com baixa aceitação social e altos riscos ambientais também necessitam ter seu conceito de valor repensado. Nesse sentido, a licença social para operar é vista como um dos maiores riscos à indústria¹. O acesso a recursos minerais de qualidade está se tornando mais difícil tanto sob perspectivas técnicas, relacionadas a geologia, engenharia e impactos ambientais, quanto não-técnicas, relacionadas aos aspectos sociais e de governança.

Nesse sentido, a avaliação de projetos tem se movido de abordagens puramente quantitativas de forma a incluir aspectos qualitativos também Sykes & Trench (2014). Em outras palavras, há mais de uma métrica chave para avaliar projetos (p. ex. tonelagem e teor). Esse enfoque moderno, portanto, engloba o conceito de 'desenvolvimento sustentável' como uma componente chave da avaliação de projetos. Ou seja, um projeto de alta qualidade é aquele que pode ser objetivamente medido em termos econômicos, sociais e ambientais e que tenha alto potencial garantidor de acesso ao recurso. Aplicar isso na prática, no entanto, permanece um desafio. A utilização de dinâmica de sistemas para avaliar tais aspectos Sykes & Trench (2014) ainda não apresentou aplicações na literatura. Sontamino & Debrenstadt (2013) aplicaram dinâmica de sistemas para a estimativa de custos na mineração de carvão enquanto Prno & Slocombe (2014) reforçaram a importância da compreensão sistêmica e dinâmica da licença social de operação sem aplicação de modelos quantitativos para tal. Teschner & Holley (2019), com base no trabalho de Davis & Franks (2014), demonstraram que é possível trazer abordagens quantitativas na avaliação do impacto de conflitos sociais na avaliação econômica de projetos. No campo ambiental há um acúmulo de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aplicados à mineração. Pell et al (2019) trazem uma abordagem

¹ https://www.ey.com/en_us/mining-metals/10-business-risks-facing-mining-and-metals

prospectiva e internalizam uma ACV no processo de otimização do sequenciamento de longo prazo de uma mina de ferro, o que pressupõe estágios mais avançados de avaliação (estudo de viabilidade). Observa-se, portanto, que a integração de técnicas quantitativas de impactos ambientais e sociais em fases conceituais (exploratórias) por meio de métodos quantitativos de simulação como a dinâmica de sistemas ainda se encontra pouco pesquisada.

Este trabalho propõe uma abordagem que auxilie definição (escolha) e modelagem dessas variáveis na análise de projetos e, fase conceitual, bem como sua interrelação com os demais modelos de um projeto de mineração em um contexto de fase conceitual. Para isso, a pesquisa irá se apoiar na técnica de dinâmica de sistemas e utilizar estudos de referência no campo da ecologia industrial e avaliação econômica aplicados a mineração.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

1.2.1 Objetivo Geral

- *Desenvolver uma abordagem de análise de projetos de mineração em fase conceitual que integre aspectos relacionados ao Desenvolvimento Sustentável em ambiente de simulação de dinâmica de sistemas.*

1.2.2 Objetivos Específicos

- *Discutir aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável na mineração em geral, bem como seu papel na avaliação de projetos;*
- *Testar a metodologia de dinâmica de sistemas para criação do modelo de avaliação;*
- *Aplicação em um estudo de caso de um projeto de cobre.*

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação inicia em seu Capítulo 2 uma revisão de literatura de aspectos considerados relevantes e de estado-da-arte da avaliação econômica na mineração, da sustentabilidade na mineração e da metodologia de simulação de dinâmica de sistemas;

Assim, definem-se as seguintes seções do Capítulo 2:

- Avaliação econômica: em especial as formas de avaliar um projeto econômica e financeiramente, métodos existentes e compatibilidade com projetos de mineração/recursos não-renováveis;
- Sustentabilidade na mineração: incluindo aspectos ESG, paradigmas atuais de sustentabilidade, exemplos na indústria e em especial o problema da aceitação social da mineração (LSO, Licença Social de Operação).
- Dinâmica de Sistemas, métodos para avaliar as possíveis evoluções temporais de aspectos relevantes em um projeto de mineração

O Capítulo 3 apresenta a metodologia para a criação do modelo de simulação que integre tais aspectos, problemas e objetivos apresentados no Capítulo 1 desta dissertação. No Capítulo 4, ilustra-se um estudo de caso aplicado ao Cobre apresentando os indicadores selecionados para avaliação, bem como uma discussão a respeito do modelo proposto. Segue-se no Capítulo 5 com as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo busca reunir a base teórica necessária, bem como o estado-da-arte, dos temas relevantes ao desenvolvimento da pesquisa e dissertação. Mecanismos de buscas em periódicos de referência foram utilizados com palavras-chave.

2.1 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS DE MINERAÇÃO

A mineração é uma atividade caracterizada por ser intensiva em capital, permeada por riscos técnicos e não-técnicos, prazo longo de maturação, riscos tecnológicos, longos períodos de investimento e *payback* com exposição natural às volatilidades do mercado. Não por acaso, por tanto, muitas operações possuem um ROI (*return on investment*), oferecendo uma grande margem para investidores e operadores que tomaram o risco em levar esse tipo de projeto adiante. A tarefa de se avaliar economicamente um projeto de mineração torna-se, portanto, desafiadora e de grande importância para o sucesso do setor e das empresas. Abordagens de avaliação de geração de receitas são tipicamente mais utilizadas no setor, mas também mais complexas de ser bem executadas. É verdade que o melhor método de avaliação pode depender de alguns aspectos como o estágio em que o projeto se encontra, qualidade e quantidade da informação disponível e características específicas do projeto. Há também um fator 'humano' que oferece vieses e erros advindos de avaliações subjetivas e isso se deve em grande parte as incertezas associadas a interpretação das informações disponíveis – por exemplo a variabilidade dos fluxos de caixa, análise de riscos e opcionalidade presente nos projetos – bem como as incertezas relacionadas ao futuro (o preço futuro das commodities sendo o exemplo típico).

Tipicamente as fases de planejamento e análise de viabilidade de um projeto de mina podem ser divididas em (Nelson, 2011; Vancas 2003 apud Nelson, 2011, p. 300):

- **Estudo conceitual/scoping, 5% da engenharia realizada:** geralmente envolve acurácias da ordem de +- 25-35% – seu propósito se restringe a identificar sequências estratégicas de desenvolvimento da produção e capacidades. Pode incluir análise de mercados em potencial e canais de distribuição.;
- **Pré-viabilidade, 15% da engenharia realizada:** a acurácia típica aumenta para +- 20% e já pode representar até 2% do custo total de um projeto. Seu objetivo é principalmente definir um caso base em detalhamento suficiente para justificar investimentos adicionais para coletar mais informações. Já há um relatório preliminar nos termos de códigos de recursos e reservas (e.g. JORC/NI-43101) demonstrando um modelo geológico do corpo de minério com tonelagem e teores;
- **Viabilidade, 27% da engenharia realizada:** pode chegar a uma acurácia de +-10% com até metade das tarefas de engenharia completas nesta etapa: há um refinamento do caso base gerado na etapa anterior chegando a um nível de detalhamento suficiente para alocar os recursos e financiamentos necessários para desenvolver o projeto.

2.1.1 Fluxo de Caixa Descontado

Há pelo menos três categorias de abordagem de *valuation*: baseado em renda gerada, mercados e custos. No presente trabalho, ênfase será dada aos métodos de *valuation* pertencentes a categoria de renda gerada, uma vez que se trata da abordagem mais comum nos estágios que vão de avaliação conceitual à viabilidade econômica, sendo o mais tradicional a avaliação do fluxo de caixa descontado (FCD) (Runge, 1998). Este, ainda, também possui limitações na consideração de incertezas e flexibilidade da gestão do projeto. Seu princípio chave é a definição de um Valor Presente Líquido (VPL) dado pelo somatório de valores trazidos a valor presente período a período com sua respectiva taxa de desconto:

Equação 1 - Valor Presente Líquido

$$VPL = -Investimento + \frac{FC_1}{(1+r)^1} + \frac{FC_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+r)^n}$$

Onde,

VPL é o valor presente líquido da soma de valores descontados

FC_n é o fluxo de caixa no período n

r é a taxa de desconto, que reflete o custo de comprometer capital e pode incluir um ajuste ao risco (de que tais valores não serão entregues)

n é o tempo em anos antes que os fluxos de caixa futuros ocorram

Desse modelo de fluxo de caixa futuros, pode-se também definir outros dois critérios de avaliação: a Taxa Interna de Retorno – ou a taxa de desconto na qual o VPL é 0 (no tempo zero, Equação 2) - e o *payback* - tempo necessário para recuperar o capital investido.

Equação 2 - Taxa Interna de Retorno

$$0 = -Investimento + \frac{FC_1}{(1+r)^1} + \frac{FC_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+r)^n}$$

Resolvendo a equação para 'r' se chegará a taxa interna de retorno dos fluxos de caixa futuros.

Um modelo de FCD em um projeto de mineração deve, portanto, contar com premissas como:

- Taxa de desconto ou custo de capital
- Tonelagem lavrada e teores
- Receitas (sequenciamento da produção, recuperação e preço)
- Custos de produção e despesas (CAPEX², OPEX³, impostos, royalties etc.)

Ainda que o FCD seja a ferramenta mais tradicional na avaliação de projetos de mineração, este método tem pontos negativos como o não tratamento da incerteza associada aos diversos parâmetros constituintes nem da opcionalidade integrada em operações de mineração. Nesse sentido, frequentemente a incerteza pode ser

² Despesas com investimentos em bens de capital

³ Despesas operacionais

modelada a fim de melhor entender a robustez do projeto utilizando as seguintes abordagens (Rendu, 2016):

- **Análise de sensibilidade:** variando inputs individuais por um fator (ex +- 10% em preço, CAPEX, OPEX e taxa de desconto);
- **Análise de cenários:** ampliando a análise de sensibilidade para considerar combinações plausíveis dos fatores considerando interdependências e correlações;
- **Simulação Monte Carlo:** versão contínua de cenários integrando e gerando distribuições de probabilidade para os parâmetros relevantes e incertos.
- **Opções Reais:** valorização do direito de exercício de uma opção operacional (flexibilidade gerencial; p.ex. expansão, redução ou paralização da mina) em função de incertezas críticas ao projeto (p.ex. preço de venda do produto).

TAXA DE DESCONTO

Há consenso de que a taxa de desconto escolhida é um ponto crucial na modelagem de um FCD (Buchanan, 2016). Esta, pode ser interpretada como o retorno requerido por um investidor em um projeto. Três métodos são normalmente considerados para tal determinação: Custo Médio de Capital Ponderado (CMCP), *Capital Asset Pricing* (CAPM) e aumento de risco composto (Guarnera & Martin, 2011). A taxa de desconto, ou custo de capital, geralmente possui dois componentes:

- O retorno que os investidores necessitam para compensá-los pelo risco de mercado sistêmico e não-diversificável dos fluxos de caixa futuros;
- Um prêmio de risco adicional que reflete riscos ao fluxo de caixa de eventos externos tipicamente excluídos dos fluxos de caixa.

Tal prêmio de risco deve em geral refletir aspectos de instabilidade política, regulatória e riscos operacionais entre outros. Essas condições são geralmente derivadas de instrumentos como spreads de default de crédito, prêmio de risco de investimentos locais, custos de securitização de riscos políticos e rankings de jurisdições criados pelo Banco Mundial e Fraser Institute. No entanto, essas

abordagens são ‘macro’ no sentido de não traduzirem bem riscos de operações individuais em nível local, pois os mesmos são específicos àquele local.

Um dos grandes problemas atuais na aplicação de FCD é o grande efeito de desconto que uma taxa (única) possui no modelo financeiro. Tal condição é fonte de discussões e questionamentos especialmente em projetos de longa duração – mais de 15-20 anos - o que frequentemente é o caso na mineração. Obviamente, o valor potencial de um projeto não pode ser negligenciado e, apesar deste conflito, o processo de valoração de um projeto deve ser capaz de expressar esse valor potencial ainda que em conflito com as premissas técnicas de avaliação.

Lilford et al (2018) sugerem que o CMCP deve reduzir ao longo do tempo devido ao componente do CMCP atribuível ao capital de terceiros reduzir a zero, uma vez que os níveis de endividamento cairão a zero à medida que o fluxo de caixa gere lucro operacional. Portanto, as taxas de desconto devem incorporar essa variação da relação dívida e patrimônio líquido (impactando o CMCP). Os autores ainda discutem como taxas de desconto variam com a capitalização, com retornos tendendo a taxa livre de risco e prêmios de risco. Taxas de desconto portanto não deveriam ser estáticas, mas reduzir ao longo do projeto, fazendo com que os anos mais distantes contribuam mais para a determinação do VPL. Se um projeto requer 8% de retorno, é o capital próprio inicial que requer 8%.

Assim, pode-se definir o CMPC como:

Equação 3 - Custo Médio Ponderado de Capital

$$\begin{aligned} & (\text{Custo da dívida} \times \text{Porcentagem da dívida}) \\ & + (\text{custo de capital próprio} \times \text{porcentagem de capital próprio}) \end{aligned}$$

Onde,

$$\text{Custo da dívida} = \text{taxa de juros} \times (1 - \text{taxa de imposto})$$

No caso da abordagem via CAPM, parte-se do princípio de que o retorno esperado deve ser o somatório de uma taxa livre de risco (tipicamente um título do tesouro americano) com um fator beta (medido pela relação da volatilidade do ativo com a volatilidade do mercado) multiplicado por um prêmio de risco do mercado. A partir do princípio da relação entre risco e retorno, uma ação, por exemplo, tem no desvio padrão dos seus retornos diários um risco ‘sistemático’, isto é, fatores que

afetam o mercado em geral de algum modo – taxa de juros, inflação, preços das commodities etc. No entanto, há também riscos ‘não-sistemáticos’, específicos de uma indústria, por exemplo: resultados de uma campanha de sondagem, condições técnicas de operação, aspectos locais (sociopolíticos), desastres ambientais etc. Este tipo de risco em particular pode ser mitigado via diversificação – princípio da teoria moderna do portfólio de Markovitz⁴. Dessa forma, tem-se:

Equação 4 - Retorno esperado de um ativo (CAPM - Capital Asset Pricing Model)

$$R = R_f + \beta(R_m - R_f)$$

Onde,

R = Retorno esperado do ativo

R_f = Taxa de juros livre de risco

β = Beta do ativo

R_m = Retorno esperado do mercado

É importante destacar, no entanto, que o modelo CAPM tem no seu propósito avaliar ações de empresas, não projetos de mineração.

CAPEX e OPEX

Especialmente em fases conceituais, onde não há disponibilidade de medidas diretas de dados geológicos e de engenharia, modelos de custos se tornam importantes filtros para determinar se vale a pena avançar na avaliação de um projeto (Long & Singer, 2001). Se trata de uma abordagem paramétrica onde o modelo de custo é gerado a partir de curvas tipicamente na forma:

Equação 5 - Formato de equação paramétrica a partir do modelo de custos de O'Hara

$$Custo = x(algo)^y$$

Onde,

x,y = coeficientes obtidos a partir de técnicas de regressão linear para parametrização de minas (custos) existentes.

⁴ https://pt.wikipedia.org/wiki/Teoria_moderna_do_portf%C3%B3lio

algo = algum parâmetro físico (energia, toneladas etc.)

O'hara (1980) propôs um modelo paramétrico para estimar custos de capital e operação nesse contexto de avaliação em fases conceituais de projeto. Posteriormente diversos autores propuseram adaptações e mais destacadamente softwares baseados no trabalho de O'hara como o MAFMO permitindo cálculo probabilístico da rentabilidade de um projeto. Mais recentemente D'Arrigo (2012) propôs uma adaptação aos modelos de O'hara levando em consideração fatores de ajuste para o mercado brasileiro e atualização (indexação) dos custos além de diferentes opções de projeto.

TAXA DE PRODUÇÃO

Em fase conceitual, antes de se estimar custos geralmente busca-se partir de uma tonelagem (potencial reserva) para determinar uma taxa de produção, que por sua vez é determinante na magnitude dos custos (Hutton, 2015). Autores como O'Hara e Rudenno demonstraram que para uma faixa de produção os custos diminuem pelo efeito da economia de escala. Como crítica, Hutton sugere que à luz da teoria microeconômica de custos totais médios, extrapolações podem gerar 'deseconomias' de escala, que por sua vez explicariam em parte o efeito inesperado que mineradoras tem ao aumentar a produção em tempos de alta do ciclo e ver retornos diminuírem.

Variáveis como a vida útil da mina (Equação 6) e taxa de produção (Equação 7) podem ser estimadas preliminarmente pela lei de Taylor, que sugere:

Equação 6 - Regra de Taylor - Vida útil da mina

$$Vida\ útil\ da\ mina = 0.2 \times Tonelagem^{1/4}$$

Equação 7 - Regra de Taylor - Taxa de produção esperada

$$Taxa\ de\ Produção = 0.143 \times Tonelagem^{1/4}$$

Onde, a vida útil da mina é dada em anos a taxa de produção em toneladas por dia.

O estudo de Taylor se baseou em 30 projetos entre as décadas de 70 e 80 e foi posteriormente testado, validado e adaptado por diversos autores. A Tabela 1

resume a literatura posterior a Taylor (1986) de acordo com o tipo de mina – propondo atualizações nos coeficientes da formulação de Taylor (Equação 8), no formato:

Equação 8 - Formatação geral para determinação paramétrica de taxa de produção

$$\text{Taxa de Produção} = a \times \text{Tonelagem}^b$$

Tabela 1 - Modificações na proposição de Taylor (1986) para estimativa de taxa de produção em função do tipo de mina

Tipo de Mina	a	b	Fonte	Minas (n)
Open Pit – Ouro/ Prata	0.416	0.5874	Singer et al (1998)	40
Open Pit – Cobre	0.0236	0.74	Singer & Long (2001)	45
Open Pit/ Block Caving	0.123	0.649	Long (2009)	342
Subterrânea –VMS	0.0248	0.704	Singer et al (2000)	28
Subterrânea – outros	0.297	0.562	Long (2009)	197

2.1.2 Perspectivas de valor das partes interessadas

A mineração é uma atividade com tempo limitado de vida e ocorre sob interação de diferentes partes interessadas (e.g. empresas, acionistas, governos locais e regionais, ONGs e comunidades em geral). Essas diferentes partes interessadas possuem diferentes – e desalinhadas – perspectivas, objetivos, horizontes temporais e níveis de influência sobre um determinado projeto (Espinoza & Morris, 2017) (Figura 1).

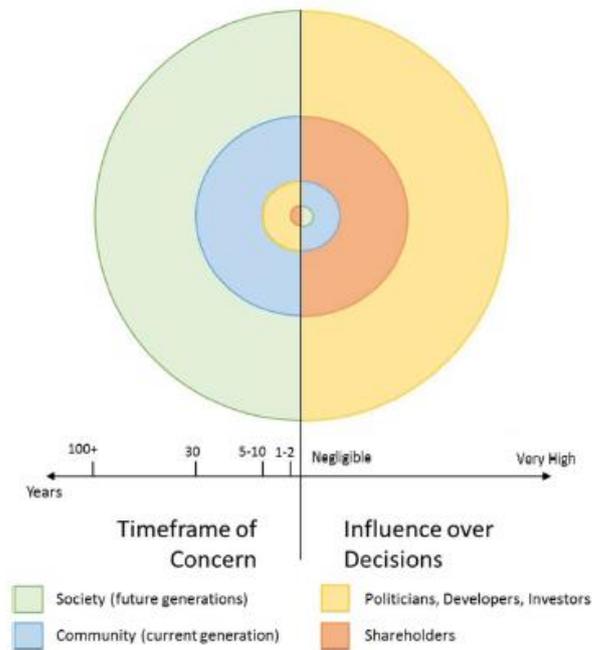


Figura 1 - Desalinhamento de perspectivas de diferentes stakeholders na mineração (Espinoza & Morris, 2017)

Sob os paradigmas de desenvolvimento sustentável (ver seção 2.2), portanto, é necessário reconciliar tais desalinhamentos. Reggio & Lane (2012) ilustram os diferentes objetivos, desafios e consequências dos constituintes de um projeto de mineração – governos, comunidades e empresas (Figura 2). Destaca-se ainda a preocupação das comunidades com as externalidades ambientais causadas pela atividade, mas não compensadas pelo agente causador. Por exemplo, impactos no uso da água (quantidade e qualidade), emissão de poluentes etc.



Figura 2 - Interesses, desafios e consequências de diferentes stakeholders na mineração (adaptado de Reggio & Lane, 2012)

2.1.4 Fatores de risco

A atividade de mineração possui uma grande variedade de riscos associados, variados níveis de incerteza, uma grande variedade de interconexões entre suas partes e fortemente restritas em tempo (Rendu, 2016). Tradicionalmente, a análise de risco é definida pela análise do quanto uma consequência irá diferir do que era esperado, e, portanto, deve ser medida em função da probabilidade de ocorrência dos eventos, o impacto que tais eventos geram e como o produto dessas duas dimensões é percebido pelas diversas partes interessadas (Rendu, 2016). Tipicamente, tais fatores de risco incluem riscos financeiros, técnicos e operacionais, ambientais, sociais e de governança (Tabela 2):

Tabela 2 - Fatores e categorias de risco típicos na mineração (Rendu, 2016)

Fatores de risco	Tipos
Financeiro	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de capital e variação ao longo do tempo • Fechamento e reabilitação e a diferença entre estimado e real. • Preço do produto vendável • Mudança na disponibilidade e custo de suprimentos • Inflação e mudança nas taxas de câmbio • Habilidade em financiar um projeto de capital intensivo
Técnico/ Operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Confiança no modelo geológico • Confiança nas premissas de recuperação metalúrgica • Performance de equipamentos, processos e instalações (real vs planejado) • Catástrofes operacionais não esperadas • Falha nos sistemas de informação • Falhas e atrasos nas linhas de suprimentos • Acesso e confiança no suprimento de energia, água e consumíveis
Ambientais, sociais e governança	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança de licenças, direito minerário • Impactos ambientais e custo de mitigação • Segurança, saúde e impactos na comunidade • Relações e expectativas com as comunidades • Ações de ONGs • Relações trabalhistas • Processo de aprovação de licenças governamentais • Alterações em leis e regulações, nacionais e internacionais • Mudanças em regimes tributários e royalties • Catástrofes naturais e mudanças climáticas, que possam impactar operações e mercados • Contexto político e econômico doméstico e internacional

No contexto do presente trabalho, é interessante expandir a revisão para diferentes tipos de fatores de risco e contextos, pertinentes à análise e desenvolvimento de projetos de mineração. A Tabela 3 resume diferentes fatores de risco publicados por diferentes autores em diferentes contextos.

Tabela 3 - Diferentes fatores de risco e contextos na literatura

Problemas causando falhas nos estudos de viabilidade e suas frequências relativas (Berry & McCarthy, 2006)	Causas típicas de atrasos em projetos de mina e sua frequência (Schodde, 2014)	Fraser Institute . Cervantes, Green & Wilson (2014)
<ul style="list-style-type: none"> • Geologia, estimativa de recursos e reservas (17%) • Análise geotécnica (9%) • Design e sequenciamento de mina (32%) • Seleção de equipamentos (4%) • Testes, amostragem e <i>scale-up</i> metalúrgico (15%) • Design e seleção de equipamentos de processamento (12%) • Estimativa de custos (7%) • Hidrologia (4%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos excedentes (23%) • Baixa economicidade (também influenciada por taxaço e risco-país, além de custos, 21%) • Problemas de infraestrutura (ex. energia, água, portos) (15%) • Problemas sociais (15%) • Problemas ambientais (8%) • Licenciamento (8%) • Problemas legais e financeiros (5%) • Não especificados (5%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulações existentes • Regulações ambientais • Duplicidade regulatória • Sistema legal • Regime de taxaço • Disputas de uso da terra • Áreas protegidas • Infraestrutura • Acordos socioeconômicos • Barreiras comerciais • Estabilidade política • Regulações trabalhistas • Banco de dados geológico • Níveis de segurança • Disponibilidade de mão de obra
Categorias de risco ESG na mineração (ambientais sociais e de governança) (Lèbre et al, 2019)	Categorias citadas no código JORC como fatores de modificação na definição de reservas	
<ul style="list-style-type: none"> • Rejeitos • Água • Biodiversidade • Uso da terra • População indígena • Vulnerabilidade social • Fragilidade política • Licenciamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Geologia • Mineração • Processamento • Metalurgia • Economia • Marketing • Legais • Ambientais 	

-
- Infraestrutura
 - Sociais
 - Governamentais

No contexto de avaliação econômica de projetos, um fator de risco que pode gerar um grande impacto no sucesso do projeto é o de possíveis atrasos no processo de aprovação de licenças e desenvolvimento da mina. Conforme visto no item 2.1.1 o VPL é negativamente penalizado com o atraso de fluxos de caixa positivos. Em realidade, há diversos fatores que podem contribuir para atrasos nos projetos. Spitz e Trudinger (2009), sugerem que os diversos tipos de atrasos podem chegar a ordem de 38 a 110 milhões para um projeto de 240 milhões de dólares em atrasos de 6 a 18 meses – sem incluir receitas renunciadas de empregados, contratados e fornecedores que podem ultrapassar 100 milhões para um ano de atraso. Acrescenta-se royalties e impostos e dividendos não recolhidos, percebe-se que esse é um fator chave na avaliação de um projeto. A Tabela 4 exemplifica alguns fatores que podem causar perdas às empresas e mineradoras.

Tabela 4 – Consequências de atrasos em projetos de mineração

Perdas para empresas e investidores por atrasos nos projetos

-
- Juros
 - Danos especiais
 - Lucros perdidos
 - Uso deferido
 - Aumento do financiamento
 - Gastos de manutenção e operação ampliados
 - Custos de mão-de-obra
 - Custos de equipamentos
 - Custos de material
 - Custos de monitoramento e comprometimento (*bonding*)
 - Custos de terceirizadas
 - Honorários de advogados
 - Perdas para o país, região
 - Renda renunciada
 - Impostos, royalties e dividendos renunciados
 - Investimentos sociais atrasados

Os autores ainda argumentam que, ao contrário do pensamento prevalente na gestão de projetos, os custos reais de atrasos não estão relacionados ao aumento de custos de capital para desenvolver a mina, mas na perda de valor (e vendas) da mina em si. É importante separar a noção de atraso de ‘*lead times*’ naturais do ciclo de um projeto. Estes são considerados na avaliação, no entanto há sempre incertezas associadas que deveriam ser avaliadas.

2.2 SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO E FATORES ESG

2.2.1 Introdução

O conceito e definição de ‘sustentabilidade’ e ‘desenvolvimento sustentável’ tem sido discutidos há décadas e as suas consequências para o setor mineral, cada vez mais importantes. Fóruns internacionais têm debatido crescentemente temas relacionados à sustentabilidade na sociedade e nos mais diversos setores.

A definição de Desenvolvimento Sustentável mais aceita e citada é a do relatório de Brundtland:

“O Desenvolvimento Sustentável é o desenvolvimento que atende as necessidades presentes sem comprometer a habilidade das futuras gerações em atender suas próprias necessidades” ONU, 1987

Frequentemente, inclui três características básicas:

1. Uma condição humana desejável: uma sociedade que pessoas querem manter pois atende às suas necessidades;
2. Um ecossistema durável: que mantém sua capacidade em dar suporte à diversidade de formas de vida no futuro próximo e distante;
3. Equidade: um sistema que auxilie na distribuição justa dos fardos e benefícios às gerações presentes e futuras.

Em geral, na mineração, desenvolvimento sustentável pode ser compreendido como abordagens integradas entre as áreas social, econômica e ambiental dentro de uma estrutura de boa governança. É fundamental uma relação contínua e mutuamente benéfica entre os *stakeholders* envolvidos em projetos específicos.

Muitas iniciativas foram formalizadas nas últimas décadas a fim de tratar dos aspectos de sustentabilidade na mineração global, com diferentes focos temáticos e geográficos, dentre eles, destaca-se:

- Global Mining Initiative for Mining, Minerals and Sustainable Development (2000), levando à criação do International Council on Mining and Metals (ICMM) em 2001. A organização conta com mais de 30 mineradoras e associações do setor e define 10 princípios de desenvolvimento sustentável na mineração os quais todos membros subscrevem (ver seção 2.2.4);
- IGF – Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development (2002). Idealizado a partir do World Summit em Desenvolvimento Sustentável de Joanesburgo, com o objetivo de oferecer oportunidades aos governos com interesse no setor em avançar em políticas que convirjam a mineração e objetivos de desenvolvimento sustentável;
- EITI (Extractive Industry Transparency Initiative, 2004) – Focado em direitos humanos e fornecimento responsável nas indústrias extrativas. Mais recentemente lançou um standard (2019) que cobre novos requisitos em transparência de contratos, meio-ambiente e gênero. 52 países implementarão esse padrão e terão de publicar informações sobre contratos a partir de 2021 – quanto empresas pagam de impostos, royalties, outros ‘pagamentos sociais’ e como os governos locais utilizam essa renda;
- NRGi (Natural Resources Governance Institute) – organização sem fins lucrativos, independente, que busca auxiliar a geração de benefícios dos setores extrativos dos países e reduzir danos causados pela atividade do setor;
- IISD (International Institute for Sustainable Development, 2012) - publica um compêndio global de iniciativas em indicadores de sustentabilidade que podem ser usados para analisar a sustentabilidade na mineração, onde foram identificados mais de 20 registros compatíveis;
- International Standards for Tailings Dams (2019) – 27 CEOs de mineração se comprometendo a aderir a padrões internacionais de segurança para barragens de rejeito;

- Climate Smart Mining Facility (2019) – Banco Mundial – iniciativa para facilitar a extração e processamento sustentável da indústria mineral para contribuir na transição a uma economia de baixo-carbono.

Da mesma maneira, padrões de relatório para reportar indicadores que expressem aspectos de sustentabilidade nos negócios foram criados, sendo o GRI (Global Reporting Initiative) o mais popular em termos de número de mineradoras aderentes aos seus guias de relatório e indicadores sugeridos (Tabela 5). Apesar de sugerir mais de 150 indicadores diferentes, incluindo diversas categorias temáticas como organizacional, gerencial, econômica, ambiental, social, direitos humanos sociedade e responsabilidade de produtos, Fonseca et al (2013) apontam limitações de uma abordagem em ‘silos’, pois considera os vários indicadores de forma isolada. Além disso, o autor também critica o fato de o foco ser voltado à organização e não às operações, o que termina por estimular as empresas a agregarem dados de diferentes fontes em um relatório global da organização.

Tabela 5 - Exemplo de categorias reportadas em relatórios de sustentabilidade com os critérios GRI (Antofagasta Minerals, 2018)

Indicadores - áreas	Resumo	Padrão GRI
Performance econômica		
Valor econômico gerado e distribuído	Receitas, remunerações e benefícios, custos operacionais, investimentos em projetos na comunidade, amortização de dívidas, impostos pagos ao governo e dividendos para acionistas	102-7
Fornecimento responsável	Fornecedores e compras locais	102-7, 102-8, 204-1
Transparência e Governança Corporativa		
Governança Corporativa	Composição do board de diretores	102-22
Ética e <i>compliance</i>	Reclamações e porcentagem de casos resolvidos	102-17
Recursos humanos		

Empregados e contratados	Perfil de empregados próprios, relações trabalhistas, treinamento, avaliação de performance, gestão interna e terceirizadas	102-8, 405-1, 404-3
Saúde e segurança	Acidentes, doenças ocupacionais	403-9, 403-10
Desenvolvimento social		
Comunidades	Participação da comunidade na operação, empregabilidade local	203-2
Gestão Ambiental		
Gestão ambiental	Incidentes e multas ambientais, fechamento de mina	306-3, 307-1
Gestão da água	Consumo por tipo de fonte	303-5, 303-3
Mudança climática e energias renováveis	Consumo de energia, energias renováveis, emissões de gases de efeito estufa	302-1, 305-2, 305-4
Rejeitos de mineração	Rejeito de mina, beneficiamento, processamento, tratamento de rejeitos, resíduos perigosos e não-perigosos	306-2, MM3
Biodiversidade		
Biodiversidade	Áreas protegidas (há)	304-3

Uma das tentativas mais populares de expressar a natureza abstrata do Desenvolvimento Sustentável é o chamado ‘Tripé da Sustentabilidade’ (Elkington, 1997). Se trata de uma proposição a medir os resultados de uma organização em termos sociais, ambientais e econômicos. Conforme Rendu (2016), muitos projetos ao longo da história se mostravam financeiramente sólidos, mas por aspectos ambientais e sociais sofreram atrasos importantes ou nunca foram desenvolvidos. O autor ainda sugere que um alto grau de confiança nesses aspectos ainda é necessário antes de declarar reservas (ver seção 2.2.5) e que, para gerir os riscos de um projeto, é preciso compreender a influência de cada variável do tripé de sustentabilidade simultaneamente. Rendu (2016) argumenta que dificilmente pode-se chegar a um acordo sobre uma unidade única para as três dimensões (ex. monetária), mas uma maneira efetiva de representação visual seria um gráfico (Figura 3), onde a distância entre cada polígono deve refletir a incerteza de cada dimensão e o risco da mesma ao projeto.

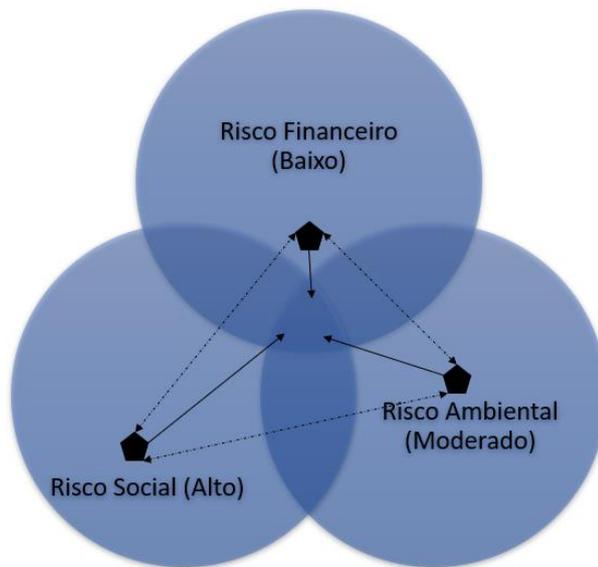


Figura 3 - Representação das três dimensões de sustentabilidade (Rendu, 2016)

Mais recentemente, as organizações e corporações empresarias passaram a adotar princípios relacionados ao desenvolvimento sustentável, com variados motivos (Rankin, 2011):

- Melhorar sua reputação;
- Assegurar uma licença social de operação (ver seção 2.2.4);
- Atrair e reter colaboradores;
- Melhorar o acesso a investidores;
- Identificar potenciais reduções de custos;
- Aumentar o escopo para inovação;
- Alinhar necessidades das partes interessadas aos objetivos gerenciais.

Pode-se generalizar tais aspectos sob o termo Responsabilidade Social Corporativa (CSR) – o comprometimento contínuo de um negócio em se comportar eticamente e contribuir para melhorar a qualidade de vida de seus empregados e famílias bem como da comunidade local e sociedade em geral (Rankin, 2011).

Na mineração, Frederiksen (2018) relaciona categorias de risco e identifica respostas típicas observadas pelas empresas (Tabela 6):

Tabela 6 - Fatores de risco no contexto de responsabilidade social corporativa (CSR) (Frederiksen, 2018)

Categoria	Risco	Resposta típica
Operacional	Disrupção pela comunidade local (ex. bloqueio de estradas, protestos, propriedades atacadas etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Relações e consultas com a comunidade • Redução de problemas com as comunidades locais • Investimentos na comunidade • Suporte aos serviços locais de segurança • Suporte às elites locais • Suportar meios de vida locais e alternativos
Reputação	<p>Acesso limitado a novas áreas</p> <p>Acesso limitado a capital</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento na comunidade • Consulta com comunidade local • Suporte às elites locais • Projetos de alta visibilidade • Relatórios e transparência • Demonstrar abordagem proativa
Políticos/ Regulatórios	<p>Nacionalismo de recursos e aumento de regulação</p> <p>Litígios futuros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Publicar esforços existentes • Mitigar impactos ambientais • Adotar padrões internacionais • Ir além dos níveis de <i>compliance</i> • Ir além dos níveis de <i>compliance</i>

Um exemplo concreto é o papel da mineração no combate às mudanças climáticas. Há várias iniciativas sendo consideradas pelas mineradoras para melhorar seu 'perfil climático'. Um estudo realizado pelo Banco Mundial (Sekar et al 2019) categoriza tais iniciativas (processos e tecnologias) em 'adaptativas' ou 'mitigadoras' e as classifica em termos de facilidade de implementação e impacto climático. Dentre essas iniciativas, destaca-se como mais efetivas:

- Gestão digital de energia;
- Energias renováveis (eólica e solar);
- Biolixiviação;
- Otimização de processos;
- Gestão do uso da água;
- Gestão de barragem de rejeitos;
- Gestão de caminhões de transporte ociosos.

2.2.2 Fatores-chave – energia, rejeitos e água

O aumento da demanda de matérias primas minerais e o declínio nos teores de minério extraídos globalmente tendem a aumentar o *footprint* da indústria mineral, particularmente por meio de maior consumo de água e energia e maior geração de rejeitos. Para matérias primas de alto valor e baixo teor médio relativo como o ouro, cada tonelada de produto (Au) gera cerca de 1Mt de rejeito no seu processo produtivo (para um teor de minério de 2ppm). Em metais básicos com o cobre, uma operação de lixiviação em pilha (Cu com teor de 1%) pode gerar cerca de 550 toneladas de rejeito para cada tonelada de cobre cátodo produzida (Rankin, 2011). Tayeb-Khorami et al. (2015) estima que, mundialmente, a quantidade de rejeitos gerada por ano é da ordem de 100 bilhões de toneladas (rejeitos sólidos de extração primária). É sugerido ainda que tal magnitude de geração de rejeitos tende a aumentar em função do aumento de demanda por matérias primas além de redução de teores médios de minério para muitas commodities – ou seja, para a mesma tonelada de metal mais rejeito é gerado. Da mesma forma, isso tende a pressionar a intensidade de energia demandada na produção mineral. Há ainda a interrelação entre água e energia na medida que uma melhora na gestão da água pode aumentar o consumo energético. O presente trabalho irá focar no caso do Cobre por meio dos estudos de caso, portanto as seções serão ilustradas com aspectos particulares a mineração e processamento de minérios de cobre. Como ilustração introdutória à seção, a Tabela 7 relaciona os diferentes estágios de um projeto de mineração e indicadores ambientais associados.

Tabela 7 - Indicadores ambientais na mineração na estrutura DPSIR⁵ (adaptado de Lottermoser, 2017)

Forças direcionadoras	Pressão	Estado	Impacto	Resposta
Benefícios econômicos	Rejeitos produzidos	Concentração de metais em solos, sedimentos ou água superficial	Acumulação de metais em plantas e animais	Tratamento de água e rejeito Supressão de poeiras
Independência econômica	Poeiras lançadas à atmosfera	Química do assentamento de poeira	Biomonitores	Condicionamento de superfície de solos
Demanda por recursos e consumo	Efluentes lançados ao ambiente	Níveis de ruído médio	Indicadores microbianos	Estabilidade da forma de relevo
Empregabilidade	Emissões de CO2		Destruição de habitats de vida selvagem	Acúmulo de massa microbiana e biomassa Cobertura verde de área licenciada
Status social	Potencial ácido de rejeitos		Impactos na saúde humana	Complexidade e dinâmica de vegetação
			Suscetibilidade de solos à erosão	Porcentagem de utilização de rejeitos sólidos Princípio do poluidor-pagador Limitação de emissões

⁵ <https://pt.wikipedia.org/wiki/DPSIR>

ÁGUA

Muitos dos impactos ambientais associados à produção de metais são impactos nos recursos hídricos, especialmente nos estágios de lavra e processamento (Rankin, 2011). A interação entre as operações de mineração e os recursos locais de água são localmente muito específicas e dependem em grande parte do clima local, tipo de processamento e das estratégias de gestão de água das operações, além de fatores como geologia, topografia e hidrologia local (Northey et al, 2014). O consumo de água em uma operação de cobre consistindo em uma mina e uma planta de beneficiamento geralmente se encontra em um intervalo de 0.4 a 1.0m³ por tonelada de minério de cobre, no entanto, quando há processos de fundição ou lixiviação esse consumo será muito maior (Rankin, 2011). Na mineração, água é geralmente obtida via terceiros, barragens para coletar precipitação e escoamento, lagoas naturais e águas subterrâneas. A água também pode ser perdida em uma operação via infiltração, evaporação e liberação de efluentes ao meio-ambiente (acidental ou controlada). A Figura 4 mostra os fluxos de água típicos de uma operação mineira. Normalmente o consumo de água pode ser categorizado em direto ou indireto – pelas atividades do processo produtivo ou geração de energia, respectivamente. A Tabela 8 apresenta valores de referência de consumo para processos de lavra, beneficiamento, lixiviação e fundição com eletricidade gerada por termelétricas a carvão. Rankin (2011) ainda sustenta que o consumo de água é em grande parte função do teor de minério – com menores teores, mais minério precisa ser tratado para extrair a mesma quantidade de metal, portanto mais água será consumida. No contexto de simulação e abordagens baseadas em sistemas, Kunz & Moran (2016) sugerem o uso de modelagem e simulação de sistemas para auxiliar na tomada de decisão e identificação de riscos no contexto de gestão do uso da água. Os autores destacam os riscos de *'dryness'* – água insuficiente para atender os requisitos de produção – e *'wetness'* – quando há presença de muita água no sistema levando a descargas em períodos de chuva intensa. Ou seja, quando o estoque de água excede a capacidade de carga do local, há risco de inundações (e riscos ambientais associados a descarga de água contaminada) e o sistema entra em estado de *'wetness'*). Já o estado de *'dryness'* reflete a disponibilidade insuficiente de água para produção e/ou quando o uso de água da operação gera conflitos com as comunidades.

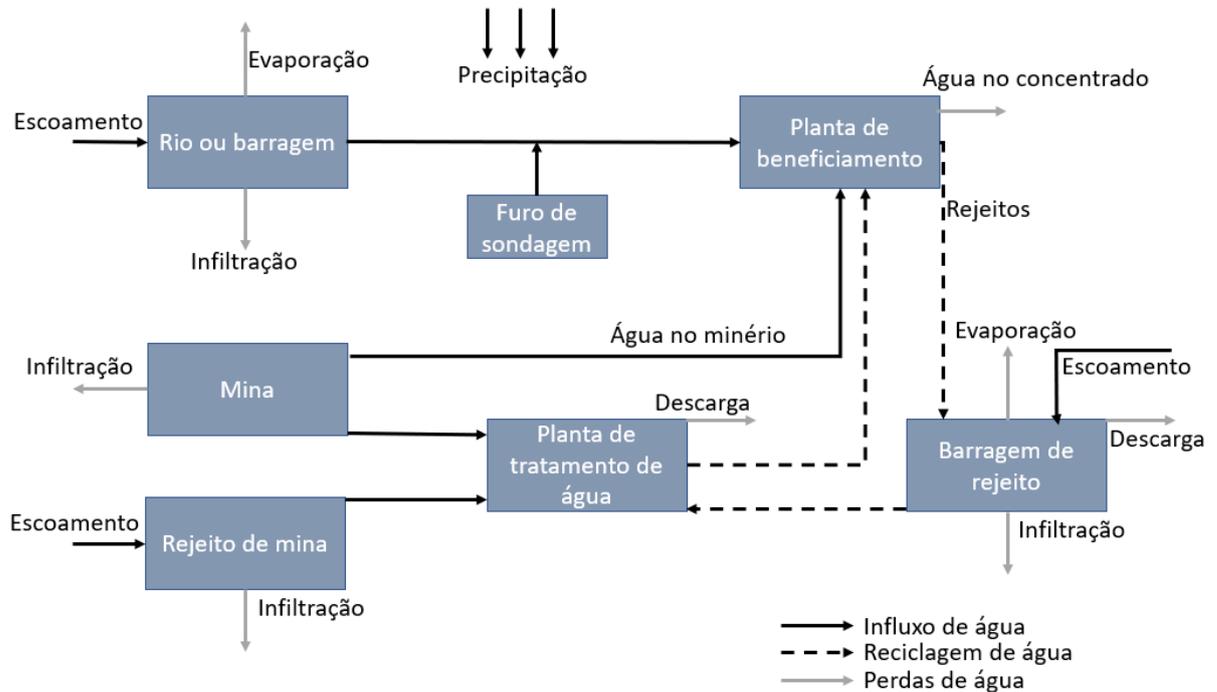


Figura 4 - Balanço de água simplificado na mineração (adaptado de Rankin, 2011)

Tabela 8 - Valores de referência para consumo de água - Cobre e Ouro (Rankin, 2011)

Minério	Processo	Consumo de água (m ³)			
		Por ton de metal	Por ton de minério	% indireto	
Cobre	Sulfeto, 3%wt Cu	Lavra, cominuição, flotação, fundição, conversão, eletrorefino	25.9	0.7	13
	Sulfeto, 2%wt Cu				
Ouro	Minério de Ouro, 3.6g/t	Lavra, cominuição, flotação, CIL, recuperação eletrolítica	252087	0.8	3

Há grande variabilidade entre diferentes minas no consumo direto, expressas em m³/t de metal. A Tabela 8 mostra os fluxos de consumo direto de água para dois tipos de processo de produção de cobre. Northey et al. (2014) enfatizam que o consumo de água unitário associado com matérias primas minerais é frequentemente menor em regiões que possuem escassez de água devido a maiores níveis de

otimização para reduzir a quantidade de água necessária para o processamento – em outras palavras, os autores defendem que a comparação de consumo de água entre operações deve incluir o fator regional das diferenças de escassez de água. Northey et al ainda salientam que é pouco reconhecido os significativos *trade-offs* entre consumo de água e energia. ‘Otimizar um processo para reduzir o consumo de água frequentemente irá resultar em maior uso de energia ou combustível e vice versa’, segundo os autores. Há, portanto, que fatorar os impactos em custos operacionais, consumo de energia e emissões associadas.

É importante ressaltar que a indústria evidencia melhoras consistentes na eficiência do uso direto de água. A Comissão Chilena de Cobre (COCHILCO) publica dados sobre o consumo de água na produção de cobre do país, mostrando que nos últimos 20 anos operações reduziram de 1.1 para 0.36m³/t de metal, para processos pirometalúrgicos e de 0.3 para 0.1m³/t de metal para hidrometalúrgicos.

Entre os riscos associados a este recurso natural na mineração, destaca-se o risco de contaminação seja por deposição em rios ou oceanos, além de colapsos de barragens de rejeito.

Recentemente, o World Resources Institute lançou a iniciativa ‘Aqueduct Risk Atlas’, uma ferramenta *online*⁶ que avalia o geograficamente o risco de problemas de água em cada região. Na metodologia adotada, o índice geral de risco de água é composto pelos seguintes elementos:

- **Risco físico – quantidade**

- **Stress de água basal:** Retiradas anuais de água divididas pela média de água disponível. Mede o nível de competição por água disponível e estima o grau de criticalidade da disponibilidade de água doce. Áreas com mais de 20% de estresse basal podem começar a sofrer riscos de estresse e 40% seria o limiar. Por exemplo a Freeport investe 300M dólares para a construção de uma planta de dessalinização e tubulação próximo ao pacífico para garantir o suprimento de longo prazo em uma de suas minas.

⁶ <https://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>

- **Variabilidade interanual:** Coeficiente de variação de água total anual. Mede a imprevisibilidade de suprimento. Uma alta variabilidade significa mais variação do suprimento renovável de água ao longo dos anos. Anglo American reportou 83 MUS\$ de gastos para reduzir o risco ambiental e perda de tempo de produção causado por alta variabilidade em precipitação;
- **Variabilidade sazonal:** Coeficiente de variação entre a média de água total para cada um dos 12 meses do ano – complementando o indicador anterior. A ausência de armazenamento de água e governança podem gerar conflitos nos meses de maiores secas – aumentam, portanto, o risco para operações com paradas não-previstas e aumento nos custos de operação por demandar maiores armazenamentos e reciclagem.
- **Ocorrência de cheias:** Número de cheias reportadas em um período – mede o risco físico e potencial de interrupções relacionadas ao excesso de água;
- **Severidade de secas:** Magnitude e duração média das secas na região. Sendo seca definida como um período contíguo em que a umidade do solo permanece anormalmente baixa. Aridez é a porcentagem média em que a umidade do solo baixa abaixo de um limiar; duração é definida em meses;
- **Armazenamento a montante:** Capacidade total de armazenamento dividido pela média de água total. Mede a capacidade de comportar a variabilidade no suprimento de água e prove uma medida de resiliência para uma área geográfica. Altas proporções significam alta resiliência;
- **Stress de água subterrânea:** Divisão do *footprint* de água subterrânea (GF) pela área do aquífero. GF é a proporção da captação média anual pela taxa de recarga, menos a contribuição da água subterrânea para manter os fluxos ambientais vezes a área de interesse. Ao dividir GF pela área do aquífero tem-se o balanço de água em seus fluxos de entrada e saída e a proporção de demanda de água subterrânea para manter o suprimento sustentável. Proporções maiores que 1 indicam consumo não sustentável,

portanto atividades intensivas que dependem desse tipo de recurso correm mais risco de competição e de aumento nas regulações para taxas de captação.

- **Risco físico – qualidade**

- **Taxa de retorno:** Uso a montante não-consumível dividido pela média de água disponível. Mede a % de água disponível previamente usada e despejada a montante como rejeito. Mede a dependência de uma região em sua infraestrutura de tratamento de água para garantir qualidade aceitável. Indicador mais aplicável para usuários de água superficial;
- **Áreas protegidas a montante:** porcentagem de água que se origina em áreas protegidas. Empresas operando em áreas com baixo valor precisam reconhecer o potencial de problemas de água e contaminação a montante por fontes antropogênicas.

- **Risco regulatório e de reputação**

- **Cobertura de mídia:** porcentagem de artigos de mídia sobre escassez de água e/ou poluição em uma área;
- **Acesso à água:** porcentagem da população sem acesso a fontes de água potável, aqui definidas como pela natureza de sua construção ou intervenção ativa é protegida por contaminação exterior, em particular matéria fecal. Altos valores indicam áreas onde pessoas tem menos acesso a fontes seguras de água potável.
- **Anfíbios ameaçados:** Porcentagem de anfíbios de água doce classificados como ameaçados – anfíbios são sensíveis a distúrbios nos ecossistemas e, portanto, servem como *proxy* para saúde e vulnerabilidade.

A metodologia ainda sugere diferentes perfis de peso (a fim de ponderar os scores de cada fator) para diferentes indústrias (mineração, óleo e gás, energia etc.).

ENERGIA

As operações de mineração são grandes consumidoras de energia direta e indiretamente. Há diferentes estágios de consumo no processo produtivo de matérias primas minerais, por exemplo combustível na lavra, energia elétrica na moagem e combustão na fundição. A Figura 5 mostra o fluxo de materiais e inputs e outputs de energia em etapas típicas na produção de metais. Formas de consumo direto de energia se referem a energia usada na produção de uma *commodity* e, portanto, possuem um impacto direto nas operações. Já o uso indireto da energia se refere basicamente a geração de energia elétrica, especialmente as formas baseadas em consumo de combustíveis fósseis e a ineficiência associada. Por exemplo, uma estação de energia à carvão converte cerca de 35% do calor produzido na queima de carvão em energia elétrica (Rankin, 2011). Ou seja, para cada kWh (quilowatt-hora) de energia elétrica consumida na produção de uma commodity, 1.86kWh de energia é perdido na termelétrica.

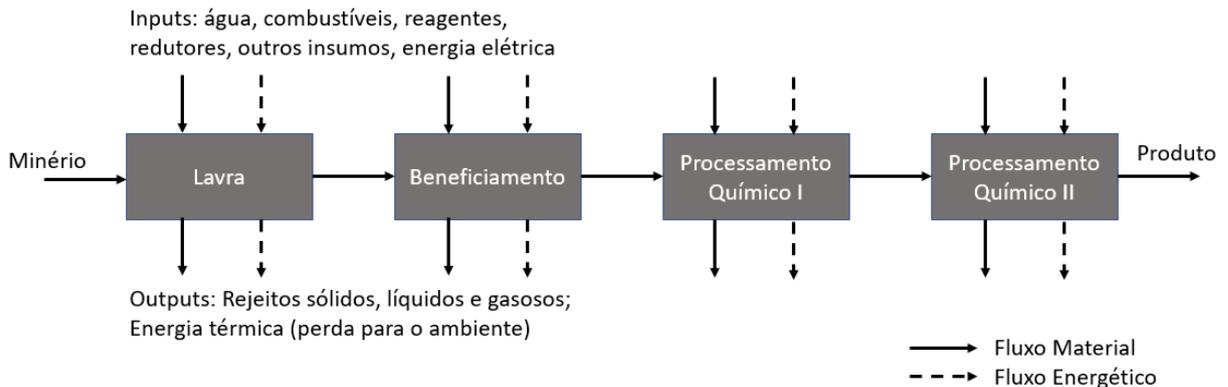


Figura 5 - Fluxos de materiais e energia (entradas e saídas) típicos em uma operação (Rankin, 2011)

A soma da energia direta e indireta para um processo ou operação é chamada de Demanda de Energia Bruta (DEB). A Tabela 9 mostra valores de referência para a DEB de minas por tipo de lavra e recuperação de cobre.

Tabela 9 - Valores de referência para Demanda de Energia Bruta (DEB) (Rankin, 2011)

	MJ por tonelada de rocha movimentada
Mina subterrânea	110-400
Mina a céu aberto	25-50
Produção de metal a partir de concentrado	MJ por kg de metal produzido
Cobre (fundição, eletrorefino)	10.9
Cobre (lixiviação, SX-EW)	46.4

Em geral o processamento químico (e.g. sínter, fundição, lixiviação etc) é muito mais intenso em energia do que operações físicas (carregamento, transporte, perfuração etc) (Rankin, 2011). O somatório de DEBs de cada estágio é chamado de Energia Incorporada, um parâmetro útil para comparação da intensidade de energia de diferentes operações, cuja fórmula é dada por:

Equação 9 - Determinação da energia total incorporada para a produção de um metal (a partir de Rankin, 2011)

$$E_T = E_M(1 + W) + E_B R_M + E_{CI} G_O R_M R_B R_{CI} + E_{CII} G_O R_M R_B R_{CI} R_{CII}$$

Onde,

E_T , Energia por tonelada de minério (MJ/t)

G_O , Teor do corpo de minério (fração)

R_M , Recuperação da lavra (fração)

R_B , Recuperação do beneficiamento (fração)

R_{CI} , Recuperação de produto intermediário (fração)

R_{CII} , Recuperação de produto intermediário (fração)

E_M , Energia requerida para a lavra (MJ)

W , Relação estéril-minério (fração)

E_{CI} , Energia requerida para o primeiro estágio de processamento (MJ)

E_{CII} , Energia requerida para o segundo estágio de processamento (MJ)

A energia requerida por tonelada de produto final pode ser definida pela divisão de cada termo da equação pela massa 'de valor' no produto final ($G_O R_M R_B R_{CI} R_{CII}$).

Com essa fórmula e valores de referência, Rankin (2011) estima a energia requerida e incorporada para diferentes tipos de operação e commodities. A Tabela 10 ilustra o caso do cobre, presumindo lavra a céu aberto, com britagem e peneiramento, seguido de lixiviação em pilha e extração por solvente e recuperação eletrolítica.

Tabela 10 - Premissas para cálculo de DEB e resultados (a partir de Rankin, 2011)

Premissas	Cobre
Teor de minério	1%wt Cu
Relação estéril minério	3
Recuperação – lavra	90%
Recuperação – beneficiamento	95%
Teor do produto beneficiado	1.2%wt
Recuperação – primeiro estágio processamento	85%
Teor do produto – primeiro estágio (sem água)	94%wt
Recuperação – segundo estágio processamento	99%
Teor do produto – segundo estágio	99.5%wt
Energia para a lavra (MJ por ton de rocha movimentada)	25
Energia para beneficiamento (MJ por tonelada tratada)	20
Energia para primeiro estágio de processamento (MJ por kg de valor do produto do estágio anterior)	45
Energia para segundo estágio de processamento (MJ por kg de valor no produto final)	-
Valores Calculados (DEB, MJ por kg de metal produzido)	
Lavra	13.9
Beneficiamento	2.5

Primeiro estágio de processamento	45.5
Segundo estágio de processamento	-
Total (Energia Incorporada)	61.9

Outros valores típicos por contribuição de cada estágio em dois tipos de produção de cobre são ilustrados na Tabela 11:

Tabela 11 - Contribuição de energia por processo e estágio (cobre) a partir de Rankin (2011)

Processo (Cobre) GJ/ton	Lavra	Beneficiamento	Produção de metal, matte	Fundição e/ou refino	Total
Pirometalúrgico	7.91	11.69	10.33	3.09	33.02
Hidrometalúrgio	16.59	1.58	46.29	-	64.46

Diferentes autores realizaram pesquisas para avaliar o consumo de energia entre outros parâmetros (no contexto de sustentabilidade) de operação de diferentes minas. A partir dos trabalhos de Northey et al (2013) e Spuerk (2019) em analisar relatórios de empresas produtoras de cobre, pode-se verificar uma alta correlação entre o consumo anual de energia (PJ/ano) e a produção de cobre (t Cu por ano) (Figura 6). A amostragem possui 52 minas no total com dados reportados nos anos 2000.

Dep. Variable:	energia	R-squared:	0.744			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.739			
Method:	Least Squares	F-statistic:	145.7			
Date:	Tue, 31 Mar 2020	Prob (F-statistic):	1.98e-16			
Time:	18:41:39	Log-Likelihood:	-118.10			
No. Observations:	52	AIC:	240.2			
Df Residuals:	50	BIC:	244.1			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t 	[0.025	0.975]
const	1.6072	0.430	3.741	0.000	0.744	2.470
prod	1.482e-05	1.23e-06	12.070	0.000	1.24e-05	1.73e-05
Omnibus:	17.436	Durbin-Watson:	1.987			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	35.205			
Skew:	0.915	Prob(JB):	2.27e-08			
Kurtosis:	6.591	Cond. No.	4.53e+05			

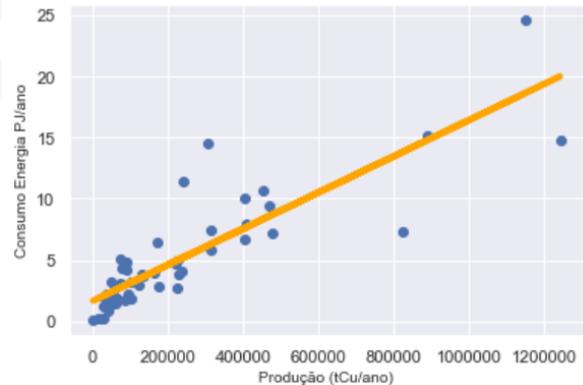


Figura 6 - Correlação entre Produção de cobre (t/ano) e consumo de energia (PJ/ano) a partir de Northey, 2013

Marsden & Botz (2017) estudaram o consumo e eficiência energética de diferentes rotas de processamento para minérios de cobre a partir de dados de diferentes minas e localização geográfica. O autor sugere que em geral processos hidrometalúrgicos consomem menos energia que rotas alternativas de moagem, flotação e fundição/ refino, no entanto tal conclusão depende fortemente da mineralogia, teor e presença de co-produtos no minério. Já Koppelaar & Koppelaar (2016), avaliaram diversas minas de cobre a partir de relatórios das empresas para verificar a significância estatística dos teores de minério e profundidade das minas. Os autores não acharam correlação significativa na influência dos teores de minério na eficiência energética de rotas hidrometalúrgicas (pilha de lixiviação). Já para rotas de moagem e flotação foi observada uma relação significativa tanto para minas a céu aberto e subterrânea em relação a influência do teor profundidade e conclui portanto que a melhor abordagem para prever consumo de energia em rotas de moagem e flotação (independentemente do tipo de lavra) se dá por uma equação que capture o efeito interativo tanto da profundidade quanto dos teores (ao invés de trata-los separadamente). Mais recentemente, Rötzer & Schmidt (2020) estudaram a evolução histórica das demandas energéticas e impactos climáticos na produção de cobre, além de apontar tendências futuras – menores teores, eletrificação das minas, participação

de energias renováveis e seus impactos. Os autores ainda sugerem valores de referência para o consumo de cada etapa dos processos de produção e unidade de referência para cada input (Anexo B).

Há também uma importante relação no consumo de energia com a emissão de gases de efeito estufa já que grande parte da energia utilizada na mineração vem do consumo de combustíveis fósseis (Rankin, 2011). A mineração é atualmente responsável por cerca de 4% a 7% das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa). Os GEE são normalmente expressos em termos de CO₂ equivalente (CO₂e), ou Potencial de Aquecimento Global (PAG), que compreende os principais gases contribuintes: CO₂, CH₄ e N₂O – agregados utilizando fatores de equivalência (Rankin, 2011).

Utilizando os dados compilados por Northey et al (2013), as Figura 7 e 8 mostram a relação entre a intensidade de emissão de GEE (t CO₂e/t Cu) e o tipo de fonte (carvão, gás, hidro, híbridos e grids chilenos SIC e SING).

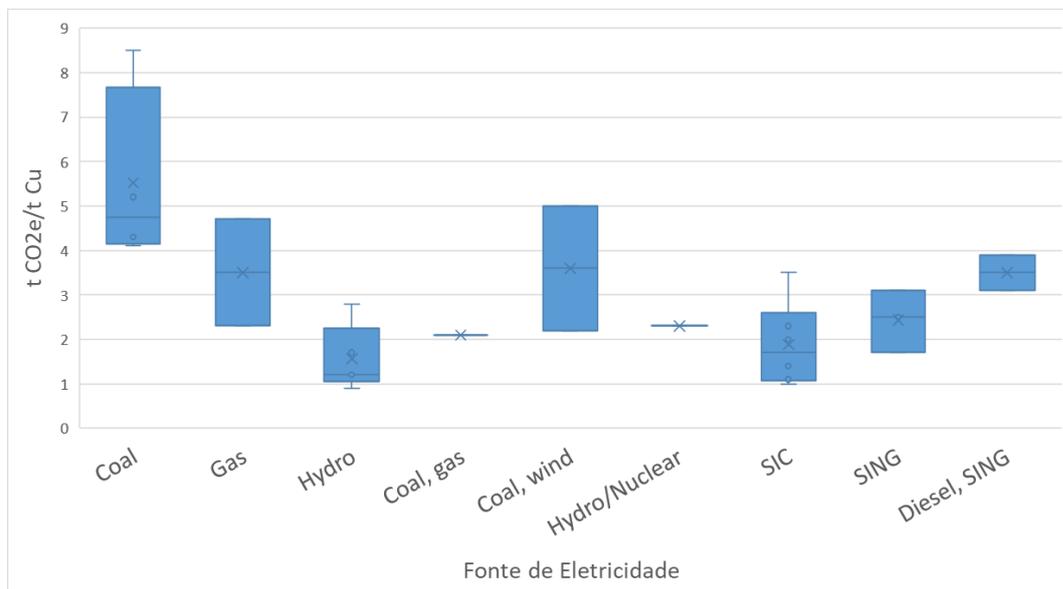


Figura 7 - Relação de tipo de fonte de eletricidade e intensidade de emissões equivalentes (adaptado de Northey, 2013)

OLS Regression Results

Dep. Variable:	Total GWP	R-squared:	0.704			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.678			
Method:	Least Squares	F-statistic:	27.36			
Date:	Mon, 06 Apr 2020	Prob (F-statistic):	8.30e-07			
Time:	15:17:39	Log-Likelihood:	-34.666			
No. Observations:	26	AIC:	75.33			
Df Residuals:	23	BIC:	79.11			
Df Model:	2					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t 	[0.025	0.975]
	const	0.6508	0.443	1.470	0.155	-0.265 1.567
	Eletricidade	2.1910	0.575	3.812	0.001	1.002 3.380
	IntensidadeConsumo	0.0714	0.016	4.382	0.000	0.038 0.105
	Omnibus:	2.861	Durbin-Watson:	1.865		
	Prob(Omnibus):	0.239	Jarque-Bera (JB):	1.468		
	Skew:	0.513	Prob(JB):	0.480		
	Kurtosis:	3.551	Cond. No.	88.9		

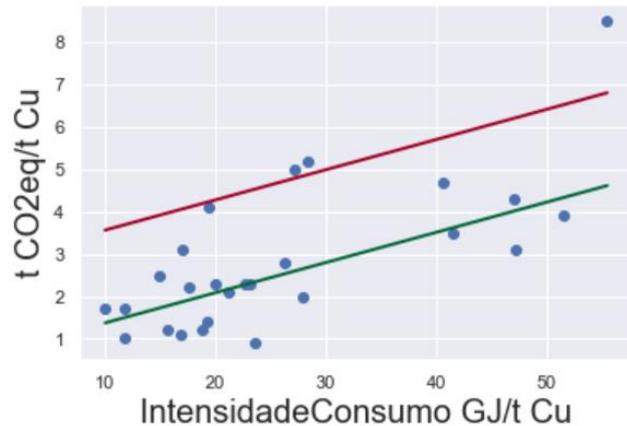


Figura 8 - Correlação entre intensidade de consumo energético e emissões GEE a partir de Northey, 2013 - Linha vermelha representa regressão para fontes de eletricidade a carvão e linha verde para o resto (hidro, híbridas e grids locais)

REJEITOS

A mineração produz uma grande quantidade e uma grande variedade de rejeitos. O conceito de rejeito, no entanto, é dinâmico: o que no passado era considerado um 'produto' hoje pode ser rejeito e vice-versa. A Tabela 12 resume diferentes tipos de rejeito na mineração, diretos e indiretos.

Tabela 12 - Tipos de rejeito na mineração (Rankin, 2011)

Lavra	Direto	Sólido	Rejeito de mina, poeira
		Líquidos	Drenagem ácida de mina
		Gasoso	CO2 do consumo de combustíveis
	Indireto	Sólido	Rejeitos químicos da manufatura de explosivos, cinzas da geração de energia
Gasoso		CO2 da geração de energia elétrica, CO2 da manufatura de explosivos	
Beneficiamento	Direto	Sólido	Rejeitos de beneficiamento
		Líquido	Drenagem ácida de rocha

	Indireto	Sólido	Rejeitos químicos da manufatura de reagentes, cinzas da geração de energia
		Gases	CO2 da geração de energia elétrica, CO2 da manufatura de reagentes
Transformação química	Direto	Sólido	Resíduos de lixiviação, resíduos de eletrólise, escória, fumaça de fornos, refratários usados em fornos
		Líquido	Soluções ácidas e alcalinas de resíduos de lixiviação, soluções contendo cianeto
		Gases	CO2, SO2, NOx etc da fundição
	Indireto	Sólido	Cinzas da geração de energia elétrica
		Gases	CO2 da geração de energia elétrica

Os tipos de rejeito e sua composição podem variar substancialmente e dependem de sua origem mineralógica e de resíduos de reagentes adicionados ao longo da cadeia de processo do material. Os componentes de um sistema de gestão de rejeitos em uma operação são ilustrados na Figura 9.

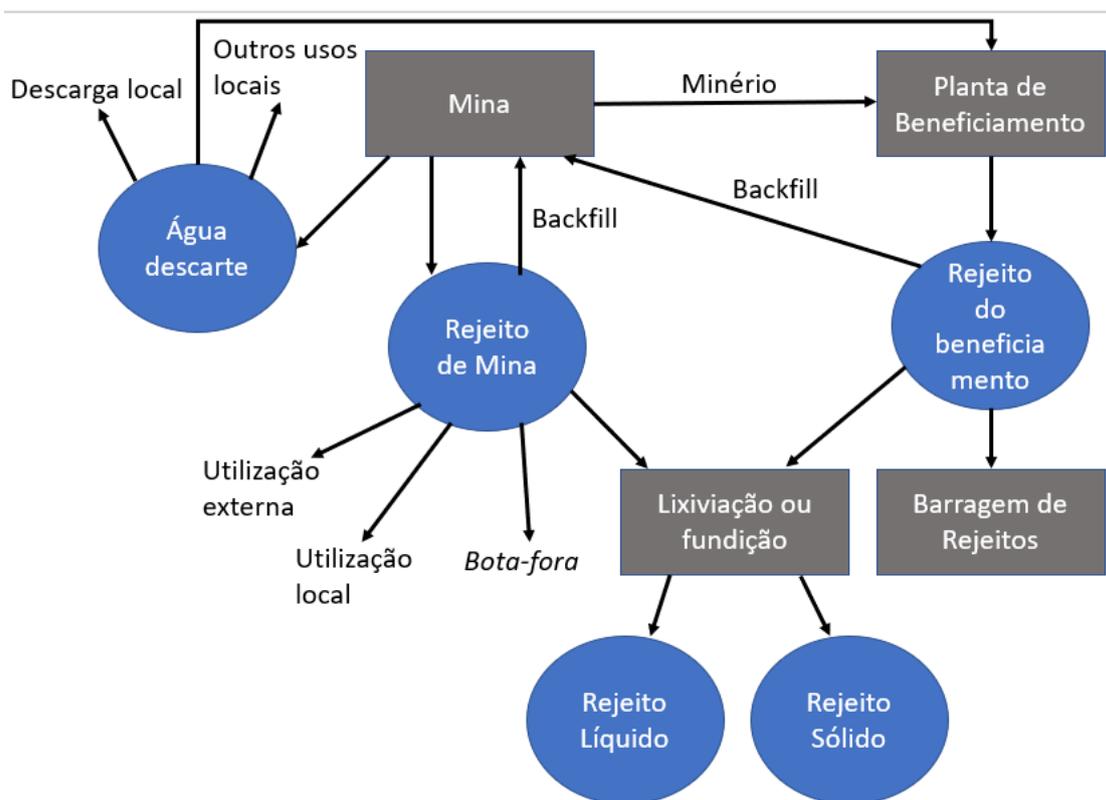


Figura 9 - Componentes de um sistema de gestão de rejeitos (adaptado de Rankin, 2011)

Naturalmente, a minimização de fluxos de rejeito é desejável em qualquer processo, uma vez que além de não possuir valor econômico *a priori*, pode representar riscos ambientais e sociais importantes. Estratégias típicas para minimizar ou eliminar rejeitos são (Rankin, 2011):

- Produção mais limpa: por exemplo pela combinação de maior conservação de matérias primas, água e energia, eliminação de matérias primas tóxicas e redução da quantidade e toxicidade de emissões e rejeitos na sua origem durante o processo de produção;
- Uso de rejeito como matéria prima de outros processos;
- Redução de rejeito por reengenharia de processos: simplificação de fluxogramas, uso de novos equipamentos e novas condições de processamento; e
- Ecologia industrial.

2.2.3 Licença Social para Operar (LSO)

Na mineração é fundamental uma compreensão dos chamados “stakeholders”, que por sua vez são determinantes na expressão da ‘licença social para operar’. Tal “licença” pode ser definida como percepções e crenças das partes que podem ser afetadas pelos projetos – ou afetá-los (Thomson & Boutillier, 2011). Os autores destacam ainda duas características fundamentais da LSO: é intangível, como muitos intangíveis sociais, no entanto, pode ser medida; e é dinâmica, novos eventos e informações podem trazer mudanças nas percepções e opiniões. A LSO, portanto, pode ser ‘emitida’ pela comunidade, aqui compreendida como uma rede de partes interessadas no projeto, podendo incluir indivíduos, grupos, organizações.

Thomson & Boutillier sugerem que a LSO pode causar distúrbios com os componentes financeiro e de engenharia de um projeto. Um paralelo pode ser traçado com aspectos de segurança, onde investimentos não aparentam ter contribuição direta aos resultados, no entanto o risco incorrido ao não tratar corretamente tais aspectos pode desencadear uma série de consequências desfavoráveis à empresa e partes interessadas.

Os autores propõem que a licença social possui níveis distinguíveis com transições entre os mesmos (Figura 10). Quatro níveis de licença social são separados por três critérios de transição, que descrevem os aspectos que se tornam mais importantes na percepção da comunidade.

- **Licença social retida ou retirada:** onde a comunidade impede o projeto de ir adiante, ou para se o mesmo já tiver iniciado;
- **Critério dos limites de legitimidade:** ser percebido por obedecer às leis e regulações é o significado mais básico de legitimidade. Além disso as partes interessadas devem perceber um benefício líquido ou pelo menos nenhum prejuízo líquido;
- **Nível de aceitação:** uma vez cruzado o limite da legitimidade a empresa será aceita pela comunidade, mas não deve esperar nenhum apoio político da mesma. Além disso não há um estoque de “boa-vontade” acumulado e a relação pode rapidamente mudar;
- **Critério dos limites de credibilidade:** credibilidade somente pode ser determinada onde há propostas, promessas e compromissos pendentes. Atender a esse critério envolve capacidade de resposta às preocupações e demandas das comunidades;
- **Nível de aprovação:** o ônus da prova se move em direção àqueles que sugerem que a empresa não é justa ou não cumpre promessas;
- **Critério do limite de confiança:** evolui a partir das experiências ganhas ao trabalhar em direção a objetivos compartilhados e resolução de problemas em conjunto. É também melhorada na medida em que mecanismos são estabelecidos para resolver conflitos ocasionais entre empresa e comunidade. Ainda aprofundado quando arranjos institucionais existem para colocar partes da operação sob orientação da comunidade (p. ex. monitoramento ambiental, recuperação de áreas, aspectos do cronograma de trabalho);
- **Nível de identificação psicológica:** nesse último nível há um senso de responsabilidade e de riscos compartilhados e não há uma distinção primária do tipo ‘nós contra eles’. A comunidade se torna uma defensora do projeto contra críticos e é mais provável de surgir em comunidades onde a operação já dura mais de uma geração. Sykes & Trench (2014) citam que tal nível pode se tornar ainda

uma vantagem competitiva para empresas na medida em que estas passam a ter acesso a regiões mineiras que outras empresas não conseguem reproduzir.

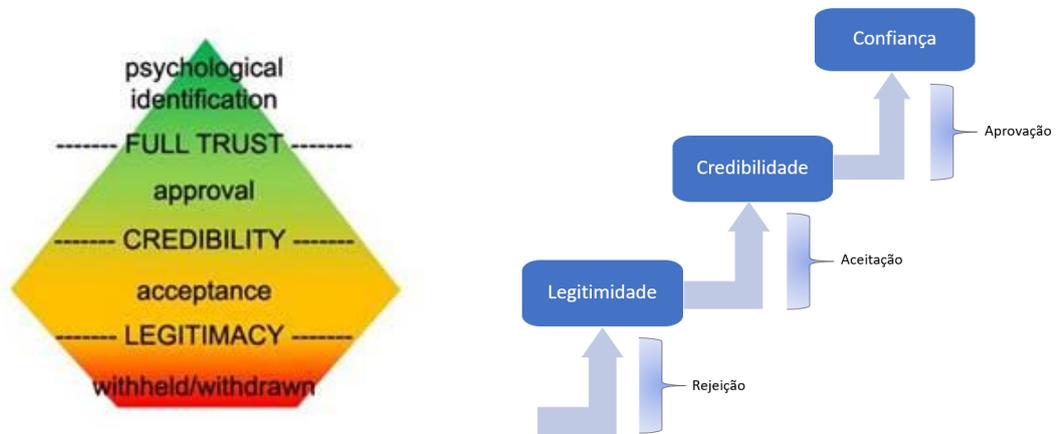


Figura 10 - Níveis de identificação e limites de confiança da comunidade com o projeto (Thomson & Boutillier, 2011)

Um dos grandes desafios para empresas e avaliação de projetos é como medir a LSO. Thomson & Boutillier propõem um mecanismo para quantificar percepções a partir de uma pesquisa do tipo *survey*/entrevista com representantes de stakeholders perguntando por níveis de concordância (escala likert⁷). Fatores propostos pelos autores incluem legitimidade benéfica, capital social, contrato social e confiança institucionalizada. Cada um desses fatores possui um grupo de declarações que são avaliadas pelos respondentes, gerando, portanto, um nível de 'licença social' para cada respondente baseado no conjunto de respostas.

Teschner & Holley (2019) propuseram um modelo baseado em árvores de decisão aplicadas a um fluxo de caixa descontado para estimar a chance e impacto de uma suspensão do projeto a partir de um conflito entre empresa-comunidade. Ou seja, há a premissa de que há uma chance de que em qualquer ano do projeto os stakeholders possam 'optar' por revogar a LSO da empresa e forçar a suspensão da mina. Assim, calcula-se um cenário de VPL onde um determinado ano é o último ano da vida útil da mina, bem como o custo do risco de suspensão prematura baseada na probabilidade de cada resultado e o custo de oportunidade correspondente. Esse

⁷ https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_Likert

modelo, portanto, estima um “VPL ajustado ao risco social”. O método proposto pelos autores sugere duas abordagens para determinar a chance de um conflito social suspender o projeto em determinado ano. A primeira abordagem se baseia na pesquisa de Davis & Franks (2014), onde a probabilidade de suspensão é função do estágio do projeto (Tabela 13). Nota-se que tais riscos de suspensão atingem um pico na fase de viabilidade e construção e reduzem gradualmente nos estágios seguintes. A outra abordagem proposta é a probabilidade uniforme de suspensão, que de acordo com Teschner & Holly pode ser mais apropriada quando se analisa um projeto em um único estágio (p. ex. operação). Para determinar a probabilidade de suspensão pode-se basear em suspensões induzidas por conflitos sociais em outros projetos similares.

Tabela 13 - Ocorrência e resultados de conflitos por estágio do projeto (Davis & Franks, 2014)

Estágio do projeto onde um grande conflito ocorre	Resultado do conflito	
	Não suspenso	Suspenso
Pesquisa mineral (n=3)	67%	33%
Viabilidade/ Pré-viabilidade (n=9)	22%	78%
Construção (n=9)	56%	44%
Operação (n=23)	91%	9%
Expansão (n=5)	80%	20%
Fechamento (n=1)	100%	0%

Davis & Franks ainda ilustram, por meio de uma série de entrevistas, exemplos concretos de custos associados a questões socioambientais (Tabela 14), sendo o tipo de custo mais frequentemente observado o de perda de produtividade (por atrasos).

Tabela 14 – Exemplos práticos de custos associados a problemas socioambientais a partir de entrevistas de Davis & Franks (2014)

Descrição	Custo Associado
Projeto com CAPEX entre 3-5BUS\$	20MUS\$ por semana (do NPV) de atrasos na produção resultantes de conflitos com a comunidade
Mina na América Latina	Atraso de 9 meses no período de construção, gerou um custo adicional ao projeto de 750MUS\$
Conflitos empresa-comunidade	100MUS\$ por ano em paradas
Conflito com a comunidade levando a interrupção de linhas de transmissão	0.75MUS\$ por dia
Atrasos em fases iniciais de pesquisa mineral	10kUS\$ por dia em salários e custos de manutenção da campanha
Atrasos em fases avançadas de pesquisa mineral	50kUS\$ por dia em salários e custos de manutenção da campanha
Conflito com comunidade em fase pré-construção	Inclusão de margem de 50% para cobrir atrasos durante a fase de construção
Oposição da comunidade a projeto de faturamento hidráulico na Austrália	Banco Credit Suisse aplica 2.9% de desconto em avaliação da empresa responsável por riscos regulatórios.
Abandono do Projeto Esquel na Argentina em fase de desenvolvimento	379MUS\$ em ativos e 1.33BUS\$ em reservas provadas
Abandono do Projeto Tambogrande no Peru em fase de desenvolvimento	59MUS\$ em ativos e 253MUS\$ em reservas provadas
Suspensão do Projeto Minas Conga no Peru após conflitos	Newmont (principal proprietária, 51.25%) reportou CAPEX de 1.4BUS\$ entre 2010-2012 e Minas Buenaventura (43.65%) reportou CAPEX de 498MUS\$
Necessidade de readequação de projeto Quellaveco (Anglo American) após conflito com comunidade	Custo estimado do projeto passou de 3.3BUS\$ para 5BUS\$

Em um modelo de avaliação econômica, portanto, tais conflitos em potencial se referem a custos potenciais advindos de tais conflitos entre empresa e comunidade. Davis & Franks listam uma série de custos advindos de conflitos entre comunidade e empresas extrativas (Tabela 15).

Tabela 15 - Tipos de custos que podem ser incorridos por empresas em virtude de conflitos com a comunidade (adaptado de Davis & Franks, 2014)

Tipos de custos às empresas

Segurança	Pagamentos a forças de segurança, custos operacionais relacionados, tempo dedicado a treinamento e gestão
Modificações no projeto	Custos de modificação, retrabalhos
Gestão de riscos	Seguros; maiores prêmios e coberturas, ratings de risco, expertise legal e de conflitos, treinamentos
Danos materiais	Danos ou destruição de propriedades públicas e privadas ou infraestrutura
Perdas de produtividade	Produção descontinuada ou temporariamente parada, perda de oportunidade de expansão futura ou novos projetos, atrasos temporários ou indefinidos, atrasos em suprimentos, maior escrutínio regulatório
Capital	Perda de valor da propriedade, anulação total, incapacidade no pagamento de dívidas, dificuldades de acesso a novo capital, instabilidade no preço de ações, perda de valor.
Pessoal	Tempo de staff dedicado a gestão de riscos e conflitos, custos de remediação, moral baixa e efeitos de estresse, retenção (salários mais altos, benefícios), recrutamento
Reputação	Maiores gastos com relações públicas, (des)vantagens competitivas
Reparação	Compensações, multas, maiores obrigações sociais e ambientais, custos de procedimentos administrativos e litígios

Espinoza & Rojo (2017) propuseram um ‘VPL desacoplado’. A expressão tem origem na tentativa de evitar a *taxa ajustada ao risco (hurdle rate)* ao contabilizar os riscos como um custo anual de seguro. Tal abordagem, no entanto, é muito dependente na habilidade em quantificar o risco em valores monetários.

A International Finance Corporation (IFC) – braço de investimentos do Banco Mundial – produziu uma ferramenta chamada FV Tool⁸ que permite avaliar investimentos em sustentabilidade e sua relação com o fluxo de caixa do projeto. Tal ferramenta, no entanto depende exclusivamente da análise subjetiva do usuário tanto nos riscos sociais elencados quanto nos efeitos de atividades de mitigação. O FV Tool, portanto, depende da percepção da empresa sobre o que os stakeholders valorizam e sobre a própria efetividade em programas de CSR.

No contexto desse trabalho, a publicação de Prno & Slocombe (2013) se mostra de grande valia ao buscar estabelecer uma estrutura de análise baseada em pensamento sistêmico sobre as determinantes da licença social para operar. Os autores se apoiam nas teorias de Sistemas Complexos Adaptativos e Resiliência para estabelecer analiticamente o papel do contexto, os variáveis-chave do sistema, emergência, mudanças, incertezas, feedbacks, efeitos de escala cruzada e limiares. Todas essas são características de sistemas complexos (Siegenfeld & Bar-Yam, 2019). Prno & Slocombe sustentam que a LSO é largamente intangível e pode ser compreendida como uma entidade dinâmica dirigida pelo contexto. De forma sucinta, a determinação da LSO é afetada por diversas variáveis dinâmicas e que interagem operando em múltiplas escalas.

Baseado na teoria de sistemas, portanto, os autores definem os seguintes componentes da estrutura proposta:

- **Características do sistema:** o contexto de cada desenvolvimento de produção mineral é único portanto deve-se identificar as variáveis e processos específicos de cada caso. São características sociais, culturais e dinâmicas políticas de uma comunidade individual. Os autores reforçam que a Emergência é uma propriedade importante do sistema visto que a LSO raramente será produto de interações lineares e previsíveis dentro do sistema. Como já proposto por Thomson & Boutillier (2011) os níveis de aceitação da comunidade flutuam ao longo do tempo como resultado de variáveis controláveis e incontroláveis. Prno & Slocombe também destacam a estrutura de feedbacks que conectam componentes do sistema para produzir efeitos

⁸ <https://www.fvtool.com/>

amplificadores ou estabilizadores, exemplificado pelo efeito da participação pública no desenvolvimento de um projeto, que pode agir como um feedback estabilizador para a LSO.

- **Variáveis multi-escala:** inclui variáveis que operam em escala regional, nacional e internacional. Os autores sugerem 3 subcategorias: governança e arranjos institucionais, condições socioeconômicas e condições biofísicas (bióticos e abióticos).
- **Variáveis locais:** Variáveis de escala local se referem a mina, a comunidade e a interrelação de ambos.
- **Resultados de LSO:** os resultados podem ser categorizados como se a LSO foi concedida ou não pela comunidade e se a operação procedeu adiante ou não.

2.2.4 Ecologia Industrial

De maneira geral, o termo Ecologia Industrial é usado para designar um conjunto de metodologias aplicáveis ao contexto industrial (manufatura, design de produtos etc.) olhando para ecossistemas naturais (não-humanos) como modelo para atividades industriais (Lifset & Graedel, 2002). Muitos ecossistemas biológicos são efetivos em reciclar recursos e, portanto, tidos como exemplos para eficiência do ciclo de materiais e energia na indústria. Além disso, a Ecologia Industrial coloca a atividade tecnológica humana no contexto de grandes ecossistemas que a suportam – examinando as fontes de recursos usados na sociedade. Em outras, palavras, a Ecologia Industrial pode auxiliar em uma compreensão mais sistêmica da estrutura e funcionamento do metabolismo industrial ou social. White (1994) sintetiza a definição de Ecologia Industrial como:

“O estudo dos fluxos de materiais e energia em atividades industriais e de consumo, dos efeitos desses fluxos no meio-ambiente, e das influências de fatores econômicos, políticos, regulatórios e sociais no fluxo, uso e transformação de recursos”

Dentre os diversos métodos utilizados, essa dissertação pretende destacar a Análise de Ciclo de Vida por sua crescente aplicação na indústria de mineração, em particular a nível de projetos. É importante destacar que há um grande campo de

estudo da Ecologia Industrial em níveis setoriais (matérias primas minerais) em escalas regionais, nacionais e globais, auxiliando o planejamento de políticas públicas (Fontes).

Em essência, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) refere-se a uma abordagem que foca em sistemas de produtos – o total de processos na economia que são responsáveis por exercer uma certa função (de Haes, 2002). A ACV amplia os princípios de um simples balanço de massa. Nas últimas décadas, e mais precisamente em 1994, a ACV ganhou tração de forma importante, pela sua padronização como metodologia pela ISO (International Standards Organisation, série 14040). A ISO 14040 define ACV como ‘uma técnica para avaliar aspectos ambientais associados a um produto ao compilar um inventário de inputs e outputs relevantes de um sistema; avaliando o potencial de impactos ambientais associados com tais inputs e outputs em relação aos objetivos do estudo’. Nesse contexto, os ciclos de vida de um produto podem ser classificados da seguinte forma (Norgate & Jahanshahi, 2010):

- Do berço ao portão (extração de matéria prima e refino)
(*Cradle to Entry Gate*);
- Do portão de entrada ao portão de saída (manufatura do produto)
(*Entry Gate to Exit Gate*);
- Portão de saída ao túmulo (uso do produto, reciclagem e deposição)
(*Exit Gate to Grave*).

Norgate ainda distingue a ACV em duas categorias de impacto: orientada a problemas e orientada a danos.

A ACV pode ser aplicada em vários níveis, desde operacional até estratégico (de Haes, 2002). A estrutura metodológica definida pela ISO 14040 compreende as seguintes fases:

1. **Definição de escopo e objetivo:** incluindo a escolha dos produtos que serão e não serão considerados, bem como uma unidade funcional de análise (quantitativa),
2. **Análise de inventário de ciclo de vida:** determinação do fluxograma dos processos envolvidos no sistema com suas relações de materiais e energia. Para isso, limites do sistema devem ser definidos bem como opções de

intervenção ambiental. A partir disso, deve-se especificar os processos que serão analisados e quais ficarão de fora, bem como construir um modelo e um banco de dado sobre os diferentes inputs e outputs dos processos. Os modelos precisam relacionar os diferentes processos usando a unidade funcional como referência.

3. **Análise de impacto de ciclo de vida:** essa fase visa interpretar os fluxos e emissões definidos na etapa anterior em termos de aspectos ambientais. Tais resultados são agregados em categorias de impacto (Tabela 16), que podem ser ainda normalizados e/ou ponderados como o objetivo de por exemplo criar índices ambientais. Na mineração, Santero & Hendry (2016) sugerem cinco categorias de impacto: potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação, potencial de eutrofização potencial de criação de oxidantes fotoquímicos e potencial de exaustão de ozônio.
4. **Interpretação de ciclo de vida:** nesse último estágio, relaciona-se os resultados com os objetivos definidos inicialmente. Esta etapa pode incluir análise de sensibilidade e avaliações gerais – ou até uma nova iteração das etapas precedentes a fim de atingir um nível considerado satisfatório de avaliação (por exemplo a escolha dos parâmetros do modelo, redefinição de objetivos etc.).

Tabela 16 - Categorias de impacto em análise de impacto de ciclo de vida (tirado de de Haes, 2002)

Categorias relacionadas a input ('exaustão de recursos')	Categorias relacionadas a output ('poluição')
Extração de recursos abióticos (depósitos como combustíveis fósseis, minérios, água subterrânea, areia, argilas.	Mudança climática Exaustão do ozônio estratosférico
Extração de recursos bióticos	Toxicidade humana (incluindo poeiras finas e radiação)
Uso territorial (aumento da competição, degradação de funções de suporte à vida, degradação da biodiversidade)	Ecotoxicidade Foto-oxidação Acidificação Nutrificação

Na mineração há um crescente interesse nessa abordagem refletido em publicações recentes aplicando ACV a esse contexto. A indústria de mineração pode usar ACV para avaliar os impactos ambientais de suas atividades, identificar ‘hotspots’ ambientais e comparar opções tecnológicas (de diferentes tecnologias de extração e processamento).

A Tabela 17 expõe algumas referências de aplicação de ACV na mineração da literatura da última década.

Tabela 17 – Publicações relevantes de ACV na mineração na última década

Título	Autor	Objetivos
“Application of life cycle assessment in the mining industry”	Awuah-Offei & Adekpedjou (2011)	Os autores realizaram uma análise de estudos de ACV na mineração até então apontando dificuldades desses estudos na definição do escopo e unidades funcionais adequadas. Os autores ainda sugerem à época o desenvolvimento de uma estrutura de ACV específica para mineração, caracterização das incertezas dos dados de entrada e o desenvolvimento de um software específico de ACV para a mineração.
“Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production”	Norgate & Haque (2012)	Os autores conduzem uma ACV de uma operação de ouro para gerar estimativas do uso de energia, água, geração de rejeitos e emissões GEE
“A Life Cycle Assessment study of iron ore mining”	Ferreira & Leite (2015)	Os autores aplicaram ACV em uma mina de ferro do quadrilátero ferrífero (MG) para estimar os impactos de ciclo de vida do ‘berço ao portão’ com a unidade funcional de ‘tonelada de concentrado de minério de ferro produzida’.
“A life cycle assessment of silica sand: comparing beneficiation processes”	Grbes (2015)	A autora apresenta uma ACV do tipo ‘berço ao portão’ de uma operação de areia de sílica para estudar três opções diferentes de processamento e seus respectivos impactos ambientais: separação eletrostática, flotação e concentração gravimétrica.

“A global life cycle assessment for primary zinc production”	Van Genderen et al (2015)	Os autores atualizaram os modelos de impactos ambientais médios de produção de zinco (SHG) coletando dados primários de lavra, concentração, transporte e fundição para a criação de um modelo de ACV ‘berço ao portão’.
“Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway”	Song et al (2017)	Os autores desenvolveram uma ACV ‘berço ao portão’ de um projeto de cobre (subterrâneo). Diferentes cenários de energia foram comparados (eletrificação dos equipamentos e diesel) e remediação por eletrodiálise dos rejeitos antes da deposição para reduzir níveis de toxicidade.
“Environmental Optimisation of mine scheduling through life cycle assessment”	Pell et al (2019)	Os autores internalizam a metodologia de ACV no processo de sequenciamento de longo prazo em uma mina de ferro (open-pit) gerando um ‘modelo de blocos ambiental’ cujos dados são utilizados para criar restrições no planejamento de lavra seguido de uma análise de cenários considerando os impactos e os VPLs das cavas encontradas.
“Use of LCA in the mining industry and research challenges”	Lesage et al (2008)	Os autores utilizam ACV para comparar opções na gestão de rejeitos sulfatizados além de discutir desafios existentes na pesquisa de ACV e aplicações na mineração – tanto como utilizadora como provedora de dados para estudos desse tipo em geral.

Esses trabalhos sugerem que a aplicação da ACV para projetos de mineração (do berço ao portão) permite medir a performance ambiental do projeto sob categorias de impacto definida além de alternativas de design para minimizar os impactos associados. Na maioria dos casos, no entanto, esses trabalhos são realizados com abordagens retrospectivas em operações já existentes e não prospectivos, como observado por Pell et al (2019) e Song et al. (2017). No contexto do presente salienta-se a lacuna e importância de considerar a técnica de ACV já em fases de análise de viabilidade de projetos. Permanece a necessidade de uma maior harmonização da metodologia ACV com os aspectos específicos da mineração conforme sugerido por Awuah-Offei & Adekpedjou (2011).

É importante observar, portanto, que o acúmulo de estudos de ACV na mineração acaba se tornando um importante repositório de informações sobre impactos ambientais de diferentes matérias primas minerais e perfis de projetos/ operações. A International Copper Association publicou um relatório intitulado “Copper Environmental Profile”⁹ lançando valores de referência para Cobre cátodo a partir de um estudo ACV e dados de 39 membros (produtores) da organização (Anexo A). A Tabela 18 mostra os resultados da análise de impacto de ciclo de vida bem como cada categoria considerada.

Tabela 18 - Resultados da análise de inventário de ciclo de vida e categorias de impacto (International Copper Association)

AICV categorias de impacto	Descrição	Resultados por tonelada de concentrado de cobre (28%)	Resultados por tonelada de cátodo de cobre	Unidade
Demanda primária de energia, não- renovável	Medida da quantidade total de energia primária extraída da terra considerando eficiência da geração de energia e processo de aquecimento.	13000	47000	MJ
Potencial de aquecimento global (GWP 100 anos)	Medida de emissão de gases efeito estufa, como CO ₂ e metano, calculados usando o IPCC 2001 Global Warming Potential Index (GWPI100)	1100	4100	Kg CO ₂ - eq.
Potencial de Acidificação	Medida de emissões para o ar conhecidas por contribuir para a chuva acida	8,2	61	Kg SO ₂ - eq.
Potencial de eutrofização	Medida de de emissões ao ambiente que causam hipertroficação ou riqueza excessiva de nutrientes (nitrogênio e fósforo)	0,73	2,7	Kg Fosfato- eq

⁹ <https://copperalliance.eu/>

Potencial de criação fotoquímica de ozônio	Medida de emissões de precursores contribuindo para geração de poeira, produzida pela reação de óxidos de nitrogênio e VOCs sob a influencia de luz ultravioleta	0,6	3,5	Kg Eteno-eq
Potencial de exaustão de ozônio	Medida de degradação relativa a camada de ozônio que um químico pode causar, com triclorofluormetano (CFC-11) sendo fixado em ODP de 1.0	1.7E-08	1.2E-07	Kg CFC-11-eq.

Nota-se que, a demanda de energia primária (47 GJ/t Cobre cátodo) se encontra dentro do intervalo dos valores de referência para produção de cobre via hidrometalurgia e pirometalurgia, (64,4 e 33 GJ/t de cobre, respectivamente) da Tabela 11.

Outro método relevante para a mineração no contexto de Ecologia Industrial é a Análise de Fluxo de Materiais (MFA) cujo objetivo é modelar fluxos e estoques de materiais em um determinado sistema – tipicamente uma região, um setor industrial ou uma área industrial. Lèbre et al (2017) sugere indicadores baseados em MFA que podem ser aplicados a projetos de mineração (Tabela 19). Esta abordagem pode oferecer mais um módulo de análise de sustentabilidade utilizando as teorias de MFA e economia circular.

Tabela 19 - Indicadores inspirados em MFA para a mineração (Lèbre, 2017)

Indicador	Descrição
Produção Total (\$)	Produção agregada de todas commodities lavradas
Produção Total do Rejeito (\$) (TPW)	Produção a partir de rejeito (secundária)
Total de Material Processado (t)	Total de material processado pela planta na vida do projeto
Total de Material Movimentado (t)	Total de material movimentado para extrair o material processado = TMP – Rejeito

Geração total de rejeitos reativos (t)	Geração total de rejeito causando infiltração ácida
Geração de novos rejeitos (t)	Geração total de rejeito, total de rejeitos processados (ex. reprocessamento de rejeitos de beneficiamento)
Perdas minerais para novos rejeitos (\$) PMNR	Estimativa agregada de minerais contidos em rejeitos gerados pelo projeto de mineração
Perdas minerais totais para rejeitos	PMNR – TPW (Novas perdas – Perdas recuperadas)
Eficiência Material (\$/t)	Produção Total / Total de material movimentado
Ineficiência da Extração (%)	PMNR / (Produção Total + PMNR)
Novas áreas impactadas (Ha)	Total de área virgem impactada pelo projeto

Criticamente, a abordagem dos autores possui alguns inconvenientes que podem ser discutidos, especificamente:

- Os autores atribuem um valor monetário (\$) para agregar os diferentes elementos sob análise, no entanto há dois limitantes: primeiro, assim como o produto principal, o valor econômico dos elementos varia com o tempo além de incorrer em risco de equívocos na análise do benefício econômico em um possível reaproveitamento do rejeito (os custos para extrair e processar aquele material). Sugere-se, portanto, a complementação com indicadores em unidades físicas (por exemplo, toneladas de Cu/ toneladas de rejeito (total)).

2.2.5 Fatores ESG na mineração

Crítérios do tipo ESG (Ambientais, sociais e de governança) tem sido crescentemente usado por investidores para medir níveis de sustentabilidade para investimento em uma empresa ou negócios. Tais fatores tem ganhado relevância nas empresas de mineração e o resultado disso é que muitas dessas empresas já adotaram tais critérios em seus princípios de negócio. Nas últimas décadas, a indústria avançou fortemente no desenvolvimento de melhores práticas para gerir

riscos técnicos (e.g. distribuição de teores, eficiência de processos, riscos geotécnicos, custos operacionais etc.) mas ao mesmo tempo viu as incertezas do tipo ESG se tornarem mais difíceis de gerir (Bruce, 2014). Em linhas gerais, mineradoras atualmente buscam enfatizar que além de criar valor para seus acionistas também contribuem para impactos positivos às comunidades locais e economias regionais onde operam, levando melhores condições de trabalhos aos seus empregados e acesso a melhores serviços de saúde, educação e empregos (Tabela 20).

Tabela 20 - Exemplos de fatores ESG (adaptado de Lins & Horowitz, 2007)

Ambientais	Sociais	Governança
<ul style="list-style-type: none"> • Biodiversidade • Gestão Territorial • Mudança Climática • Gestão do uso da água 	<ul style="list-style-type: none"> • Saúde e segurança da comunidade e trabalhadores • Relação com <i>stakeholders</i> • Políticas para o ciclo de vida da mina • Direitos humanos • Desenvolvimento da comunidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestão da cadeia de suprimentos • Transparência e <i>accountability</i> • Indicadores de performance externos • Iniciativas globais/ setoriais

As mineradoras que se destacam nesses critérios portanto podem passar a ter vantagens competitivas, incluindo acesso a capital de investidores, que podem traduzir esses aspectos a um menor risco de capital. Tais mudanças também foram direcionadas por investidores e financistas na mineração demandando maior transparência na exposição de riscos ESG das empresas. Por exemplo, a Equator Principles Association¹⁰ criou critérios de gestão de riscos ESG cujas instituições financeiras aderentes devem aplicar para restringir financiamento a projetos que falham em atender os requisitos mínimos. Relatórios recentes sugerem inclusive que há um aumento significativo no ‘investimento sustentável’ onde fundos de investimento passam a centrar explicitamente suas estratégias de investimento á negócios com forte performance em sustentabilidade. Em nível de projeto tais

¹⁰ <https://equator-principles.com/>

condições passam a ser cruciais visto que há uma relação importante entre as condições locais onde os depósitos estão localizados bem como estes fatores se expressam na percepção de risco do projeto – que por sua vez pode ser crucial para o acesso ao capital necessário para desenvolver tais projetos. Nota-se que o perfil de risco técnico e corporativo possui diferentes perfis ao longo da vida útil do projeto – no caso do último, diretamente relacionado ao comprometimento de capital no projeto, antes do *payback*.

A ICMM¹¹ define 10 princípios e boas práticas por meio de expectativas de performance em aspectos diretamente ligados a fatores ESG:

1. **Negócios éticos:** aplicando práticas éticas e sistemas sólidos de governança corporativa e transparência;
2. **Tomada de decisão:** integrando desenvolvimento sustentável na estratégia corporativa e em processos de tomada de decisão
3. **Direitos humanos:** respeitando os interesses, culturas, costumes e valores de empregados e comunidades afetadas pela atividade;
4. **Gestão de risco:** implementação de estratégias e sistemas efetivos baseado em ciência que considere a percepção de risco dos stakeholders;
5. **Saúde e segurança:** Buscando melhora contínua na performance com o objetivo final de ‘zerar os danos’;
6. **Performance ambiental:** buscando melhorias contínuas em aspectos como gestão do uso da água, energia e mudanças climáticas;
7. **Conservação da biodiversidade:** abordagens integradas com a gestão do uso da terra.
8. **Produção responsável:** facilitar e auxiliar a base de conhecimento e sistemas para o design, uso, reuso e disposição responsável de produtos contendo metais e minerais;
9. **Performance social:** buscando melhora contínua e contribuindo para o desenvolvimento social, econômico e institucional dos países e comunidades; e

¹¹ <https://www.icmm.com/mining-principles>

10. Relação com os stakeholders: proativamente se engajar com stakeholders-chave em desafios e oportunidades de desenvolvimento sustentável de maneira aberta e transparente. Reportar efetivamente e verificar de forma independente o progresso e performance.

Fatores ESG, portanto, são cruciais para garantir a ‘acessibilidade’ dos projetos. Conforme a definição de Sykes & Trench, ‘acessibilidade’ pode ser compreendida como uma terceira dimensão na definição de reservas proposta por McKelvey onde reservas se encontram no quadrante de alto conhecimento geológico e viabilidade econômica (Figura 11). Ainda que códigos de mineração como a JORC sugiram que a definição de reservas deve considerar para além de fatores técnicos aspectos legais, ambientais, sociais, de infraestrutura e governamentais, não há abordagens em nível sistemático que deem o mesmo grau de confiança que aspectos técnicos (geologia, extração, processamento, economia etc.) (Otto, 2019).

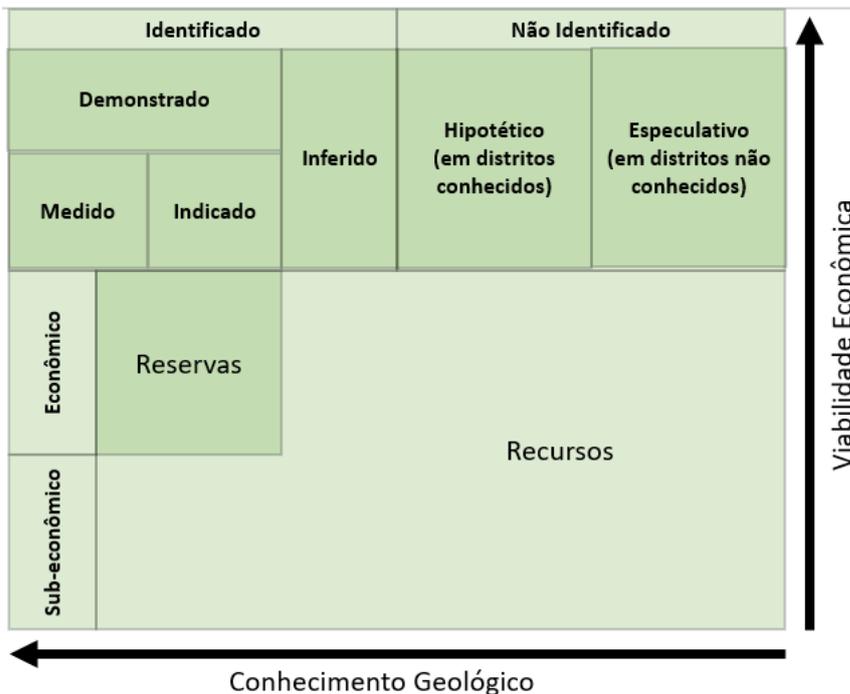


Figura 11 - Classificação McKelvey de recursos minerais (Revuelta, 2018)

Estas ‘Reservas Conceituais’ definidas por Sykes & Trench (2014) expressam, portanto, em termos de risco econômico e valor do projeto a interrelação dos fatores ESG com as dimensões clássicas de conhecimento geológico e projeto de

engenharia. É importante salientar que essa expressão é dinâmica no tempo, o que em uma análise mais estratégica significa que há diferentes 'reservas hipotéticas' que podem evoluir dentro de diferentes cenários futuros (Figura 12)

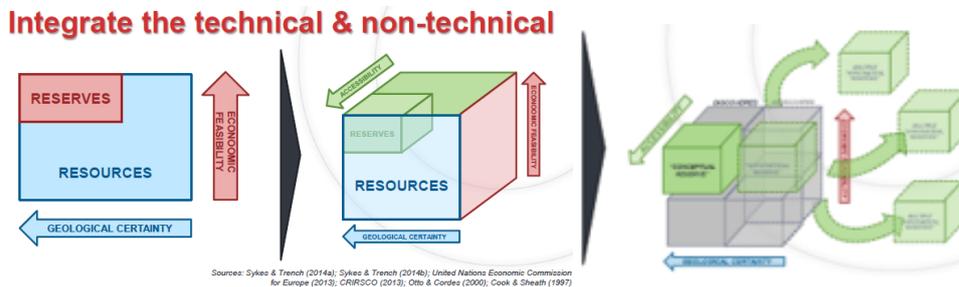


Figura 12 - - Integração de aspectos técnicos e não-técnicos e sua expressão na definição de reservas (Sykes & Trench, 2014)

Os autores sugerem uma metodologia genérica para medir a 'acessibilidade' de uma reserva e auxiliar a tomada de decisão no desenvolvimento de projetos de mineração:

1. Estabelecer quais fatores influenciam um projeto de mineração;
2. Contar a frequência com que esses fatores afetam projetos de mineração;
3. Calcular como esses fatores restringem os inputs do modelo de avaliação econômica;
4. Aplicar 'dinâmica de sistemas' para determinar como esses fatores se conectam; e
5. Desenvolver uma 'reserva conceitual' combinando a avaliação de fatores econômicos e não-técnicos/relacionados a sustentabilidade.

Recentemente, Lèbre et al (2019) avaliaram geograficamente diversos depósitos não-desenvolvidos de cobre, ferro e alumínio à luz de critérios ESG. Tal metodologia busca sugerir uma classificação de risco em tornar tais depósitos minas produtivas sob os seguintes critérios:

- Perfis de rejeito;
- Água;
- Biodiversidade;

- Uso territorial;
- Populações Indígenas;
- Vulnerabilidade social;
- Fragilidade política;
- Condições de aprovação e licenciamento.

Essa abordagem permite um ranqueamento por meio de um escore desses critérios para cada depósito. Mais especificamente no caso do cobre, Valenta et al (2019) complementam essa abordagem ao criar um perfil de riscos do tipo ESG para as futuras minas potenciais de cobre. Os autores observam que ‘uma proporção significativa da oferta futura de cobre envolve riscos ESG’ e complementam que ‘novos projetos de cobre devem conduzir análise de risco multifatorial, com foco na performance de sustentabilidade de longo prazo’.

2.3 SIMULAÇÃO E DINÂMICA DE SISTEMAS

2.3.1 Introdução, definições e considerações gerais

A metodologia de dinâmica de sistemas desenvolvida por Jay Forrester, professor do MIT na década de 60, é baseada em sistemas de feedback originados na teoria de controle¹² e na teoria de dinâmicas não-lineares (Sterman, 2000). A abordagem também se caracteriza pelo uso de *delays* temporais e estruturas com diferentes loops de informação típicos de sistemas complexos e dinâmicos. O princípio fundamental da dinâmica de sistemas é de que a estrutura do sistema determina o seu comportamento. Tal metodologia então tem sido largamente utilizada em problemas organizacionais, socioeconômicos, de sustentabilidade e para suporte de definição de políticas e estratégias de longo prazo. Atualmente, diversos programas

¹² Do sub-campo da matemática em engenharia de sistemas de controle, lida com o controle de sistemas dinâmicos contínuos em processos e máquinas de engenharia.

computacionais permitem a modelagem e simulação em dinâmica de sistemas aproveitando o avanço computacional das últimas décadas.

Podemos entender sistemas como um agrupamento de partes (ou subsistemas) que operam em conjunto para um propósito comum. Podem ser classificados em sistemas abertos ou sistemas de *feedback*. Em um sistema aberto ações passadas não influenciam ações futuras, já em um sistema de feedback os inputs do sistema são alterados com base nos outputs, trazendo resultado de ações passadas para controlar ações futuras. Esse tipo de sistema pode ser classificado em positivo ou negativo. Em um sistema positivo há um comportamento de 'reforço', ou o aumento de uma variável gera crescimento na outra e em cadeia, torna a aumentar a variável inicial. Já em um *feedback* negativo há um comportamento de balanceamento, onde a reação em cadeia a partir de uma variável tende a estabilizar (aumentando ou diminuindo) o seu comportamento. O termostato é um simples exemplo desse tipo de sistema negativo, onde busca manter uma temperatura definida de um objeto ou local independente das variações na temperatura ambiente/externa. Todos os comportamentos dinâmicos em dinâmica de sistemas são produto dessas interrelações (positiva e negativa) entre seus componentes. A metodologia de Forrester portanto pode permitir a construção de modelos computacionais para realizar o que a mente humana não conseguiria: analisar racionalmente as estruturas, interações e modos de comportamento complexos em sistemas socioeconômico, tecnológico, biológico e político (Bala et al 2017).

Um sistema aqui compreendido, portanto, possui as seguintes características:

- Possui um objetivo;
- Possui loops de *feedback*;
- Se adaptam e evoluem de acordo com sua estrutura;
- São não-lineares;
- São dinâmicos por natureza;
- São compostos por subsistemas.

Para construir um modelo inicialmente deve se identificar o problema a ser abordado bem como seus limites e definir objetivos específicos. Após, define-se uma hipótese dinâmica, consistindo em um diagrama de loops causais a fim de definir os loops de feedback que direcionam o comportamento do sistema. Uma vez simulado

esse tipo de modelo, sua estrutura endógena deve gerar o comportamento de referência do sistema e, portanto, a estrutura endógena causa as mudanças no comportamento dinâmico do sistema (Sterman, 2000). Loops de diagramas causais buscam explicitar a relação entre as variáveis do sistema, descrevendo mecanismos causais hipotetizados. Estas podem ser endógenas (dentro dos limites do modelo) ou exógenas (fora dos limites do modelo). Tal descrição facilitará a definição do diagrama de estoque-fluxo, que é a estrutura física por trás do sistema em termos de estoques e fluxos. Este representa as equações diferenciais envolvendo as variáveis da estrutura de feedback loops e a simulação do comportamento dinâmico do sistema. O processo de desenvolvimento de um estudo em DS pode ser resumido em 6 etapas (Figura 13).

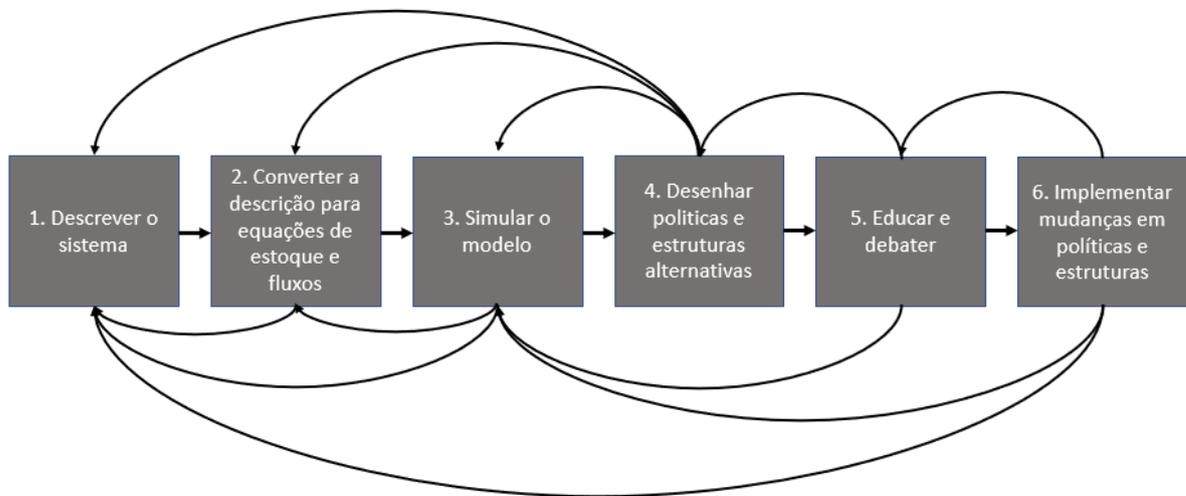


Figura 13 - Etapas de um estudo em dinâmica de sistemas (adaptado de Forrester, 1994)

Os diagramas de loops causais (DLC) são, portanto, úteis para entender o comportamento e relação de causa e efeito dos elementos constituintes do modelo. Se trata de um processo qualitativo e por vezes participativo que facilitará a modelagem quantitativa de estoques e fluxos para a simulação. A Figura 14 exemplifica um arquétipo de DLC no contexto desse trabalho.

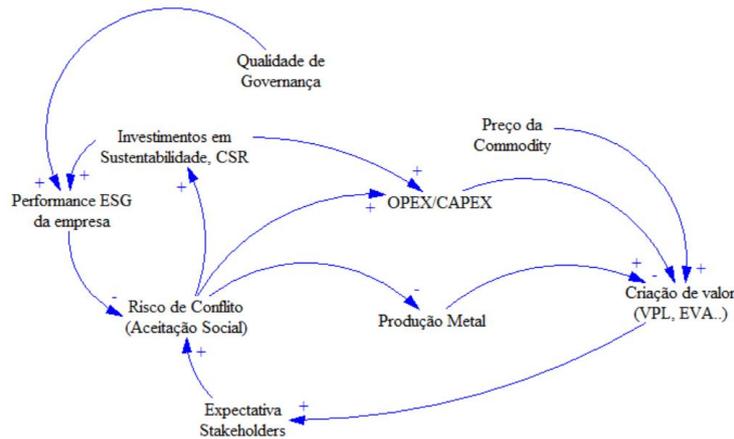


Figura 14 - Exemplo de diagrama de loops causais - arquétipo de impacto da aceitação de um projeto no seu valor econômico (Fonte: o autor)

Tais diagramas são representados por elementos conectados com flechas apontando para a relação causa-efeito e uma polaridade (+ ou -). Essa notação identifica se uma mudança na variável causa está reforçando o efeito (ou aumentando o mesmo) ou balanceando o efeito (diminuindo o mesmo). Em outras palavras, feedback positivo denota um processo de ‘auto-reforço’, enquanto um feedback negativo denota um processo que se ‘autocorrige’ (Sterman, 2000). É importante salientar, portanto, que feedback aqui não deve ser entendido como um eufemismo de crítica nem elogio. Na Figura 16 vemos que o aumento no risco de conflito causa uma redução na produção de metal (por meio de interrupções à produção, atrasos no licenciamento ou desenvolvimento da mina) ao mesmo tempo que aumenta o CAPEX/OPEX (custos de adaptação de projeto, reparação de danos etc.). Ou seja, *ceteris paribus*, se X aumenta (diminui), então Y aumenta (diminui) acima do que seria originalmente:

$$\frac{\partial y}{\partial x} > 0 \text{ (para fluxos) ou } Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0} \text{ (para estoques)}$$

Da mesma forma, se X aumenta (diminui), então Y diminui (aumenta) abaixo (acima) do que teria sido originalmente:

$$\frac{\partial y}{\partial x} < 0 \text{ (para fluxos) ou } Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0} \text{ (para estoques)}$$

Na modelagem de dinâmica de sistemas, estoques e fluxos são os principais elementos. Estoque, portanto, se refere a acumulações em um determinado instante

de tempo, enquanto fluxos se referem às variações de unidades no tempo do estoque. Assim, diagramas de estoques e fluxos devem representar como estes estão interconectados para produzir *feedback loops* e como se interconectam para criar o sistema.

O estoque é a variável que descreve a condição ou estado do sistema em qualquer momento. Se trata de uma acumulação tipicamente representada por retângulos em ambientes de modelagem. Estoques integram fluxos de entrada e saída, sendo, portanto, uma equação diferencial integral de primeira ordem.

Equação 10 - Determinação da taxa de variação de um estoque no tempo t

$$\frac{d(\text{Estoque})}{dt} = \text{Fluxo de Entrada}(t) - \text{Fluxo de Saída}(t)$$

Equação 11 - Determinação de um estoque no tempo t sujeito a fluxos de entrada e saída

$$\text{Estoque}(t) = \int_0^t [\text{Fluxo de Entrada}(s) - \text{Fluxo de Saída}(s)] ds + \text{Estoque}(0)$$

Já um fluxo é representado por variáveis que mostram o quão rápido os estoques estão variando. Tipicamente representado como válvulas em ambientes de modelagem e consistindo em fluxos de entrada e saída.

Para a resolução desse tipo de problema, os softwares de modelagem geralmente utilizam métodos de integração numérica, como o método de Euler e Runge-Kutta de quarta ordem (Bala et al 2017). Na modelagem, também são usadas variáveis conversoras, cuja função é trazer valores constantes, definir inputs externos, calcular relações algébricas além de servir de repositório para funções gráficas (Bala et al 2017).

Os atrasos ou (*'Delays'*) dizem respeito a diferença entre a ação e seu resultado (consequência) dessa ação – um *lag* temporal ou material entre input e output. Tipicamente é definido como atrasos de primeira a terceira ordem. No *delay* de primeira ordem, o fluxo de saída é sempre proporcional ao estoque de material em trânsito. Um *delay* de segunda ordem consiste em dois *delays* de primeira ordem em série, onde cada *delay* temporal é definido como a metade do *delay* temporal original. Do mesmo modo, um *delay* de terceira ordem se trata de três *delays* de primeira ordem, onde cada *delay* representa um terço do *delay* temporal original.

Os ambientes de modelagem também permitem funções sem integração, do tipo fluxo ou conversores. São procedimentos computacionais como interpolação via tabelas, teste de inputs, aleatoriedade e escolhas lógicas.

Finalmente, como qualquer metodologia, possui vantagens e desvantagens que devem ser pesadas pelo contexto de aplicação (Tabela 22).

Tabela 21 - Prós e contras de dinâmica de sistemas (adaptado da European Foresight Platform¹³)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Auxiliar na compreensão e antecipação de mudanças sob sistemas complexos; • A base de informações e conceitualização em DS é mais ampla que a base numérica de pesquisa operacional e modelagem estatística • É compatível com processos participativos e engajamento de diferentes <i>stakeholders</i> (e.g. diagramação de loops causais) • Compatibilidade com métodos complementares – planejamento de cenários, pesquisa operacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite rodar apenas uma situação de cada vez; ainda que os valores e variáveis possam ser alteradas indefinidamente. • Quanto maior o escopo do modelo, maior ele se torna e mais complexa sua compreensão, especialmente sob a ótica de diferentes stakeholders

Sterman (2000) resume que a ‘arte’ da modelagem de dinâmica de sistemas está em descobrir e representar os processos de feedback, que, juntamente com as estruturas de estoque e fluxos, *delays* temporais e não-linearidades, determinam a dinâmica de um sistema. O autor ainda reforça que as heurísticas que usamos para julgar relações causais nos levam a mapas cognitivos que ignoram sistematicamente feedbacks, múltiplas interrelações, não-linearidades, *delays* temporais e outros elementos de complexidade dinâmica.

¹³<http://www.foresight-platform.eu/community/forlearn/how-to-do-foresight/methods/gaming-simulation-and-models/system-dynamics/>

2.3.2 Aplicações na mineração

Uma busca via internet de publicações utilizando a ferramenta Google Scholar e Scopus permite verificar a existência de trabalhos científicos aplicando dinâmica de sistemas a casos relacionados à mineração. A Tabela 23 resume as publicações encontradas. Nessa revisão, foram excluídas publicações que tratavam de alguma forma da análise de oferta e demanda para previsão das mesmas – ou previsão de preço - de commodities minerais por sair do escopo da presente dissertação, ainda que representem um dos grandes pilares da aplicação de dinâmica de sistemas (Sterman, 2000).

Tabela 22 - Publicações aplicando DS na mineração

Título	Autores/ ano	Resumo
“A System Dynamics Model of Mining Industry Investment Decisions within the Context of Environmental Policy”	O’Reagan & Mole (2001)	Modelo com 180 variáveis interrelacionadas a fim de examinar os efeitos de diversas políticas ambientais, fiscais e corporativas no fluxo de investimento entre diferentes mineradoras simuladas e países.
“Investment Decisions of International Mining Firms: Policy Approaches”	O’Reagan & Mole (2002)	Aplicação de dinâmica de sistemas para entender os fatores que afetam os fluxos de investimentos de fundos internacionais em mineração, examinando a efetividade de variadas políticas ambientais, fiscais e políticas corporativas.
“Using system dynamics to model the interaction between environmental and economic factors in the mining industry”	O’Reagan & Mole (2006)	Representação das interações entre políticas ambientais e econômicas no comportamento de longo prazo dos fluxos de investimento de fundos em mineração.
“A System Dynamics Model of Mining Cost Estimation”	Sontamino & Drebenstadt (2013)	DS utilizado para compreender o comportamento dos custos de mineração em diferentes cenários de taxa de produção e custos ambientais.
“Real options decision framework: Strategic	Inthavongsa et al (2016)	Busca desenvolver uma ferramenta de tomada de decisão dinâmica integrando opções reais e

operating policies for open pit mine planning”		dinâmica de sistemas para auxiliar nas estratégias de planejamento em mina open pit
“Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model”	Savolainen et al (2016a)	Investimentos em mineração de metálicos são modelados como sistemas técnico-econômicos usando DS demonstrando a habilidade de modelar opções reais que existem em um ativo individual.
“Combining System Dynamic Modeling and the Datar–Mathews Method for Analyzing Metal Mine Investments”	Savolainen et al (2016b)	Combina o método Datar-Mathews de opções reais com DS para analisar um projeto de níquel sob a perspectiva do operador. Também emprega uma taxa de desconto dinâmica refletindo a variação nos níveis de endividamento do projeto.
“Research on Mineral Resources and Environment of Salt Lakes in Qinghai Province based on System Dynamics Theory”	Kong et al (2017)	DS utilizado para compreender a relação e interdependências entre a extração mineral de um lago salino e o sistema ecológico gerando referências para tomada de decisão em termos de desenvolvimento socioeconômico e proteção ambiental.
“Application of Real Options on the Decision Making of Mining Investment Projects Using the System Dynamics Method”	Liu et al (2019)	Integração de opções reais e DS para avaliação de investimentos em projeto de mineração, utilizando DS para analisar a dinâmica do sistema de operação de mina, quantificando suas variáveis e interações e estimar sua volatilidade, permitindo uma melhora acurácia na avaliação por opções reais.
“Real option valuation of an Indian iron ore deposit through system dynamics Model”	Hazra et al (2019)	Integração de opções reais e DS para simulação de vários parâmetros estocásticos de planejamento de mina para melhorar o método de avaliação de projetos.

Percebe-se que a literatura de dinâmica de sistemas na mineração engloba aplicações de avaliação econômica e financeira, com destaque para o uso de técnicas de opções reais, bem como avaliações estratégicas integrando considerações ambientais como proposto por O’Reagan e Mole (2002) e mais recentemente Kong et al (2017). No entanto, ainda há pouca representatividade na literatura desse tipo de aplicação, além de não se observar integração com outras áreas como ecologia industrial.

3 METODOLOGIA

3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma abordagem de dinâmica de sistemas que reproduza a dinâmica da evolução de um projeto de mineração expressado pelo seu valor econômico e por indicadores pertinentes no contexto de avaliação de projetos de mineração em fase conceitual.

Dessa forma, pode-se propor diferentes estudos com suas respectivas adaptações para fatores específicos e/ou locais de um projeto. Propõe-se a análise de um projeto de cobre cujos dados de entrada serão trazidos de duas fontes principais: revisão de literatura para valores e equações de referência e software MAFMINE para determinação de custos associados.

Em uma primeira etapa será definido o conjunto de subsistemas que compõem o sistema a ser modelado bem como suas interrelações a partir de hipóteses dinâmicas. Paralelamente, define-se as premissas a serem utilizadas a fim de representar o conceito de projeto proposto p. ex. tamanho de reservas, taxa de produção, rotas de processamento etc. ilustrados na Figura 13. Em uma segunda etapa, esta fase conceitual será convertida em equações no modelo para a simulação usando um modelo conhecido consistindo em um fluxo de caixa de um projeto de Cobre. Por fim, a última etapa consiste na interpretação dos resultados, comparações e conclusões.

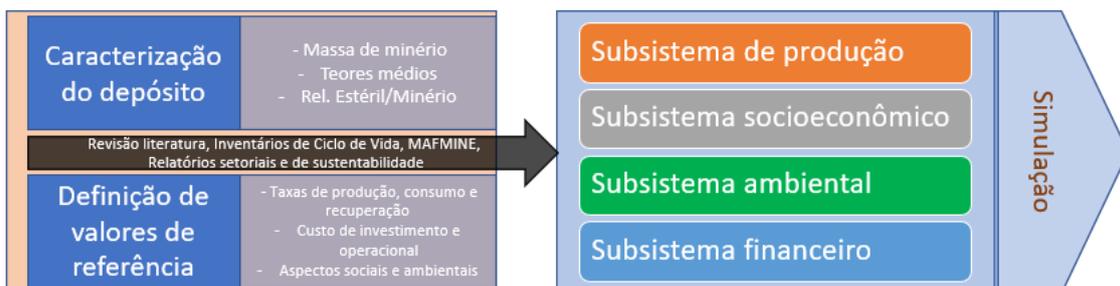


Figura 15 - Estrutura metodológica proposta

Assim, pode-se realizar uma comparação entre as diferentes abordagens de simulação e discutir os resultados a partir de indicadores propostos. Estes são:

- **Econômicos:** Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno;
- **Produção e Impacto Ambiental:** Eficiência Material, ineficiência de extração, estresse de água, emissões de CO₂ equivalente e demanda energética primária, potencial de neutralização líquido;
- **Socioeconômicos:** Receita sobre custos sociais, contribuição local por tonelada de produto.

Tais indicadores foram definidos para este trabalho com base nos aspectos mais relevantes observados na literatura bem como disponibilidade de dados.

As próximas seções deste capítulo tratam do detalhamento dos subsistemas, seus componentes e referências utilizadas.

3.2 DEFINIÇÃO DOS SUBSISTEMAS DO MODELO

A partir da revisão de literatura e dos objetivos da dissertação, foram definidos 4 subsistemas de análise para serem modelados no ambiente de dinâmica de sistemas. A Tabela 24 resume os subsistemas e seus principais componentes enquanto a Figura 16 ilustra o perfil de variáveis associadas. Tais componentes refletem a disponibilidade de dados e avaliação do autor sobre a importância dos mesmo para realização desse tipo de estudo. Entretanto, salienta-se que na prática há uma série de outros elementos que podem ser relevantes na consideração do processo produtivo, impactos ambientais, modelagem financeira e de aspectos socioeconômicos. A definição exata das variáveis depende, portanto, do nível de detalhamento do estudo e de aspectos específicos ao projeto a ser analisado.

Tabela 23 - Subsistemas de análise propostos

Subsistema de produção	Subsistema Ambiental
<ul style="list-style-type: none"> Reserva lavrável Taxa de produção e processamento Geração de rejeitos Consumo de inputs primários (água, energia e outros) Indicadores de produção 	<ul style="list-style-type: none"> Estresse de água Emissões Potencial ácido de rejeitos Área impactada Indicadores ambientais
Subsistema Socioeconômico	Subsistema Financeiro
<ul style="list-style-type: none"> Contribuição econômica local Empregabilidade Governança e investimentos em sustentabilidade Probabilidade de conflitos 	<ul style="list-style-type: none"> Fluxo de caixa descontado Preço de venda CAPEX/OPEX Impostos e royalties Taxa de desconto

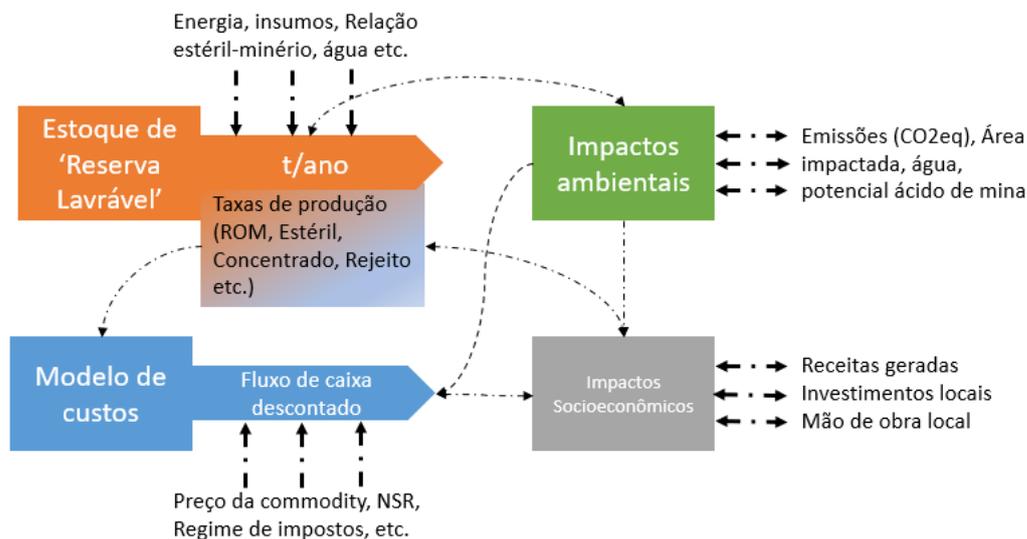


Figura 16 - Subsistemas do modelo e perfil de variáveis associadas

3.2.1 Subsistema de Produção

O subsistema de produção reflete a cadeia de produção de uma matéria prima mineral, do depósito até o produto a ser vendido bem como os inputs físicos

necessários como consumo de materiais, energia e água. O subsistema de produção portanto depende do perfil de projeto sendo analisado refletido nas premissas (dados de entrada) adotados bem como das técnicas adotadas de produção: método de lavra, rotas de beneficiamento e variáveis associadas. Por fim, o subsistema de produção determinará principalmente:

- Tonelagens associadas a cada processo e rejeitos gerados;
- Consumo de energia associada a cada etapa do processo produtivo;
- Consumo de insumos necessários para diferentes etapas do processo produtivo;
- Consumo de água necessário para a produção da matéria prima

A Figura 17 ilustra um diagrama de loops causais, sugerindo a dinâmica básica de um processo de produção mineral. Conforme sugerido pela equação de Taylor, quanto maior a tonelagem esperada em um depósito maior a taxa de produção, que por sua vez aumenta a velocidade com que o depósito é exaurido. A produção do produto final da operação (cátodo, concentrado etc.) será também controlada pelo teor de corte definido, ou seja, o teor a partir do qual a unidade mássica de rocha extraída do subsolo é definida como minério ou estéril. Em geral, quanto maior o teor do minério menor a recuperação relativa do beneficiamento.

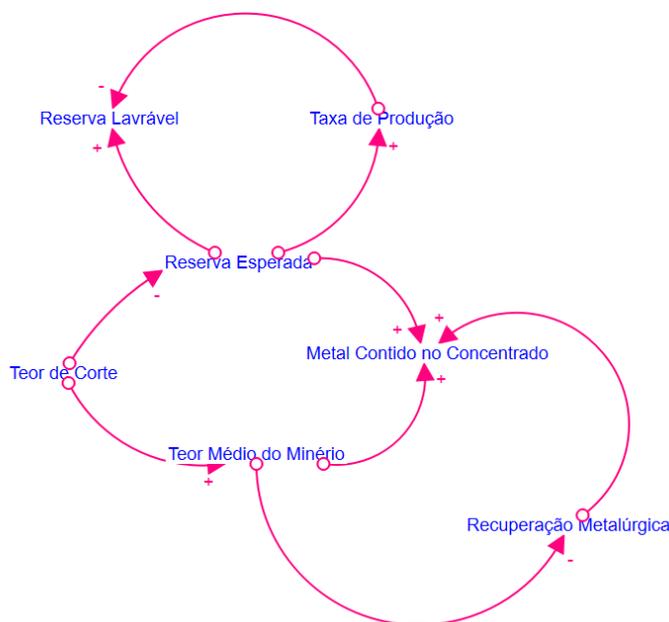


Figura 17 - Diagrama de Loops Causais - Subsistema de Produção

Tal descrição pode ser modelada em ambiente de dinâmica de sistemas conforme demonstrado na Figura 18. A Figura 19 lista os inputs necessários para a atividade operacional como insumos, energia e água.

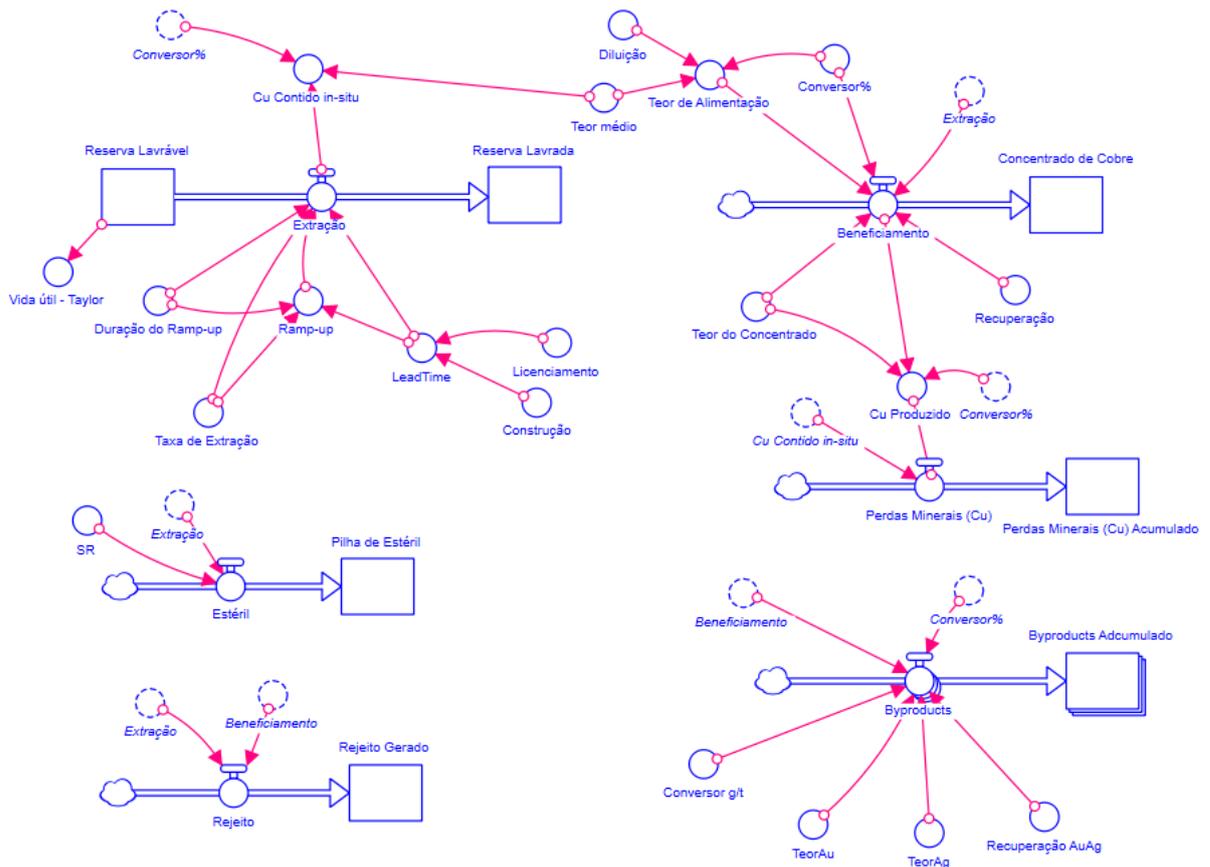


Figura 18 - Subsistema de Produção em ambiente de dinâmica de sistemas

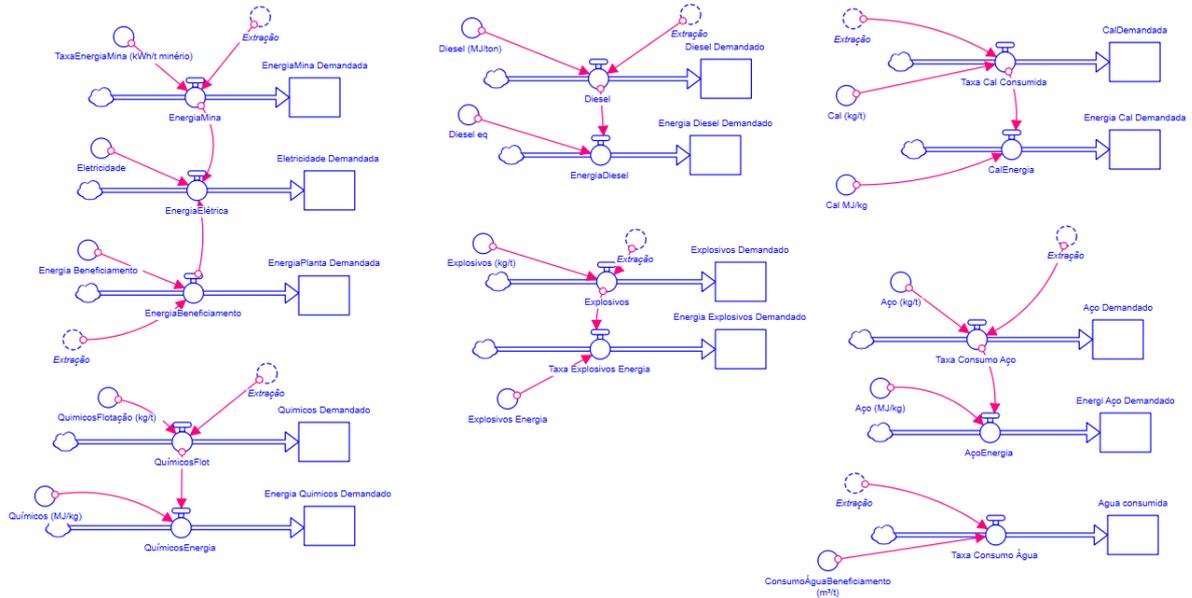


Figura 19 - Complemento do subsistema de produção com inputs primários de produção (energia, insumos etc.)

3.2.2 Subsistema Financeiro

O subsistema financeiro consiste na modelagem de um fluxo de caixa descontado em ambiente de dinâmica de sistemas, convertendo as diversas variáveis físicas dos outros subsistemas em monetárias a fim de determinar indicadores típicos de avaliação econômica como o Valor Presente Líquido. A lógica de modelagem está representada nas Figuras 20, 21 e 22. A modelagem do subsistema ainda deve garantir compatibilidade com os intervalos temporais de pré-produção (duração de licenciamento e construção). Além disso, os custos de fechamento devem ser modelados de forma a serem incorridos durante um determinado período próximo ou ao final da vida útil da mina (que pode variar com diferentes simulações/ cenários).

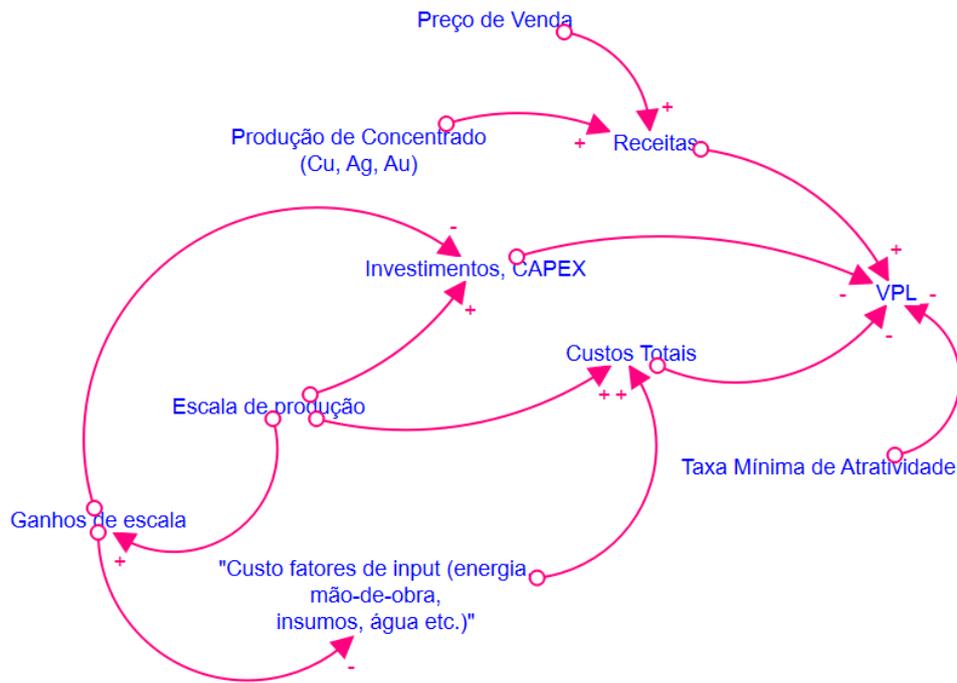


Figura 20 - Diagrama de Loops Causais - Subsistema Financeiro

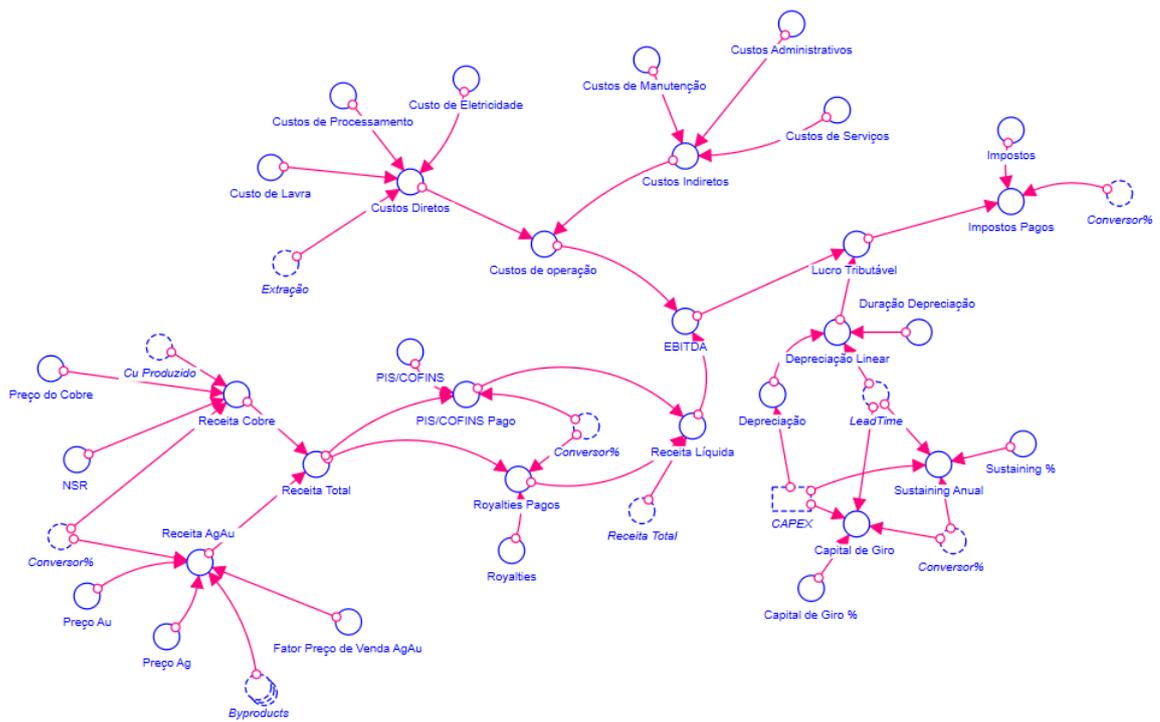


Figura 21 - Subsistema Financeiro em ambiente de dinâmica de sistemas – sem fluxo de caixa e investimentos

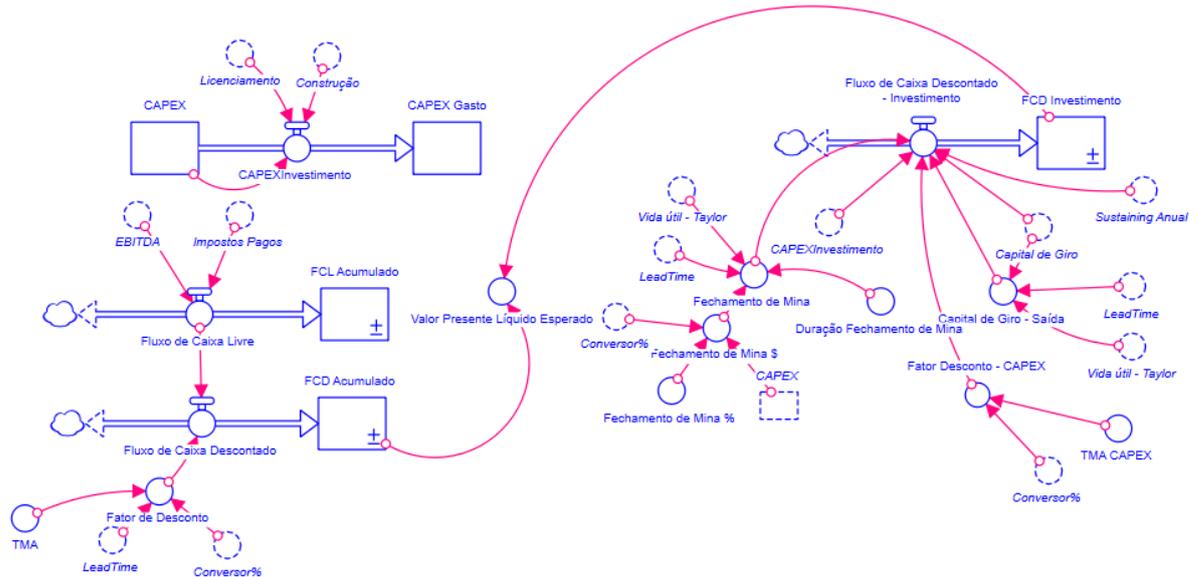


Figura 22 - Fluxo de caixa e investimento modelados no subsistema financeiro

3.2.3 Subsistema Ambiental

No modelo proposto, o subsistema ambiental compreenderá basicamente impactos associados ao processo produtivo relacionados a utilização de água, emissão de GEE, área impactada e geração de rejeitos. Além disso, são propostos indicadores que expressem unidades físicas e monetárias (externalidades). A Figura 23 ilustra a lógica do subsistema ambiental e a Figura 24 apresenta a modelagem em ambiente de dinâmica de sistemas.

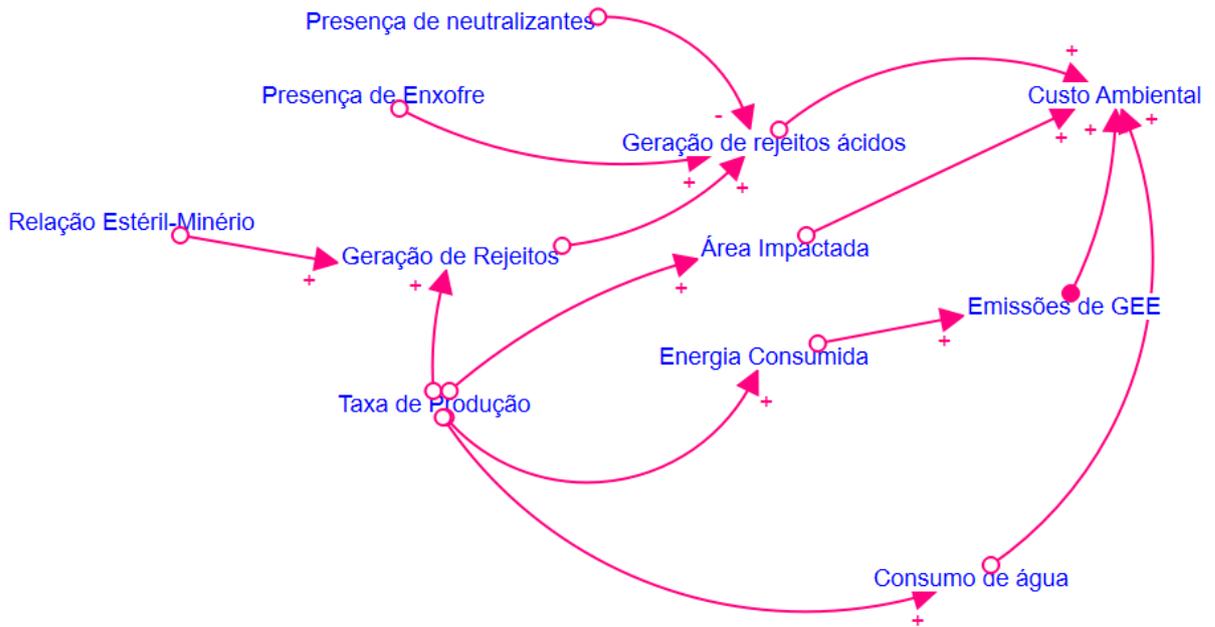


Figura 23 - Diagrama de Loops Causais – Subsistema Ambiental

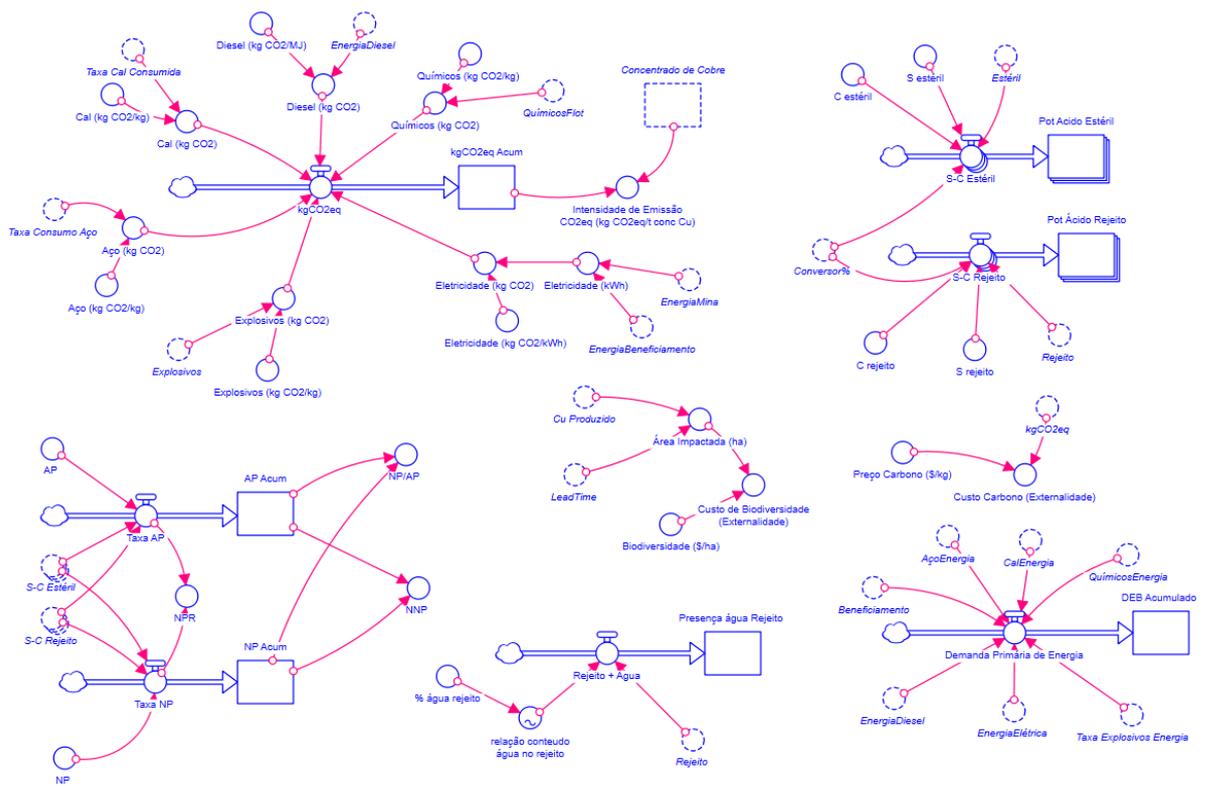


Figura 24 - Subsistema Ambiental modelado em ambiente de dinâmica de sistemas

3.2.4 Subsistema Socioeconômico

O subsistema socioeconômico captura os efeitos do projeto em aspectos relacionados a comunidade via medidas de contribuição econômica e perfis de aceitação do projeto ('Licença Social para Operar'). No primeiro caso, a contribuição econômica se dá pela interrelação da produção com variáveis de modelo financeiro, ilustrado na Figura 25 e 26. Nesse caso, o perfil do projeto ditará:

- Porcentagem de gastos locais com CAPEX
- Porcentagem de mão de obra local
- Gastos com mão de obra local
- Gasto local da mão de obra
- Investimentos locais em sustentabilidade (Responsabilidade Social Corporativa)



Figura 25 - Diagrama de loops causais – Subsistema Socioeconômico

3.3 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS AO SOFTWARE DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Há diversos softwares disponíveis no mercado que permitem a modelagem de dinâmica de sistemas. Entre eles destaca-se o STELLA Architect®, VENSIM® e POWERSIM®, como softwares populares e acessíveis em versões PLE (*Personal Learning Edition*, gratuitas) e/ou módulos pagos acessíveis para fins acadêmicos. Há ainda outros softwares que integram diferentes paradigmas de simulação além de dinâmica de sistemas (e.g. simulação de eventos discretos e baseada em agentes) como o AnyLogic® e o Matlab Simulink®. Neste trabalho, optou-se pela modelagem dos sistemas no software STELLA Architect em sua versão acadêmica paga.

3.4 ESTUDOS DE CASO

A fim de ilustrar a aplicação do modelo de forma representativa, um estudo foi realizado a partir de dados obtidos de publicação do projeto de cobre Salobo¹⁴, complementado com o modelo de custos gerado pelo Software MAFMINE para o ano-base de 2015, resumidos na Tabela 25.

Tabela 24 - Premissas gerais de cada caso

Variáveis	Premissas	Variáveis	Premissas
Reserva (Mt)	784	Preço Cu	7000 \$/t
Alimentação Planta (Mt)	23.43	Preço Au	50 \$/g
Teor de Cu	0.96%	Preço Ag	0.48 \$/g
Teor de Au no concentrado	16 g/t	CFEM	2%
Teor de Ag no concentrado	55 g/t	PIS & COFINS	9.25%

¹⁴ Dados publicados na revista “Minérios & Minerais N°217” (1997)

Recuperação Cu	86.5%	OPEX (M\$/ano)	353
Recuperação Au/Ag	67.5%	Capital de Giro	15% CAPEX
Teor Concentrado Cu	38%	CAPEX (MUS\$)	1287
Cobre Pagável	70%	Capital de sustentação	5% CAPEX
Au/Ag Pagável	95%	Fechamento de Mina	25% CAPEX
Imposto corporativo	34%	Empregados	1000

Tais dados são complementados com valores retirados da literatura, para permitir o cálculo das variáveis e indicadores sugeridos no modelo. A Tabela 25 resume os dados complementares bem como a fonte utilizada.

Tabela 25 - Premissas adotadas no modelo e fonte de referência dos valores utilizados

Variáveis	Valor de Referência	Fonte
Teor de enxofre no rejeito	2% (0,3-11%)	Rankin (2011)
Teor de enxofre no estéril	20% (1-40%)	
Teor de minerais neutralizantes no rejeito	-	
Teor de minerais neutralizantes no estéril	3% (3-4%)	
Consumo elétrico lavra	1 kWh/tonelada de minério	Rötzer & Schmidt (2020) (ver Anexo B)
Consumo elétrico beneficiamento	22 kWh/tonelada de minério	
Consumo de químicos para flotação	0,1 kg/tonelada de minério	
Consumo energético (diesel)	15,7 ton/tonelada de minério	
Consumo de explosivos	0,3 kg/tonelada de minério	
Consumo de cal	1 kg/tonelada de minério	

Consumo de aço	0,7 kg/tonelada de minério	
Consumo de água no beneficiamento	0,6 m ³ /tonelada de minério	
Custo Carbono	0,031 US\$/kg CO ₂ -eq	CDP ¹⁵
Custo Biodiversidade	15000 US\$/ha	Jacotot (2015) ¹⁶

Para determinação da contribuição de cada input no cálculo das emissões de CO₂ equivalente e demanda energética equivalente (MJ) os seguintes valores de referência foram adotados (Tabela 26)

Tabela 26 - Valores de referência adotados para intensidade de CO₂ utilizadas (Rötzer & Schmidt, 2020)

Variável	Valor de referência	Variável	Valor de referência
Cal	1,2 kgCO ₂ -eq/kg Cal	Diesel	0,1 kgCO ₂ -eq/MJ
	7,1 MJ-eq/kg Cal		1,5 MJ-eq/MJ
Químicos para flotação	5,7 kgCO ₂ -eq/kg	Eletricidade	1,0 kgCO ₂ -eq/kWh
Explosivos	2,9 kgCO ₂ -eq/kg	Aço	2,0 kgCO ₂ -eq/kg
	22,7 MJ/kg		22,7 MJ/kg

Todos outros dados de entrada são de sugestão do autor deste trabalho por estimativa e o detalhamento de cálculo não se encontra no escopo da presente pesquisa. Todos os dados de entrada, unidades e equações se encontram no Anexo C.

Tais premissas serão submetidas a abordagem probabilística por meio do uso de distribuições estatísticas a fim de representar incertezas associadas aos valores ao passo que expressam o seu impacto nos indicadores de interesse. Dado a falta de acesso a dados específicos de projeto e a natureza exploratória do presente trabalho,

¹⁵ http://cebds.org/wp-content/uploads/2015/10/CDP_Cebds_Guia_precificacao_carbono.pdf

¹⁶ <https://conferences.iaia.org/2015/Final-Papers/Jacotot,%20Nicolas%20-%20Assessing%20Ecosystem%20Service%20loss%20due%20to%20infrastructure%20projects.pdf>

as distribuições foram aplicadas por meio de fatores de incerteza propostos por Whittle (2007). Tais distribuições permitem a geração de cenários estocásticos e foram definidas conforme Tabela 27 abaixo.

Tabela 27 – Distribuições associadas a variáveis-chave de projeto

Variáveis	Premissas/ Distribuições	Variáveis	Premissas
Fator de Teor Cobre	Normal (Média 1; Desvio 0.05)	Fator teor Ouro/	Normal (Média 1; Desvio 0.075)
Preço Cobre	LogNormal (Média 7000; Desvio 1300) Min: 5000; Max: 8500	Preço Ouro	LogNormal (Média 50; Desvio 10)
NSR	Normal (Média 70; Desvio 7)	Fator de recuperação Cobre	Normal (Média 1; Desvio 0.05)
Fator custos operacionais	Normal (Média 1; Desvio 0.1) Min: 0.85; Máx: 2		

Para a expressão das probabilidades de conflito e suspensão do projeto foram utilizadas as proposições de Davis & Franks (2014) para a probabilidade de suspensão de um projeto, dado a ocorrência de um conflito. Este é sugerido pelo presente autor a partir dos registros obtidos no site EJ Atlas¹⁷, que compila ocorrências de conflitos socioambientais ao redor do mundo.

Tabela 28 - Dados de entrada para cenário com risco social de conflitos e suspensão

Variável	Probabilidade
Chance de haver um conflito pré-operação	10%
Chance de haver suspensão do projeto condicional a conflito pré-operação	78%

¹⁷ <https://ejatlas.org/>

Chance de haver um conflito durante operação	2%
Chance de haver suspensão do projeto condicional a conflito durante operação	44%
Chance de haver atraso por conflito	33%

Dessa maneira, pode-se propor a seguinte lógica de modelagem no para o Stella Architect (Tabela 31).

Tabela 29 - Lógica de modelagem para risco de conflito e suspensão no software Stella Architect

Operação	Função	Descrição
Conflitos pré-operacionais	IF TIME < AnosDesenvolvimento THEN MONTECARLO (PerfilComunidade* "Chance_de_haver_conflito_pré-op") ELSE 0	A função Montecarlo retorna 0 ou 1 a partir de uma probabilidade definida (nesse caso a chance de haver conflito). Ex. Se a probabilidade de haver conflito é de 10%, a cada DT há 10% de chance de a função Montecarlo retornar 1
Suspensão pré-operacional	IF "Conflito_pré-op" > 0 THEN MONTECARLO ("Chance_de_suspensão_pré-op") ELSE 0	De forma análoga, se há conflito (função montecarlo retornou 1) há uma probabilidade Px de haver suspensão i.e. Px de a função montecarlo retornar 1

Além disso, salienta-se que os dados do projeto consistem principalmente em dados de produção e econômicos. Os subsistemas socioeconômico e ambiental, portanto, foram complementados com dados de literatura a fim de ilustrar a aplicação prática do modelo para simulação, no entanto não necessariamente refletem as condições específicas do projeto Salobo.

Assim, simulações propostas no estudo de caso são definidas da seguinte forma:

1. Caso inicial (determinístico e acréscimo de externalidades e investimentos em sustentabilidade);
2. Caso estocástico com probabilidades de conflito social e suspensão do projeto;

4 RESULTADOS

Conforme definido no capítulo 3, o modelo foi testado em um caso inicial com as premissas sugeridas na seção anterior. As próximas seções demonstram o resultado obtido para cada indicador obtido de avaliação

A Figura 28 demonstra as taxas de produção (lavra) e concentrado (beneficiamento) bem como a geração de estéril e rejeito ao longo da vida do projeto. Assim, nota-se que para cada tonelada de produto (concentrado), gera-se uma movimentação anual de 144 toneladas de material (estéril e rejeito)

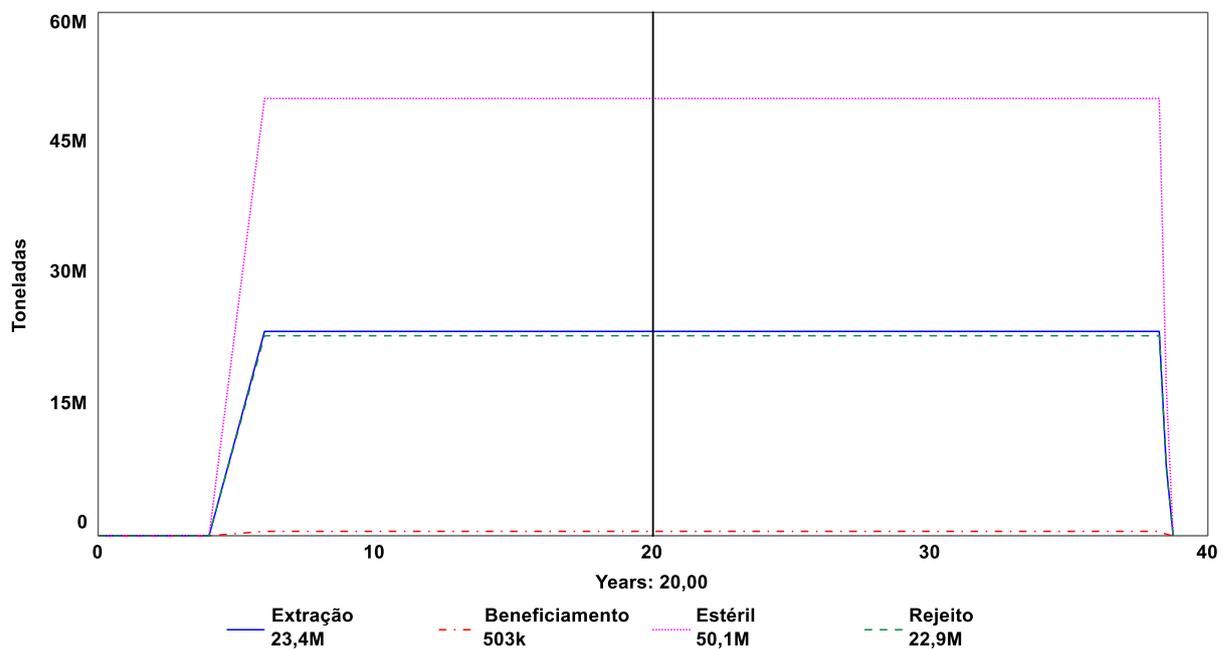


Figura 28 - Caso inicial - taxas de produção e geração de estéril e rejeito

A Figura 29 mostra o resultado dos custos incorridos para o caso inicial com o investimento ocorrendo nos anos iniciais e os custos de fechamento são incorridos a medida que o projeto se aproxima do final da vida útil, ou seja, quanto o 'estoque' inicial de reservas minerais é exaurido.

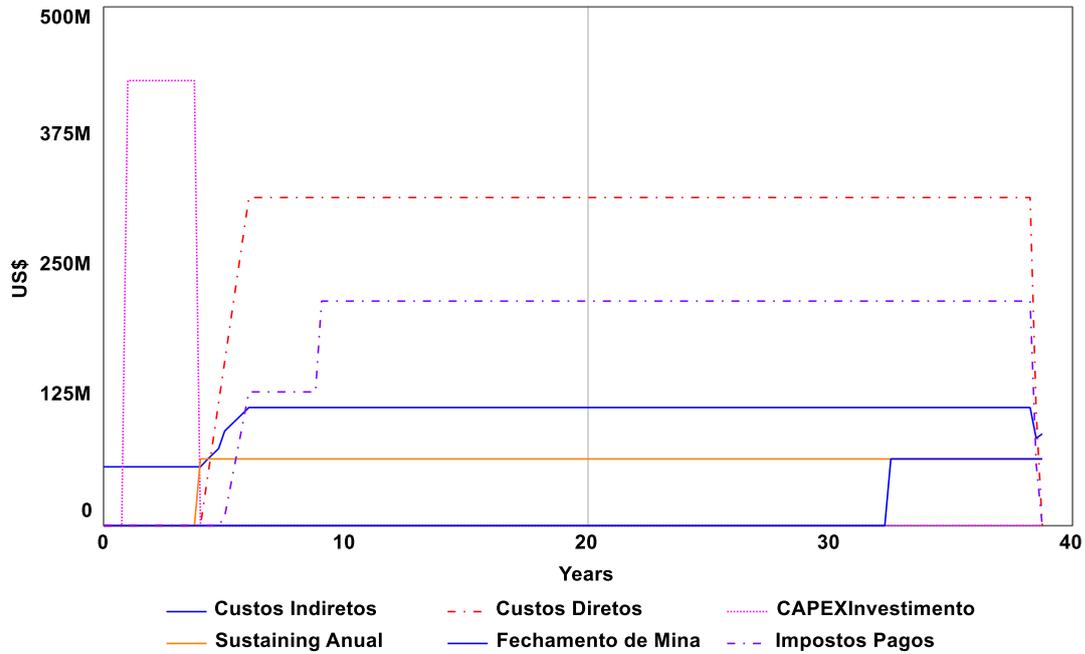


Figura 29 - Caso inicial - principais custos de capital e operação

De acordo com as premissas adotadas para os teores e recuperações de cobre, ouro e prata bem como os preços de venda, observa-se na Figura 30 que para cada dólar obtido de receita do cobre, obtêm-se 0,28 centavos de dólar de receita de subprodutos ouro e prata

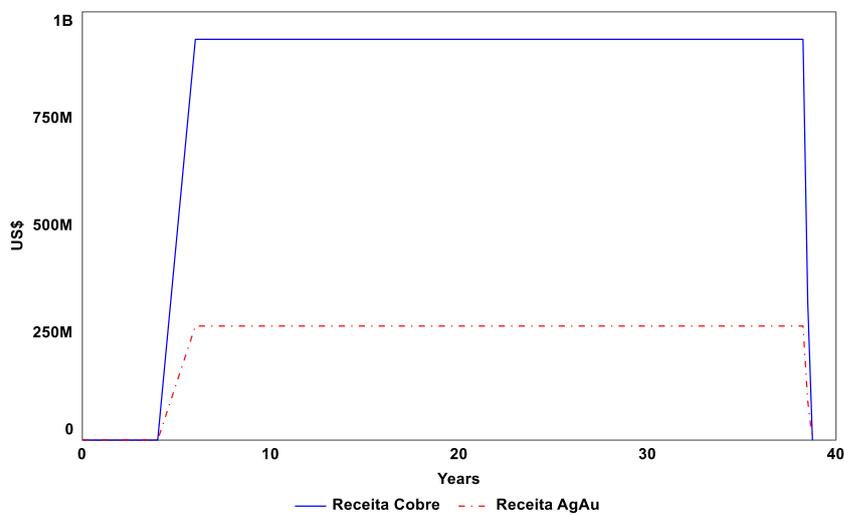


Figura 30 - Receita anual gerada pela venda de concentrado de cobre e subprodutos (ouro e prata)

A Figura 31 demonstra a proporção de contribuição de cada fator considerado para a contribuição local gerada pelo projeto – impostos locais, investimento e consumo gerado localmente além de investimentos em sustentabilidade em função da receita gerada.

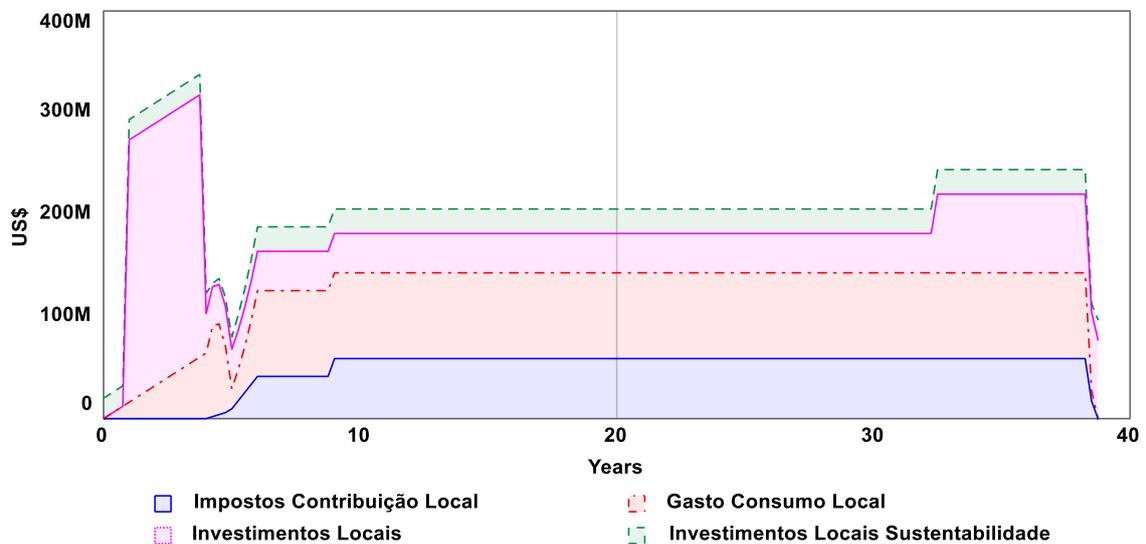


Figura 31 - Nível de geração de renda anual por meio de impostos e investimentos locais

O caso probabilístico permitiu internalizar as probabilidades condicionais de suspensão do projeto, que por sua vez irá impactar nos indicadores econômicos, os resultados são apresentados nas Figuras 32 a 35.

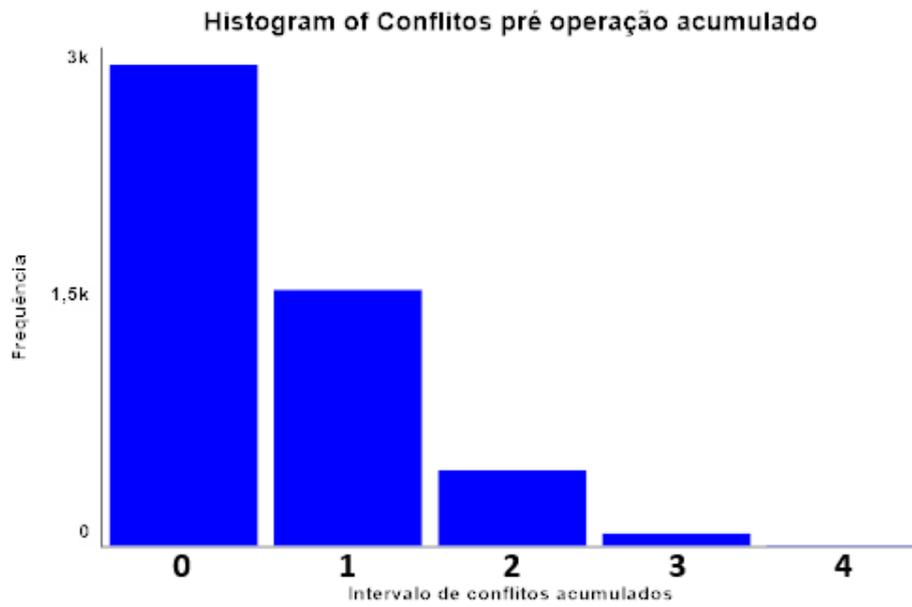


Figura 32 - Distribuição da frequência de conflitos simulados durante o desenvolvimento (pré-operação)

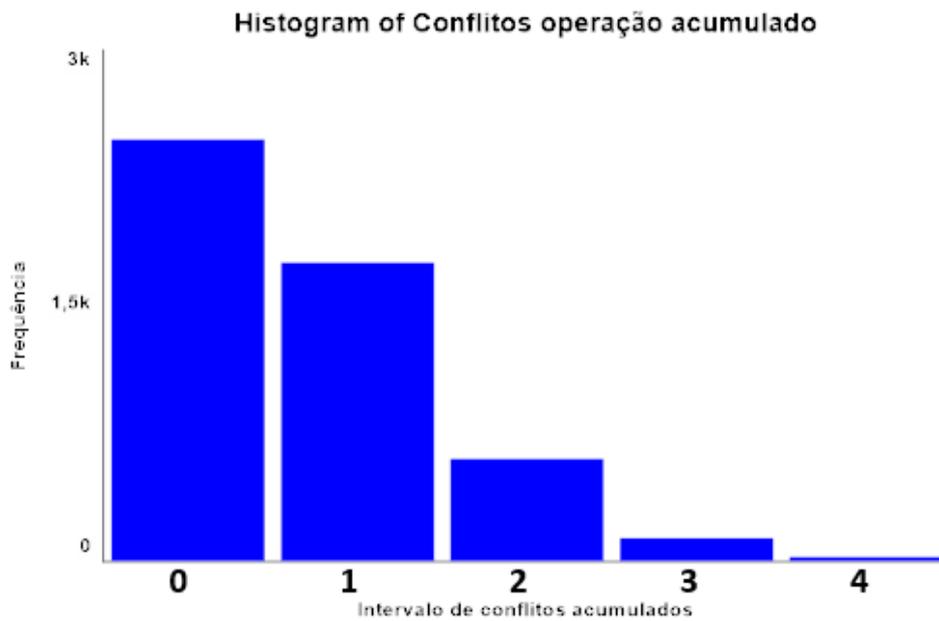


Figura 33 - Distribuição da frequência de conflitos simulados durante a operação

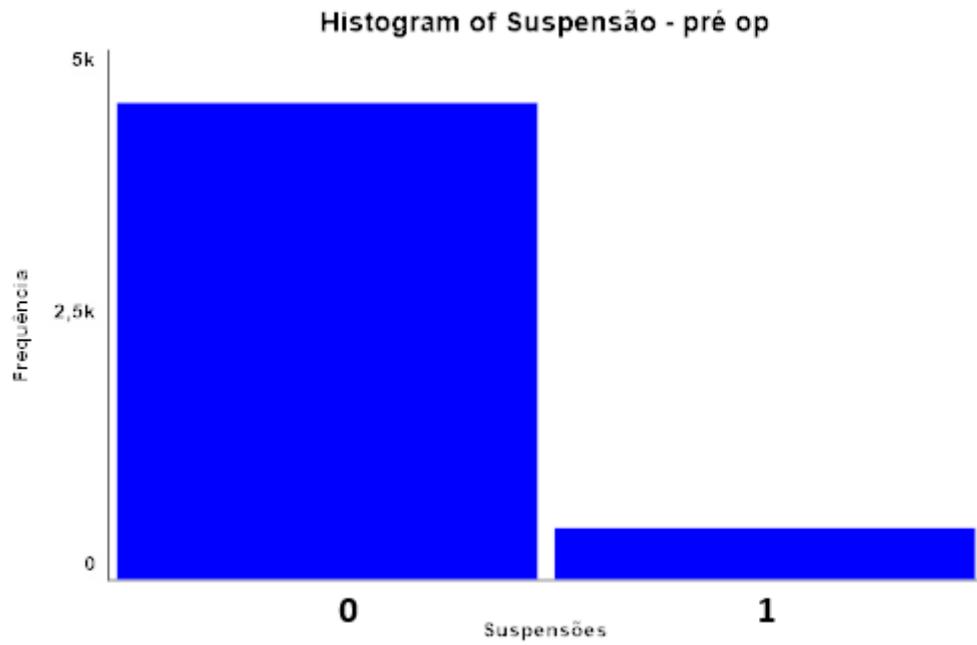


Figura 34 - Distribuição da existência de suspensões simuladas durante o desenvolvimento (pré-operação)

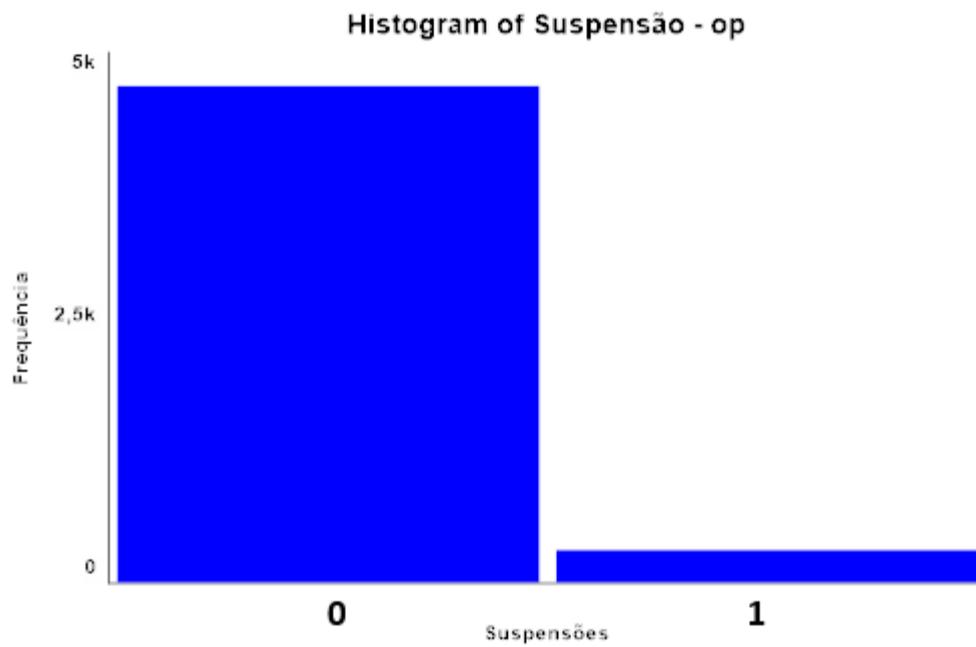


Figura 35 - Distribuição da existência de suspensões simuladas durante a operação

4.1 INDICADORES

Com o objetivo de avaliar os resultados da simulação, foram definidos indicadores de performance que englobem os diferentes parâmetros dos subsistemas, conforme definido na seção 3.2. As próximas seções apresentam os resultados obtidos para cada indicador.

4.1.1 Indicadores Econômicos

Valor Presente Líquido

O caso inicial foi complementado com o acréscimo de custos de externalidades (emissões de CO₂ e área impactada/ biodiversidade) e iniciativas de governança como a destinação de uma porcentagem de receita para investimentos locais em sustentabilidade. A partir das premissas utilizadas, observa-se uma redução de cerca de 22% no VPL do projeto (Figura 36).

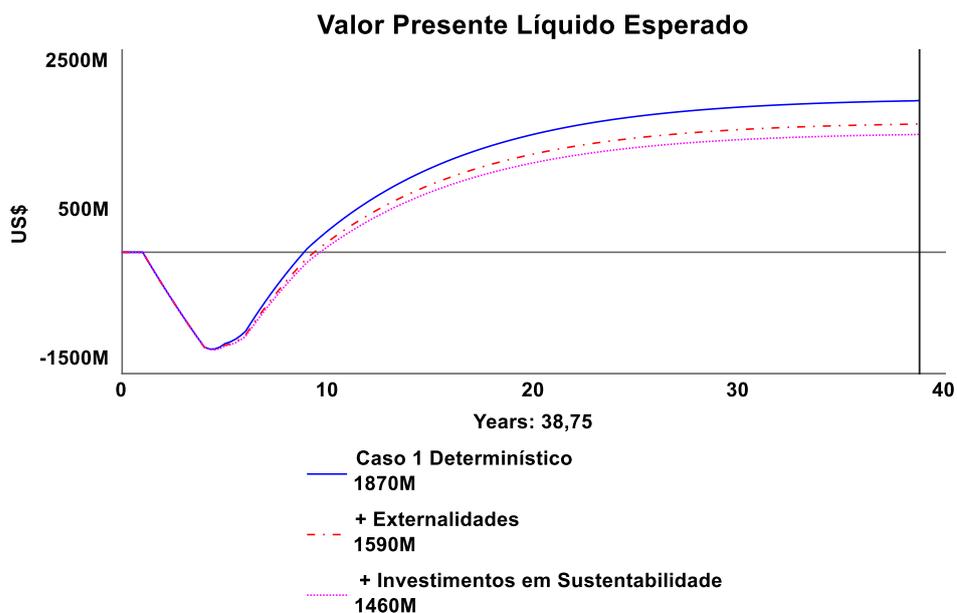


Figura 36 - VPL do caso determinístico (à esquerda) e do caso simulado com 2000 realizações (à direita)

No caso probabilístico, os parâmetros aplicados conforme a Tabela 27 geraram o resultado apresentado na Figura 37. A partir deste mesmo modelo, introduziu-se a

rotina de probabilidade de conflitos e suspensão, gerando o resultado apresentado na Figura 38. Observa-se que o valor médio da distribuição (VPL esperado) em cerca de 29%, além de apresentar uma cauda alongada de distribuição refletida no aumento considerável do desvio padrão e uma segunda população de realizações da simulação. Isso se deve a premissa de haver uma maior probabilidade de suspensão do projeto nas fases pré-operacionais.

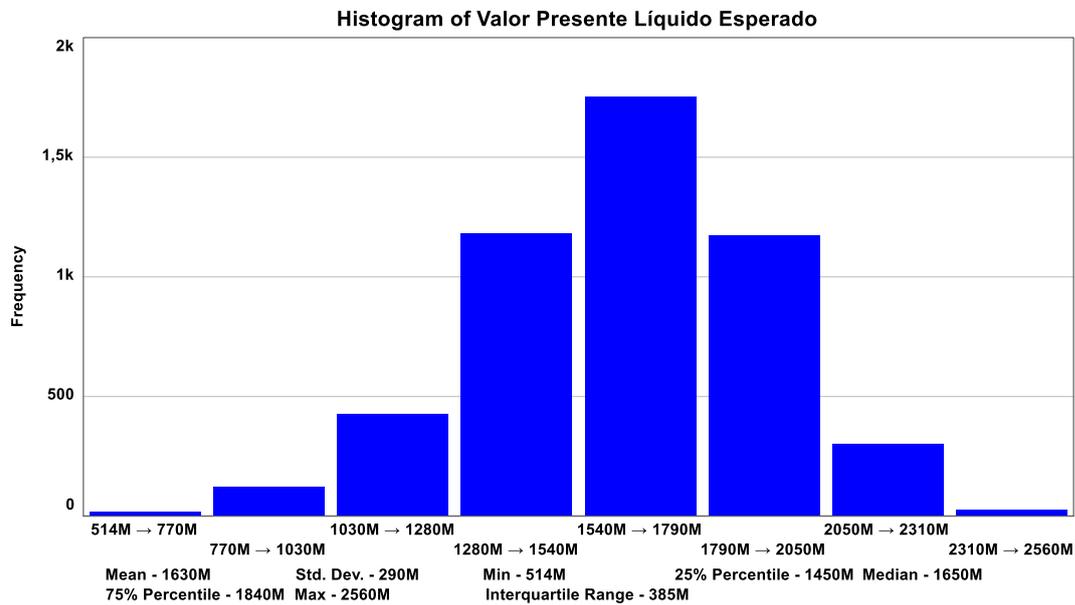


Figura 37 - Caso probabilístico - Valor Presente Líquido

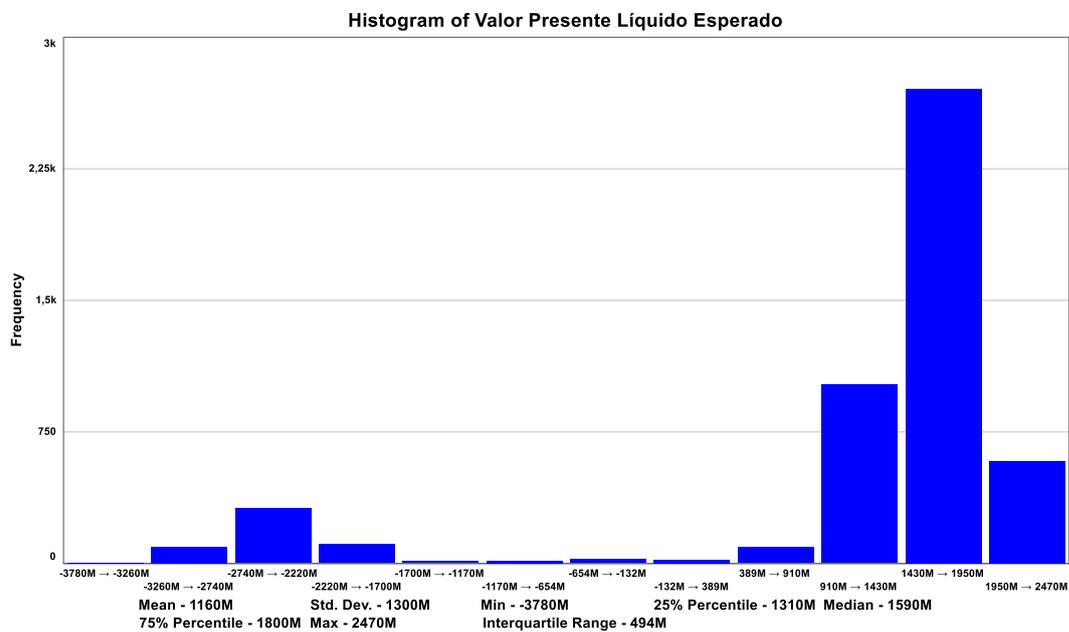


Figura 38 - Resultado da simulação com perfil de 'risco social' conforme Tabela 29

Taxa interna de retorno

A Taxa Interna de Retorno é equivalente a taxa de desconto que igualaria a zero o valor presente de fluxos de caixa futuros (ver seção 2.1.1). Pode ser comparada a uma taxa mínima de atratividade para um determinado investimento. A Figura 39 ilustra o resultado do caso inicial, bem como o acréscimo de externalidades e alocação de receita em investimentos em sustentabilidade. A TIR correspondente cai para 15,6%.

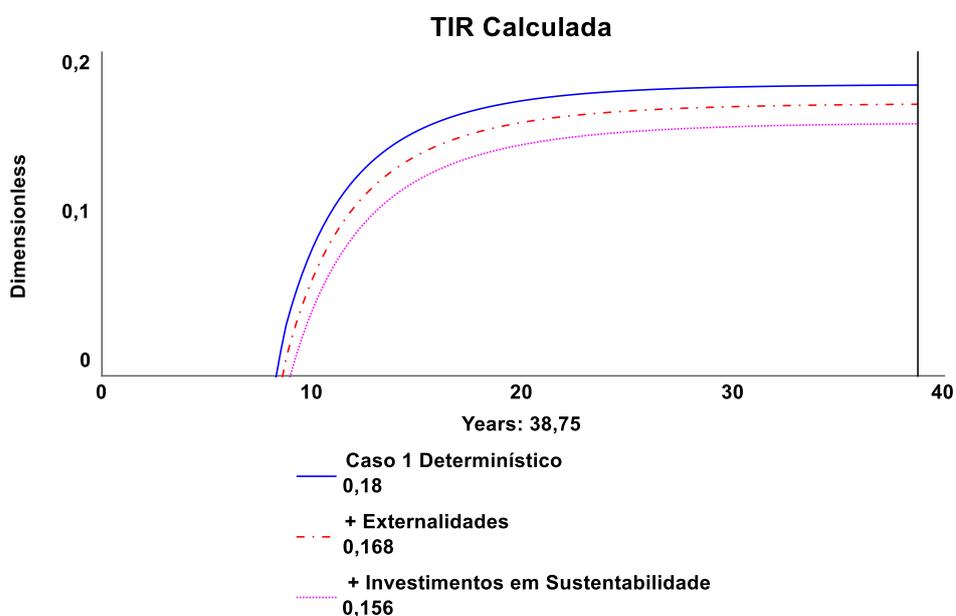


Figura 39 - Caso inicial - Taxa interna de retorno

Por restrições de utilização do software, a TIR no caso probabilístico não foi estudada.

4.1.2 Indicadores Ambientais

Eficiência Material

Conforme introduzido na seção 2.2.4, a Eficiência Material pode ser um indicador útil na comparação entre projetos e entre alternativas de projeto. Relaciona a produção (monetária) de valor de um depósito com o total de material movimentado (ton) na operação – é, portanto, também um indicador que se relaciona com a área impactada e intensidade de energia demandada. Como em última instância relaciona uma receita com uma quantidade física (massa), avaliações devem ponderar o efeito da variação do preço (se existir) quando comparada a outros casos. O (re)processamento de rejeito, desde que viável economicamente, por exemplo, aumentaria o indicador uma vez que a receita gerada aumentaria (ou melhoraria) o indicador uma vez que a receita gerada aumentaria enquanto a massa total se manteria.

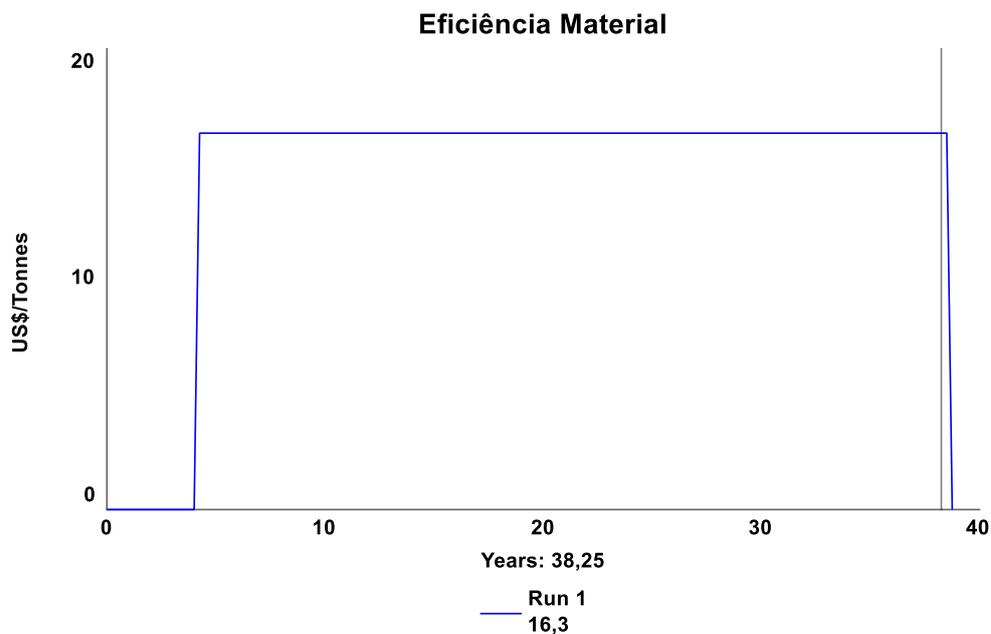


Figura 40 - Caso Inicial - Eficiência Material

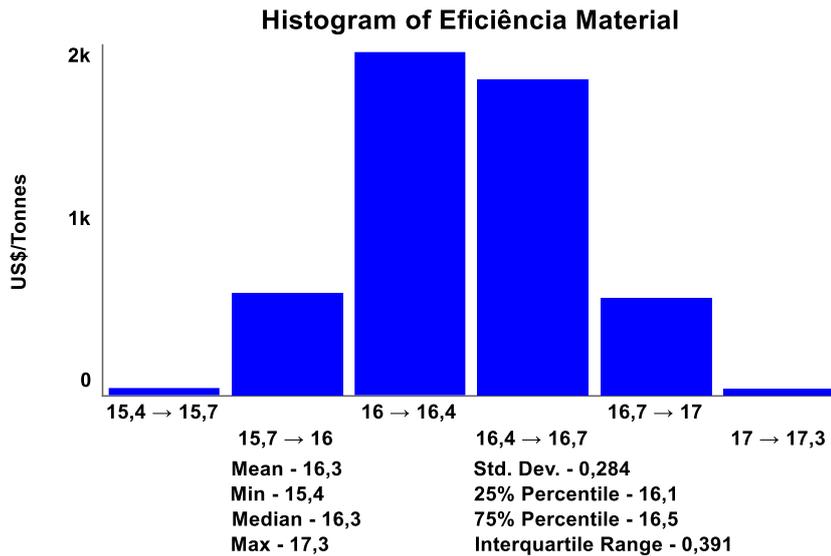


Figura 41 - Caso probabilístico - Eficiência Material

Como pode ser observado na Figura 40, a eficiência material do caso probabilístico teve um valor médio de 16,3,2 (US\$/t). Ou seja, para cada tonelada movimentada no projeto, este gerou 18,2 dólares. Estratégias alternativas para este indicador, podem considerar:

- Opções de design de mina e planta de processamento;
- Estratégias de teor de corte (ou aumento do teor médio);
- Reprocessamento de rejeito.

Ineficiência de Extração

A Ineficiência de Extração é um indicador que expressa em porcentagem a divisão entre as perdas totais durante um projeto de mineração e o total de recursos minerais que foram extraídos (rejeito e produto). Permite comparações independente do projeto estar processando minério ou rejeito (reprocessamento) e avalia apenas a estratégia de extração. Nas Figuras 42 e 43 observa-se pouca variação nos casos estudados, gerando um resultado de 25,2%.



Figura 42 - Caso Inicial - Ineficiência de Extração

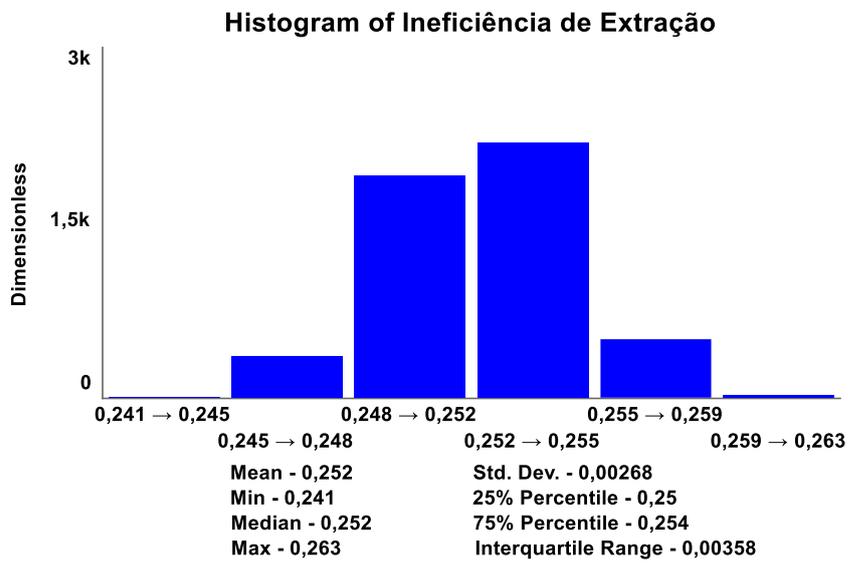


Figura 43 - Caso Probabilístico - Ineficiência de Extração

Estresse de água

A água pode ser um aspecto crítico em um projeto de mineração. No entanto, em fase iniciais é extremamente difícil estabelecer um perfil detalhado de riscos associados. Neste caso, define-se o risco a partir da relação de demanda e oferta de água. Por exemplo, um alto 'estresse' de água poderia ser uma relação demanda/oferta de maior ou igual a 0.4 (Delevigne et al, 2020). Neste trabalho, recomenda-se a utilização do indicador de risco de água geral do Aqueduct Atlas¹⁸ com o consumo anual esperado de água. Na simulação do caso inicial, comparou-se um escore de risco de médio-alto na escala do Aqueduct Atlas (Figura 44) para a região do Salobo com o consumo de água anual de processo.

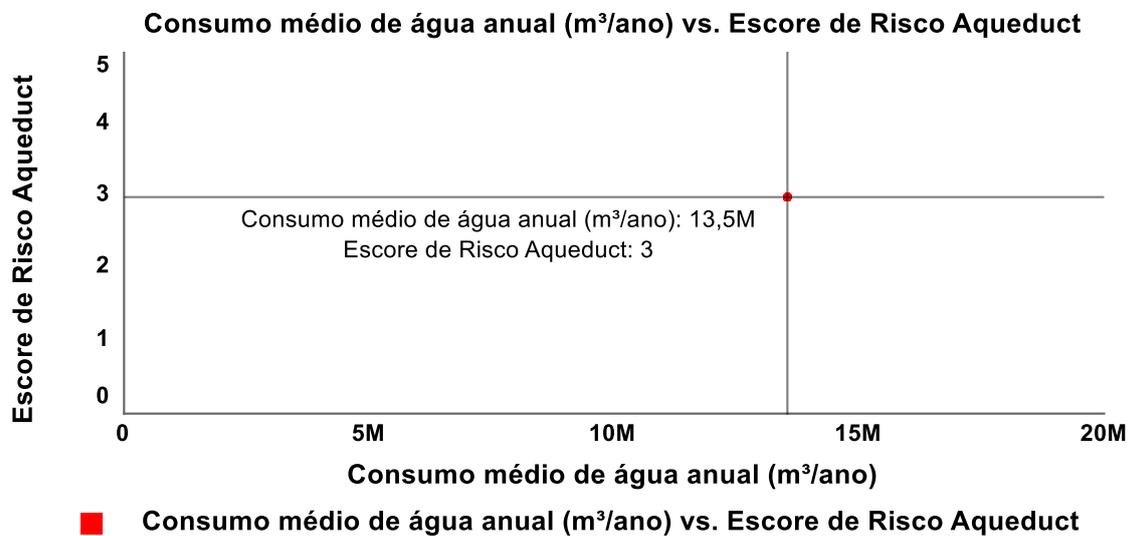


Figura 44 - Estresse de água

¹⁸ <https://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>

Emissões de CO₂-eq. e demanda energética primária

Os diversos inputs necessários a produção de uma commodity possuem um *footprint* de emissões equivalentes de CO₂. Os principais componentes foram internalizados a partir da revisão realizada por Rötzer e Schmidt (2020) resumidos no Anexo B. Ao dividir tal consumo pela quantidade de produto, têm-se a intensidade de emissões daquele produto. Tal indicador será função de:

- Método de lavra, design da mina e relação estéril minério
- Granulometria, tipo de moega, meio de moagem e tipo de minério (dureza e abrasividade).
- Tipo de combustível utilizado, fonte de energia e eficiência associada e transmissão.

Eficiências de produção como recuperação, qualidade do concentrado e propriedades mineralógicas também podem afetar o indicador.

As Figuras 46 a 51 apresentam os resultados para a intensidade de emissões e demanda primária de energia para o caso inicial. A Tabela 30 compara esses resultados com valores de referência.

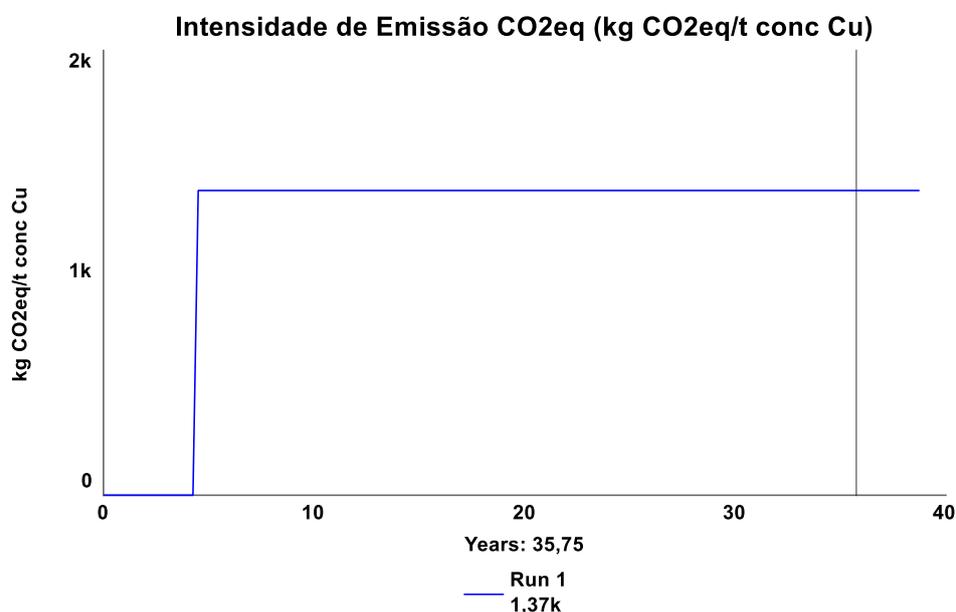


Figura 45 – Caso Inicial - Intensidade de Emissões de CO₂ equivalente (kgCO₂eq/ton concentrado)

Contribuição de emissões de CO2 equivalente (kg/ano)

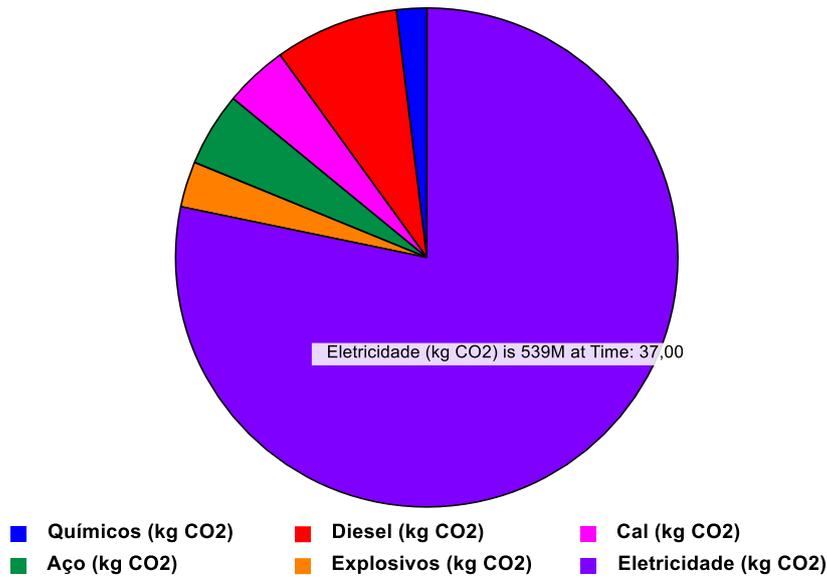


Figura 46 - Caso Inicial – Divisão contribuição de diferentes inputs para emissões de CO2

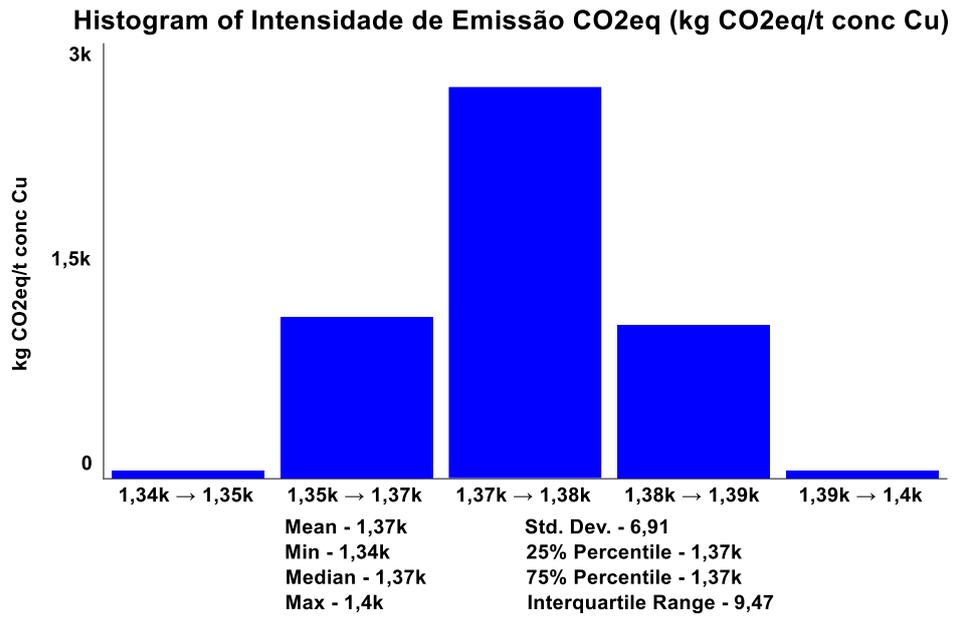


Figura 47 - Caso probabilístico - Intensidade de Emissões de CO2 equivalente (kgCO2eq/ton concentrado)

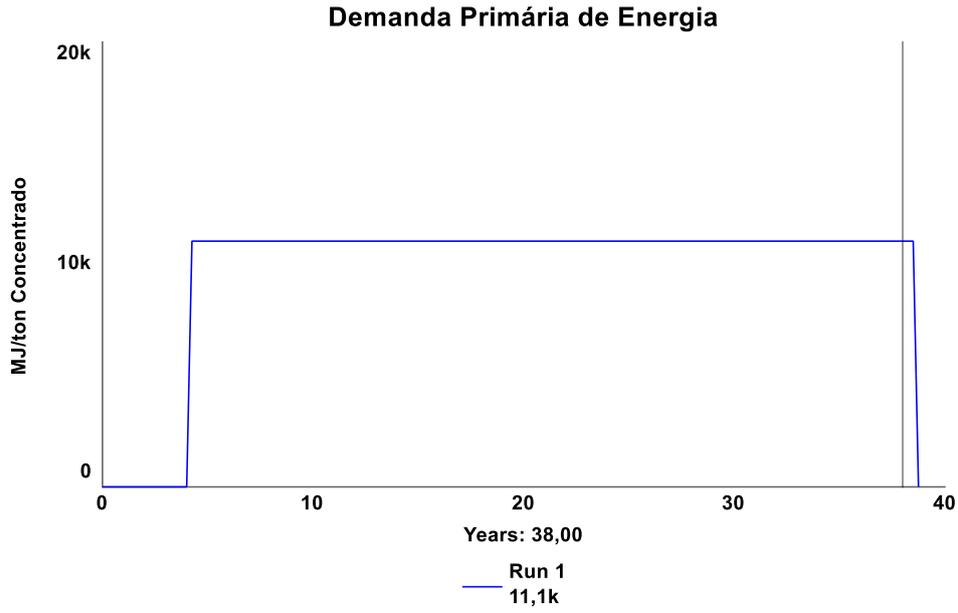


Figura 48 - Caso Inicial - Demanda Primária de Energia (MJ/ ton concentrado)

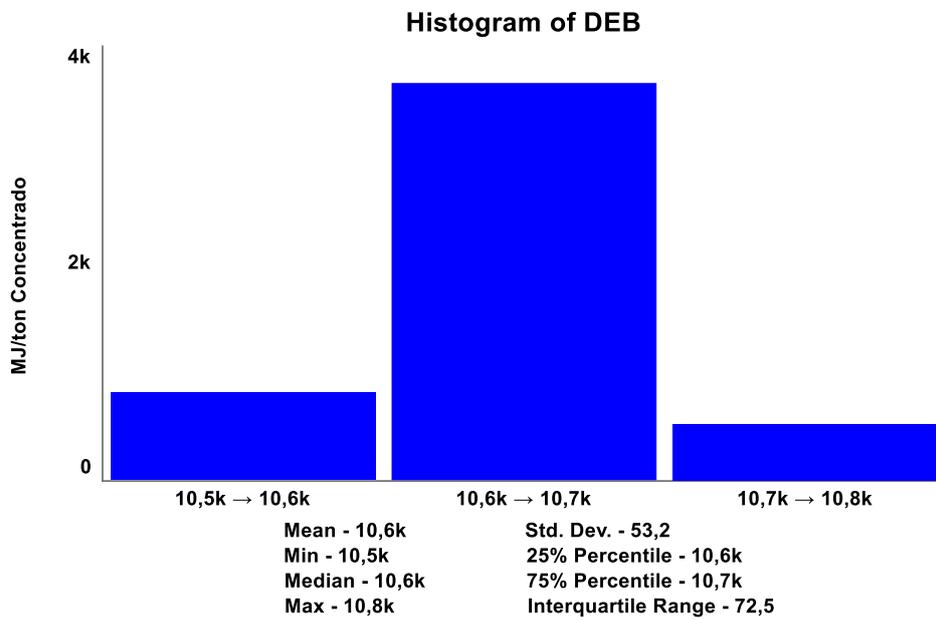


Figura 49 - Caso probabilístico - Demanda Primária de Energia

Contribuição de demanda energética (MJ)

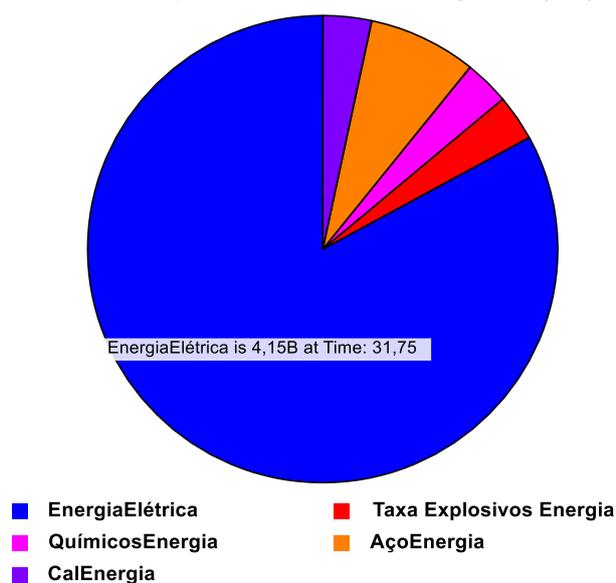


Figura 50 - Contribuições para a demanda primária de energia (caso inicial)

Tabela 30 - Comparativo entre estudo de caso e valores de referência para demanda primária de energia e intensidade de emissões de CO₂ equivalente

Comparativo	Estudo de caso	Copper Environmental Profile
Demanda Primária de Energia	11100 MJ/tonelada de concentrado	13000 MJ/tonelada de concentrado
Intensidade de emissões CO₂-eq.	1370 kgCO ₂ -eq/ tonelada de concentrado (estudo de caso) 1358 kgCO ₂ -eq/ tonelada de concentrado (reportado pelo CDP, 2019)	1100 kgCO ₂ -eq/ tonelada de concentrado

A intensidade de GEE por tonelada de concentrado de cobre foi de 1370kg CO₂e/t Concentrado, o que se mostra de acordo com a magnitude de intensidade relatada pela International Copper Association (Tabela 18, 1100kg/t) e muito próximo ao valor reportado para a mina Salobo no ano de 2019. O mesmo vale para a demanda de energia primária (10200 MJ/t Concentrado contra 13000 MJ/t). De fato, nota-se que a eletricidade é a maior responsável pelas emissões associadas. O valor de referência utilizado foi de 1kg de CO₂e/kWh, referente a uma fonte de energia térmica a carvão.

Potencial de neutralização líquido

A partir da metodologia de contagem ácido base, pode-se definir estimativas do Potencial Ácido (AP) e Potencial de Neutralização (NP). No presente modelo, adotou-se os padrões sugeridos por Muñoz et al. (2013):

- NNP: NP-AP
- NP/AP
- NP = 83.3 x %C
- AP = 31.25 x %S

A interpretação pode ser definida como:

Equação 12 - Critérios de classificação de potencial de drenagem ácida

$$\text{Potencial Drenagem ácida} = \begin{cases} \text{Alto se } \frac{NP}{AP} < 1 \cap NNP < -20 \\ \text{Baixo se } \frac{NP}{AP} > 2 \cap NNP > 30 \\ \text{Incerto se } 1 < \frac{NP}{AP} < 2 \cap -20 < NNP < 20 \end{cases}$$

A partir desses critérios, observa-se pelas Figuras 52 e 53 que o projeto possui um alto potencial de geração de rejeitos ácidos. O modelo permite diferenciar elementos categóricos (Fe, S, SiO₂) de um processo (geração de rejeito de mina e beneficiamento) e quantidades associadas. Desta forma, pode-se impor um teor de enxofre e de algum elemento (ou mineral) neutralizante (p.ex. calcita) contido nesses rejeitos.

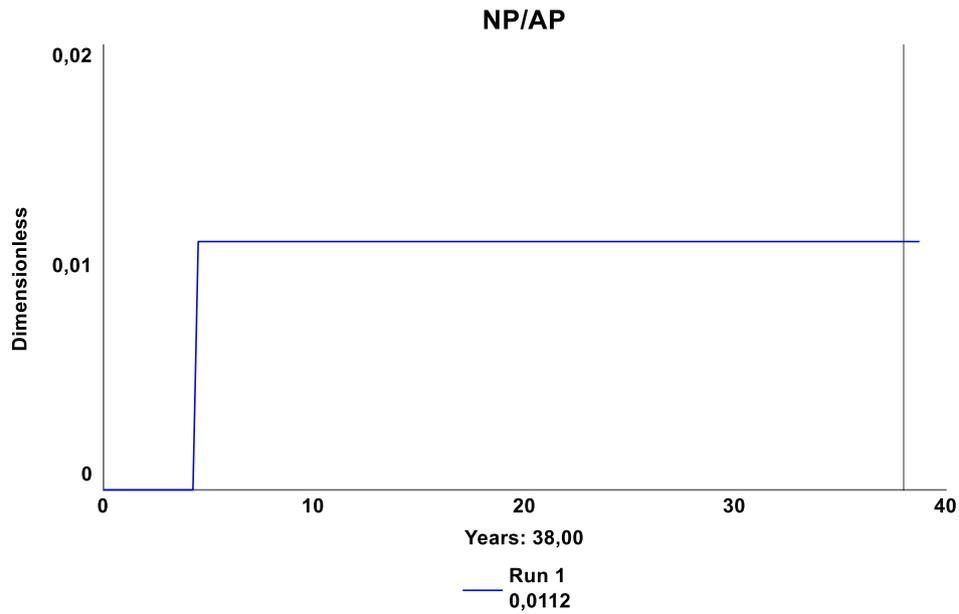


Figura 51 - Caso Inicial - Potencial de Neutralização Líquido - Critério NP/AP

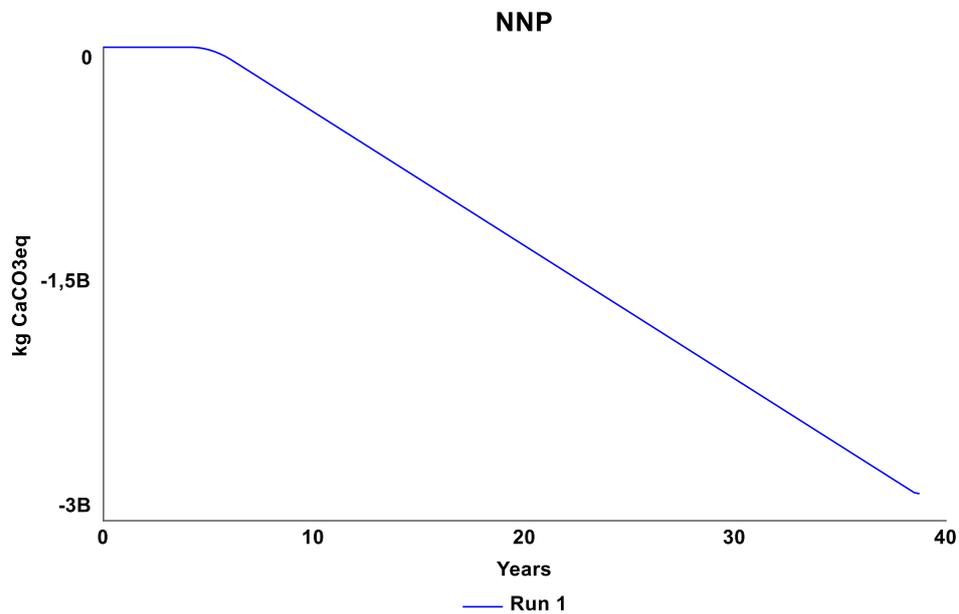


Figura 52 - Caso Inicial - Potencial de Neutralização Líquido - Critério NNP

A ausência de rochas e mineralogia neutralizante faz com que o perfil dos rejeitos gerados seja majoritariamente ácido e, portanto, sugerindo a necessidade de consideração das reações adversas potenciais.

4.1.3 Indicadores Socioeconômicos

Receita sobre custos sociais

Este indicador propõe que uma medida de 'custo social' seja definida a partir da soma do custo do carbono (precificação do carbono) e um custo de biodiversidade (externalidades). Assim, pode-se medir quanto de valor monetário é gerado para cada valor monetário representativo do custo social (ver seção 4.2). Tais custos sociais também podem ser incorporados no FCD como custos indiretos. Nas Figuras 54 e 55, observa-se que a relação atinge um múltiplo de 22,4 no caso inicial e um valor médio de 21,8 para o caso probabilístico.

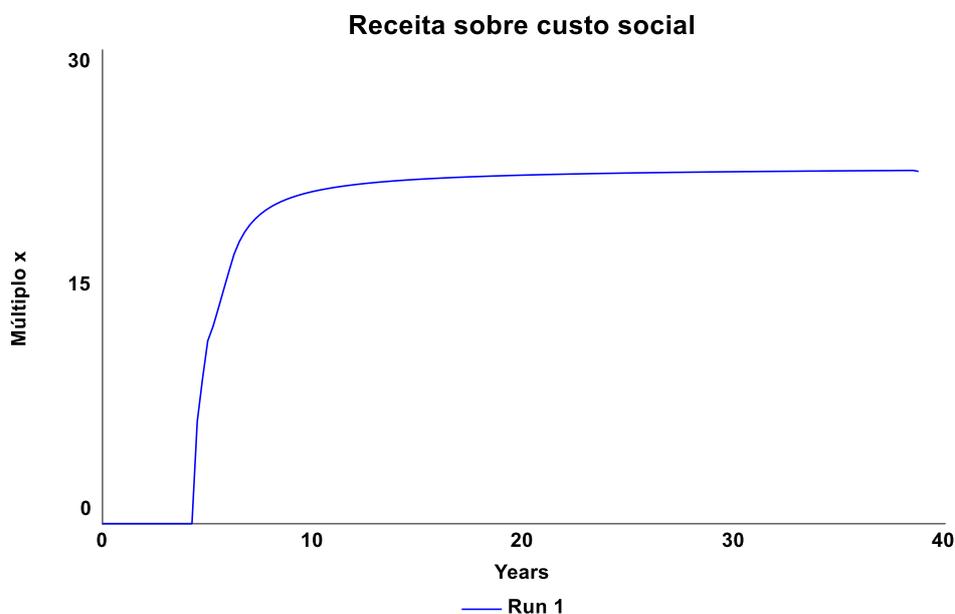


Figura 53 - Caso Inicial - Receita sobre custos sociais

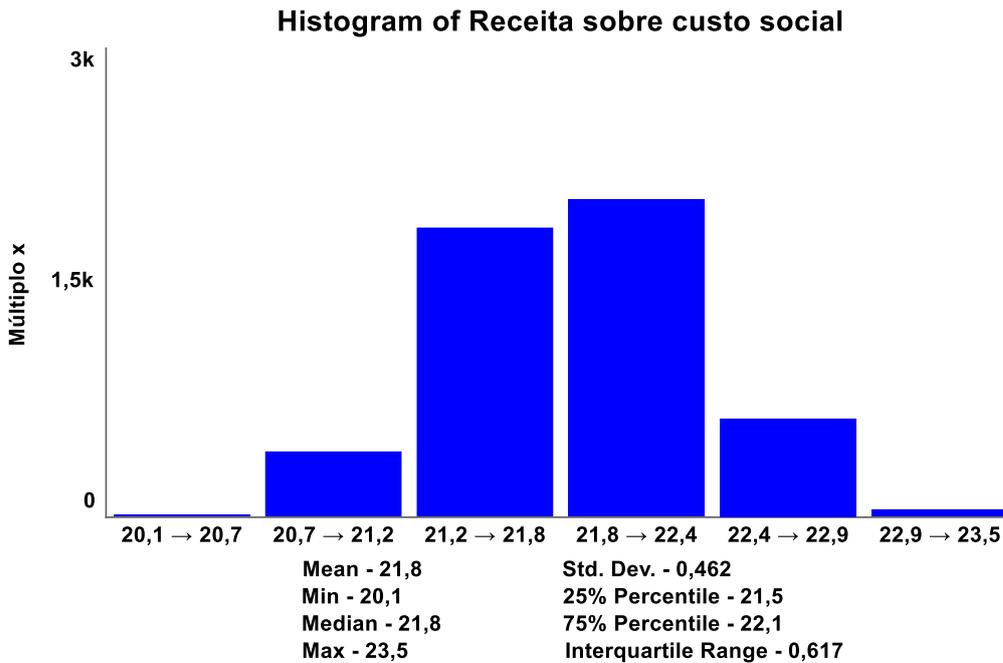


Figura 54 - Caso probabilístico - Receita sobre custos sociais

Contribuição local por tonelada de produto

A contribuição econômica local por tonelada de produto, ou seja, para cada tonelada de cobre uma quantia monetária é assinalada por meio do somatório dos seguintes fatores em sua dimensão local: proporção do CAPEX gasto, investimentos em responsabilidade social corporativa, proporção de impostos e royalties atribuídos (p. ex. município) e consumo local gerado pela mão-de-obra do empreendimento.

Este indicador engloba, portanto, diferentes aspectos locais do projeto que podem ou não ser alterados. Na Figura 56, pode-se observar que a contribuição local média ao final da vida do projeto foi de 468 dólares por tonelada de Cobre.

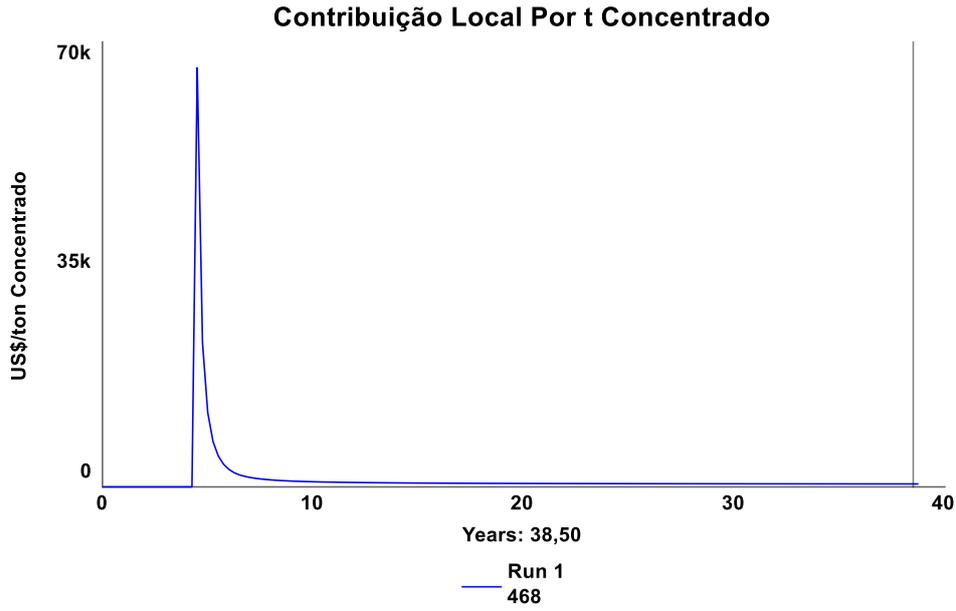


Figura 55 - Caso inicial - contribuição local por tonelada de concentrado de cobre

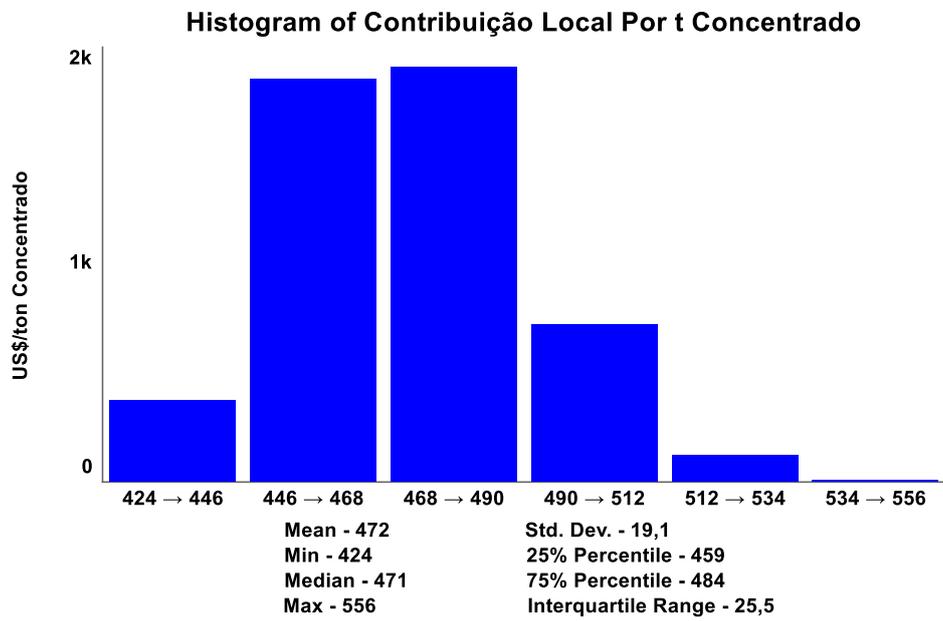


Figura 56 - Caso probabilístico - contribuição local por tonelada de concentrado de cobre

4.2 DISCUSSÃO

A operacionalização do modelo apresentou comportamento e resultado esperados considerando as características (inputs) dos estudos de caso ilustrativos.

No subsistema de produção, a abordagem Rankin (2011, Cap.11, pg.226) foi utilizada para traçar os fluxos materiais e rejeitos associados. Dessa forma, pode-se propor um base generalizável para diferentes operações baseado na cadeia de valor do processo produtivo de uma matéria prima mineral – extração, beneficiamento, estágios de processamento (1, 2... n). Associado a esse processo, os fluxos materiais, de energia, água pode ser quantificados e vinculados ao design do processo produtivo. É importante salientar que, apesar de existir aspectos comuns o modelo ideal sempre deverá ser adaptável/ flexível de acordo com as particularidades de cada projeto a ser analisados.

Conforme demonstrado com o exemplo do indicador de intensidade de emissões, destaca-se a possibilidade de internalização da metodologia de análise de ciclo de vida no ambiente de simulação por dinâmica de sistemas como forma sistemática de quantificar os impactos ambientais (incluindo outras categorias de impacto) associados ao projeto em análise.

No subsistema financeiro, alguns aspectos foram adaptados para a modelagem de um fluxo de caixa descontado. O ambiente de dinâmica de sistemas, permite a modelagem de atrasos e, portanto, se mostra pertinente para questões envolvendo a duração dos períodos de licenciamento e construção (em comparação a ferramentas tipicamente usadas como planilhas em Microsoft Excel) bem como incertezas associadas. Além disso, a dinâmica de impacto de conflitos nos custos por exemplo se torna relativamente simples de modelar via operadores lógicos. Os custos de fechamento de mina podem incorrer em um instante de tempo variável, de acordo com a exaustão da reserva, antecipado, ou a partir de um gatilho como a suspensão do projeto.

No sentido de avaliar a flexibilidade do projeto frente as incertezas associadas (e.g. preço do metal, teor do minério) ao longo do ciclo de vida da mina, o subsistema financeiro pode ainda ser expandido para considerar o valor de opções reais a cada

tempo t (Hazra et al, 2019): opção de manter a operação, deferir (ou fechamento temporário), expandir a produção ou fechar a mina.

Sob condições de risco de 'licença social' pode-se dizer que há uma população da distribuição de probabilidade em direção à máxima exposição de capital. Diversos projetos terminam por ser cancelados após um grande investimento e muitas vezes sem sequer entrar em produção.

O subsistema socioeconômico consiste basicamente na definição da porção de receita que contribui localmente para a comunidade e stakeholders do projeto, além da modelagem de risco de conflitos e suspensão de projeto. A modelagem se dá pela definição de probabilidades de ocorrência do evento e testes lógicos. Já há literatura nesse sentido, no entanto a determinação de probabilidades não é simples e requer um grau de subjetividade e julgamento para sua determinação.

Como qualquer modelo, a avaliação dos resultados depende da confiabilidade e representatividade dos dados de entrada face aos fatores aspectos chave para avaliação do projeto. No entanto, a dinâmica demonstrada se torna compatível com os processos tipicamente descritos na literatura na avaliação de fatores tangíveis e intangíveis.

Permanece o desafio da bem sucedida integração de aspectos tangíveis e intangíveis uma vez que se trata de um esforço orientado ao processo mais do que produto do que um produto – cada caso possui aspectos específicos e complexidades inerentes que devem ser tratadas *ad-hoc*. Pôde-se perceber nesse trabalho a importância do acesso a fontes de dados e recursos que auxiliam na definição dos dados de entrada. O mecanismo que permite avaliar tais interrelações dinâmicas se mostra robusto na medida em que pode ser flexibilizado, adaptado e calibrado para gerar resultados plausíveis e consistentes com as discussões atuais da literatura. Além disso, a dinâmica de sistemas juntamente com os diagramas de loops causais se apoia na corrente de pensamento sistêmico, que por sua vez subscreve a necessidade de compreensão interdisciplinar dos sistemas estudados. À medida que a pesquisa avance nesse sentido, muitas implementações podem ser vislumbradas de forma a melhorar as abordagens de simulação nesse contexto.

Como resultado, o Autor propõe a criação de um aplicativo que facilite o estudo desses aspectos discutidos nessa dissertação (Figura 58). Tal funcionalidade está embutida no software utilizado e é comum à softwares similares.

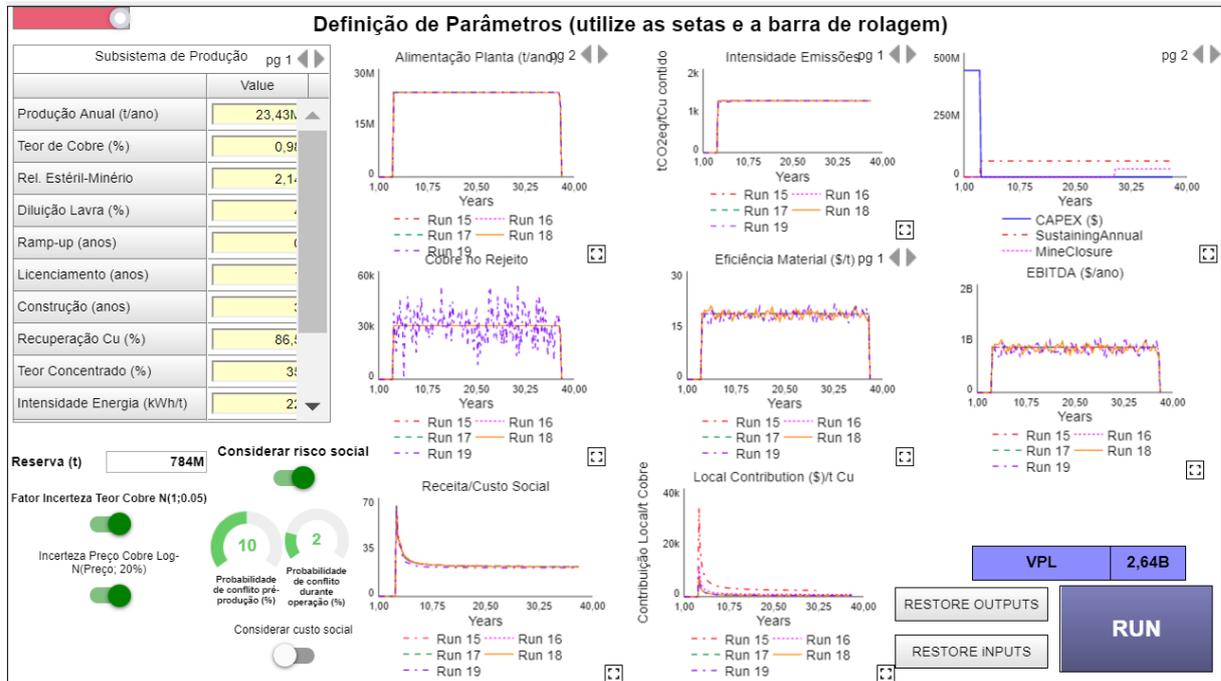


Figura 57 - Simulador proposto de avaliação de projetos baseado em dinâmica de sistemas

Também é preciso notar que qualquer ferramenta proposta, finalmente serve a algum propósito – em geral a tomada de decisão. O próprio processo de tomada de decisão em si é um fator a ser considerado e, por que não, internalizado no modelo. Por se tratar de um esforço claramente multidisciplinar, tal processo deve ser idealmente participativo e coletivo.

Dado o contexto da presente pesquisa, entende-se que o processo de desenvolvimento de um projeto mineral – ou seja, o período de avanço de um depósito mineral sendo delineado até o atingimento da sua capacidade planejada – é crítico para o sucesso financeiro e econômico para as partes interessadas. Nesse sentido, apoiado nas pesquisas de Davis & Franks (2014), Sykes & Trench (2014) sobre riscos e conflitos nesses estágios, é importante compreender as dinâmicas de projeto dessas fases em particular – não só advindas de aspectos técnicos, mas também não-técnicos. Conforme mencionado no Capítulo 2, projetos em fase conceitual possuem maior flexibilidade na consideração de opções técnicas e estas, no entanto, não são

suficientes para constituir um projeto bem sucedido. Sugere-se, portanto, que a integração e a exploração dos fatores chave para o sucesso de um projeto sejam estabelecidas o mais cedo possível reduzindo o risco de insucesso no planejamento estratégico e tomada de decisão de empresas e *stakeholders*.

5 CONCLUSÃO

A abordagem desenvolvida se mostrou capaz de integrar variáveis associadas ao desenvolvimento sustentável na mineração, ao processo produtivo na mineração e seu comportamento dinâmico no tempo. A utilização da técnica de dinâmica de sistemas permitiu conectar essas diferentes variáveis e simular seu comportamento no tempo além de se mostrar robusta para aplicação de abordagens determinísticas e estocásticas. A consideração de aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável também significa aumentar o número de variáveis a serem consideradas. A dinâmica de sistemas facilitou a compreensão da integração dessas diversas variáveis bem como suas interrelações, reduzindo assim a complexidade do desenvolvimento e interpretação do modelo proposto.

Observa-se na consideração dos aspectos de sustentabilidade, que as externalidades, quando contabilizadas, reduzem significativamente o valor presente líquido esperado de um projeto. Da mesma forma, as probabilidades de conflitos e suspensão de um projeto apresentam consequências similares. A realidade setorial da mineração sugere que essas abordagens estão mais próximas do perfil de riscos que projetos de mineração enfrentam. Este trabalho demonstra que é possível realizar tal integração já em estágios iniciais de avaliação e podem ser utilizados como ponto de partida para avaliação de alternativas de projeto.

A literatura do cobre apresenta diversos dados que puderam ser aproveitados para testar o modelo proposto e compará-lo a valores de referência. Tais resultados se mostraram compatíveis com as referências utilizadas (p.ex. consumo de energia e emissões equivalentes de CO₂). A partir da estrutura proposta, o trabalho mostra potencial de aplicação para novos estudos de caso e adaptações associadas.

5.1 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

A revisão da literatura e o posterior trabalho de modelagem e desenvolvimento em dinâmica de sistemas permitiu a observação de diversas linhas de pesquisa que podem ser aprofundadas a partir desse trabalho inicial. Recomenda-se que este

trabalho sirva como uma plataforma inicial para explorar aplicações futuras em áreas como:

- Criação de base de dados a partir de relatórios financeiros e não-financeiros (p.ex. relatórios de sustentabilidade) de mineradoras, contendo dados de produção, custos, investimentos em sustentabilidade e critérios ESG a fim de facilitar a customização de modelos e ampliar o escopo de aplicação;
- Criação de base de dados de opções tecnológicas nas diversas etapas e suas características (custos e performance/berço ao portão) para análise (e quantificação) de opções de engenharia;
- Integração direta de modelos de simulação de avaliação econômica com simulação da distribuição de teores, variáveis geometalúrgicas (e geoambientais) e sequenciamento estocástico de lavra – dados geológicos e espaciais;
- Internalização da metodologia ACV (endógena) ao modelo de simulação dinâmica;
- Internalização de metodologias de avaliação econômica sob incerteza considerado flexibilidade gerencial (*Real Options Valuation*);
- Aplicação do campo da economia da informação aplicada (Hubbard, 2007) e economia ambiental para quantificar externalidades e aspectos de LSO dentro do modelo de simulação;
- Revisão de disciplinas de pensamento sistêmico – como engenharia de sistemas¹⁹ – que possam auxiliar uma bem sucedida avaliação do ciclo de vida de um projeto considerando aspectos técnicos e não-técnicos.
- Avaliação da teoria de valores extremos (TVE²⁰) para modelagem de projetos de longa duração e planejamento regional considerando diferentes stakeholders;
- Integração direta com processos de planejamento estratégico de lavra e definição de reservas.

¹⁹ https://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia_de_sistemas

²⁰ Predizer as distribuições de probabilidade de eventos extremos e.g. cheias extremas, desastres naturais, falhas operacionais catastróficas, perdas extremas de securitização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL SABOUR S. A. Mine size optimization using marginal analysis. **Resources Policy** 28 (2002) 145–151, 2002

ANTOFAGASTA MINERALS. **Sustainability Report, 2018.**

AWUAH-OFFEI, K., ADEKPEDJOU, A. **Application of life cycle assessment in the mining industry.** *International Journal of Life Cycle Assessment* (2011) 16:82–89, 2011

BALA, BK., ARSHAD, FM., NOH, KM. **System Dynamics: Modeling and Simulation.** Springer Texts in Business and Economics. DOI 10.1007/978-981-10-2045-2, 2017

BERRY, M V, McCARTHY, P L, 2006. **Practical consequences of geological uncertainty**, in Proceedings Sixth International Mining Geology Conference, pp 253–258 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), 2006

BRUCE, T. **Managing Environmental, Social, and Government (ESG) Risk in the Mining Industry: The Emerging Relevance of ESG Risk and the Dangers of Getting it Wrong.** Final Submission for the McKinsey Risk Prize.

BUCHANAN, D. L. **Metals and Energy Finance: Advanced Textbook on the Evaluation of Mineral and Energy Projects.** Imperial College Press, 2016

CDP. **VALE CDP Climate Change Questionnaire.** 2019

CERVANTES, M, GREEN, K P and WILSON, A. **Survey of mining companies: 2013,** Fraser Institute, 2013

D'ARRIGO. **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. PPGEM, UFRGS, 2012.

DAVENPORT, WG., KING, M., SCHLESINGER, M., BISWAS AK. **Extractive Metallurgy of Copper.** 4th Edition. Pergamon, 2002

- DAVIS, R., FRANKS, D. **Costs of Company-Community Conflict in the Extractive Sector**. Corporate Social Responsibility Initiative Report No. 66. Cambridge, MA: Harvard Kennedy School, 2014
- DELEVIGNE, L., GLAZENER, W., GRÉGOIR, L., HENDERSON, K. **Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know**. Metals & Mining and Sustainability Practices. McKinsey & Co. 2020
- DURANCE, P., GODET, M. Scenario building: uses and abuses. **Technological Forecasting & Social Change** 77 (2010) 1488–1492, 2010
- ELKINGTON, J. **Partnerships from Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. Environmental Quality Management. Autumn, 1998.
- ESPIÑOZA, R. D, MORRIS, J. W. F., Towards sustainable mining (part II): Accounting for mine reclamation and post reclamation care liabilities. **Resources Policy** 52 (2017) 29–38, 2017
- ESPIÑOZA, R. D., ROJO, J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. **Resources Policy** 52 (2017) 7–18 <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.01.011>, 2017
- FERREIRA, H., LEITE, MG A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. **Journal of Cleaner Production** Volume 108, Pages 1081-1091. 2015
- FREDRIKSEN, T. Corporate social responsibility, risk and development in the mining industry. **Resources Policy** 59 (2018) 495–505 <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.004> , 2018
- GENDEREN, EV, WILDNAUER, M., SANDERO, N., SIDI, N. A global life cycle assessment for primary zinc production. **International Journal of Life Cycle Assessment** 21, 1580–1593 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1131-8> , 2016
- GRBES, A. A Life Cycle Assessment of Silica Sand: Comparing the Beneficiation Processes. **Sustainability** 2016, 8, 11; doi:10.3390/su8010011 , 2015
- GUARNERA, B. J., MARTIN, M. D. Valuation of Mineral Properties. Em Darling (2011): **SME Mining Engineering Handbook**. Third Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011

- DE HAES, HH. Industrial Ecology and Life Cycle Assessment, em: Ayres, R., Ayres, L. (Eds) **Industrial Ecology Handbook**. Edward Elgar Publishing Limited, 2009
- FERREIRA, H., LEITE, MGP. A Life Cycle Assessment (LCA) study of iron ore mining. **Journal of Cleaner Production** 108 (2015) 1081-1091, 2015.
- FORRESTER, JW. System dynamics, systems thinking, and soft OR. **System Dynamics Review** Vol. 10, nos. 2-3, 1994
- HAZRA, T., SAMANTA, B., DEY, K. Real option valuation of an Indian iron ore deposit through system dynamics model. **Resources Policy** 60 (2019) 288–299, 2019
- HUBBARD, D.W. **How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business**. 3d Edition. Wiley, 2007.
- HUTTON, C. The economics of exhaustible mineral resources—concepts and techniques in optimization revisited. **The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy**. Vol. 115. dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n11a13, 2015
- INTHAVONGSA, I., DREBENSTADT, C., BONGAERTS, J., SONTAMINO, P. Real options decision framework: Strategic operating policies for open pit mine planning. **Resources Policy** 47 (2016)142–153, 2016.
- KINZ, N. C., MORAN, C. J. **The utility of a systems approach for managing strategic water risks at a mine site level. Water Resources and Industry**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2016.02.001> , 2016
- KONG, R., XUE, F., WANG, J., ZHAI, H., ZHAO, L. Research on Mineral Resources and Environment of Salt Lakes in Qinghai Province based on System Dynamics Theory. **Resources Policy** 52 (2017) 19–28, 2017
- KOPPELAAR, R. H., KOPPELAAR, H. The Ore Grade and Depth Influence on Copper Energy Inputs. **Biophysical Economics Resource Quality** (2016) 1:11, 2016
- KUNZ, NC., MORAN, CJ. The utility of a systems approach for managing strategic water risks at a mine site level. **Water Resources Industry** 13 (2016) 1-6, 2016.
- REGGIO, R., LANE, A. Mining in Africa: **How Inclusive Solutions Can Mitigate Risk**. Monitor Deloitte. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/>

Documents/strategy/us-consulting-mining-in-africa.pdf (acessado em 13.05.2020), 2012

LÈBRE, E., CORDER, G., GOLEY, A. The Role of the Mining Industry in a Circular Economy. A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. **Journal of Industrial Ecology**. DOI: 10.1111/jiec.12596, 2017

LÈBRE, E., OWEN, J., CORDER, G., KEMP, D., STRINGER, M., VALENTA, R. Source risks as constraints to future metal supply. **Environmental Science and Technology** 2019, 53, 10571–10579 DOI: 10.1021/acs.est.9b02808, 2019

LESAGE, P., REID, C., MARGNI, M., AUBERTIN, M., DESCCHENES, L. **Use of LCA in the mining industry and research challenges**. Conference: Symposium 2008 sur l'environnement et les mines, Québec. , 2008

LIFSET, R., GRAEDEL, T. E. Industrial Ecology: goals and definitions, em: Ayres, R., Ayres, L. (Eds) **Industrial Ecology Handbook**. Edward Elgar Publishing Limited, 2002

LILFORD, E., MAYBEE, B., PACKEY, D. Cost of capital and discount rates in cash flow valuations for resources projects. **Resources Policy**. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.008>, 2018

LINS, C., HORWITZ, E. **Sustainability in the mining sector**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2007

LIU, D., LI, G., HU, N., MA, Z. **Application of Real Options on the Decision- Making of Mining Investment Projects Using the System Dynamics Method**. IEEE Access VOLUME 7, 2019

LONG, K. R., SINGER, D. A. **A Simplified Economic Filter for Open-Pit Mining and Heap-Leach Recovery of Copper in the United States**. Open-File Report 01-218. U.S. Geological Survey. 2001

LOTTERMOSER, B. Predictive Environmental Indicators in Metal Mining. Em: Lottermoser, B. (2017) **Environmental Indicators in Metal Mining**. DOI 10.1007/978-3-319-42731-7_1, 2017

MARSDEN, JO, BOTZ, MM (2017) Heap leach modeling – A review of approaches to metal production forecasting. **Minerals & Metallurgical Processing**. Vol 34, no. 2, 2017

MORANDI, M., RODRIGUES, LH., LACERDA, DP., PERGHER, I. Foreseeing Iron Ore Prices Using System Thinking and Scenario Planning. **Systemic Practice and Action Research** DOI 10.1007/s11213-013-9277-9, 2013

NELSON, M. G. Mining Economics, Management, and Law. Em Darling (2011): **SME Mining Engineering Handbook**. Third Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011

NORGATE, T., HAQUE, N. Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production. **Journal of Cleaner Production** 29-30 (2012) 53e63, 2012

NORGATE, T., JAHANSHAH S. Low grade ores – Smelt, Leach or concentrate? **Minerals Engineering** 23 (2010) 65–73 doi:10.1016/j.mineng.2009.10.002, 2010

NORTHEY, S. A., HAQUE, N., LOVEL, R., COOKSEY, M. A. Evaluating the application of water footprint methods to primary metal production systems. **Minerals Engineering** 69 (2014) 65–80, 2014

NORTHEY, S., HAQUE, N., MUDD, G. Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. **Journal of Cleaner Production** 40 (2013) 118e128, 2013

O'HARA, T. A.. **Quick guides to the evaluation of ore bodies**. Risk Analysis in Mining. CIM, 1980

O'REAGAN, B., MOLES, R. Investment Decisions of International Mining Firms: Policy Approaches. **SIMULATION**, Vol. 78, Issue 6, June 2002 362-379, 2002

O'REAGAN, B., MOLES, R. Using system dynamics to model the interaction between environmental and economic factors in the mining industry. **Journal of Cleaner Production** 14 (2006) 689e707. doi:10.1016/j.jclepro.2004.05.006, 2006

O'REAGAN, B., MOLES, R. A System Dynamics Model of Mining Industry Investment Decisions within the Context of Environmental Policy. **Journal of Environmental**

Planning and Management, Vol 44. <https://doi.org/10.1080/09640560120033731>, 2001

OTTO, J. **Resources and reserves: thoughts on their evolution. Mineral Economics** <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00187-2>, 2019

OTTO, J., ANDREWS, C., CAWOOD, F., DOGGETT, M, GUJ, P., STERMOLE, F., TILTON, J. **Mining Royalties: A Global Study of Their Impact on Investors, Government, and Civil Society**. Directions in Development. Energy and Mining. The World Bank, 2006

PELL, R., TIJSSELING, L., PALMER, L., GLASS, H., YAN, X., WALL, F., ZENG, X., LI, J. Environmental optimisation of mine scheduling through life cycle assessment integration. **Resources, Conservation & Recycling** 142 (2019) 267–276, 2019

PRNO, J., SLOCOMBE, D.S. A Systems-Based Conceptual Framework for Assessing the Determinants of a Social License to Operate in the Mining Industry. **Environmental Management** (2014) 53:672–689, 2014

RANKIN, W., J. **Minerals, Metals, and Sustainability: Meeting Future Material Needs**. CSIRO Publishing, 2011

REEMEYER, HCL. **Integrated Mining and Processing Systems Design for Eco-Efficiency**. Resourceful Paths. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/56e6422e4d088e2914274f7d/t/5991008f3e00bea41c100ba5/1502675089630/Reemeyer_final_COM2017_incorporating_chair_review.pdf (último acesso em 10.07.2020), 2019

RENDU, J.M. **Risk Management in Evaluating Mineral Deposits**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration Inc, 2017

REVUELTA, M.B. **Mineral Resources: From Exploration to Sustainability Assessment**. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. DOI 10.1007/978-3-319-58760-8, 2018

RÖTZER, N., SCHMIDT, M. Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change. **Resources** 2020, 9, 44; doi:10.3390/resources9040044, 2020

RUNGE, I. C. **Mining Economics and Strategy**. Society for Mining Metallurgy & Exploration. 1998

SANTERO, N., HENDRY, J. Harmonization of LCA methodologies for the metal and mining industry. **The International Journal of Life Cycle Assessment** volume 21, pages1543–1553, 2016

SAVOLAINEN, J., COLLAN, M., LUUKKA, P. Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model. **The Engineering Economist**. DOI: 10.1080/0013791X.2016.1167988, 2016

SAVOLAINEN, J., COLLAN, M., LUUKKA, P. Combining System Dynamic Modeling and the Datar–Mathews Method for Analyzing Metal Mine Investments. **Mathematica**, Vol. 55 (2016), No. 1, 95–110, 2016

SCHODDE, R C. **Key issues affecting the time delay between discovery and development – is it getting harder and longer?**, presented to Prospectors and Developers Association of Canada (PDAC) Conference, 3 March, Toronto, Canada., 2014

SEKAR, S., LUNDIN, K., TUCKER, C., FIGEUIREDO, J., TORDO, S., AGUILAR, J. **Climate-sensitive Mining: Case Studies. Background Paper for Building Resilience: A Green Growth Framework for Mobilizing Mining Investment**. International Development in Focus. World Bank Group, 2019

SIEGENFELD, A., BAR-YAM, Y. **An Introduction to Complex System Science and its Application**. arXiv:1912.05088v1 [physics.soc-ph], 2019

SONG X., PETTERSEN, J.B., PEDERSEN, KB., ROBERG, S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway. **Journal of Cleaner Production** 164 (2017) 892e904, 2017

SONTAMINO, P., DREBENSTADT, C. **A System Dynamics Model of Mining Cost Estimation**. Scientific Reports on Resource Issues 2013 Volume 1 Part 1, 2013

SPITZ, K., TRUDINGER, J. **Mining and the Environment: From Ore to Metal**. CRC Press, 2008

SPUERK, S., DROBE, M., LOTTERMOSER, B. Evaluating resource efficiency at major copper mines. **Minerals Engineering**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.005>, 2016

STERMAN, JD. **Business Dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world**. Irwin McGraw-Hill. ISBN 0-07-231135-5, 2000

SYKES, J. P., TRENCH, A. **Resources versus Reserves – Towards a Systems-based understanding of Exploration and Mine Project Development and the Role of the Mining Geologist**. NINTH INTERNATIONAL MINING GEOLOGY CONFERENCE, 2014

TAYEB-KHORAMI, M., EDRAKI, M., CORDER, G., GOLEV, A. Re-thinking Mining Waste Through and Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. **Minerals 2019, 9, 286**, 2019

TAYLOR, H.K. **Rates of working mines; a simple rule of thumb**: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, v. 95, section A, p. 203-204, 1986

TESCHNER, B., HOLLEY, E. The cost of mine suspension from social conflict: A decision tree model. **Resources Policy**. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101443>, 2019

THOMSON, I., BOUTILLIER, R. G. Social License To Operate. Em Darling (2011): **SME Mining Engineering Handbook**. Third Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011

VALENTA, RK., KEMP, D., OWEN, JR., CORDER, GD., LÈBRE, E. Re-thinking complex orebodies: Consequences for the future world supply of copper. **Journal of Cleaner Production** 220 (2019) 816e826, 2019.

VAN GENDEREN, E., WILDNAUER, M., SANTERO, M., SIDI, N. A global life cycle assessment for primary zinc production. **International Journal of Life Cycle Assessment** (2016) 21:1580–1593, 2016.

WHITE, R. 'Preface', em Braden R. Allenby and Deanna J. Richards (eds), **The Greening of Industrial Ecosystems**, Washington, DC: National Academy Press., 1994

WHITTLE, G., STANGE, W., HANSON, N. **Optimising Project Value and Robustness**. Project Evaluation Conference Melbourne, 2007

ANEXO A - INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA PRODUZIDO PELA INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION

Tipo	Fluxo	Por Tonelada de Concentrado (28% Cu)	Por tonelada de Cobre Cátodo	Unidade
Recursos energéticos	Óleo	4700	15000	MJ
	Antracito	4800	17000	MJ
	Linhito	580	2600	MJ
	Gás natural	2700	11000	MJ
	Urânio	200	1500	MJ
	Energia primária hidroelétrica	1100	2800	MJ
	Energia primária solar	290	950	MJ
	Energia primária eólica	130	450	MJ
Recursos materiais	Minério de cobre – hidrometalúrgico (0.4% Cu)	-	81000	Kg
	Minério de cobre – pirometalúrgico	40000	85000	Kg
	Calcário	58	150	Kg
	Areia	0.6	190	Kg
	Uso de água	850000	2100000	Kg
	Materiais secundários contendo cobre	-	210	Kg
Materiais depositados	Cobertura estéril	2100	6300	Kg
	Escórias	-	300	Kg
	Rejeitos do beneficiamento	29000	47000	Kg
	Rejeitos de lixiviação	-	110000	Kg

	Rejeito de mina	59000	180000	Kg
	Rejeitos perigosos	0.0029	0.0030	Kg
Emissões para o ar	CO2	900	3800	Kg
	CH4	1.7	6.5	Kg
	N2O	0.13	0.36	Kg
	NOx	4.3	17	Kg
	SO2	4.9	43	Kg
	CO	1.8	12	Kg
	Peira (<PM10)	0.098	0.36	Kg
	Poeira (PM 10)	1.3	2	Kg
	Poeira (PM2.5-10)	0.20	0.64	Kg
	Arsênio	0.00015	0.14	Kg
	Cobre	0.0005	0.0011	Kg
	Chumbo	0.00038	0.0021	Kg
Zinco	0.0011	0.0029	Kg	
Emissões para a água	Amoníaco/amônia (NH4+/NH3)	0.021	0.069	Kg
	Nitrato (NO3-)	0.1	0.38	Kg
	Fosfato (PO43-)	0.011	0.031	Kg
	Demanda biológica de oxigênio	0.017	0.1	Kg
	Demanda química de oxigênio	2.2	7.2	Kg
	Arsênio	0.00068	0.0078	Kg
	Cobre	0.001	0.0026	Kg
	Chumbo	0.00067	0.0017	Kg
Zinco	0.00023	0.00081	Kg	

ANEXO B – VALORES REFERÊNCIA DE CONSUMO DE MATERIAIS E ENERGIA EM CADA ETAPA DE PROCESSO – PRODUÇÃO DE COBRE (ADAPTADO DE RÖTZER & SCHMIDT, 2020)

Etapa processo	Input	Valor	Comentário
Lavra (Open pit)	Eletricidade (kWh/t minério)	1,0	Britagem na mina
	Diesel (MJ/t minério)	15,7	Perfuração (2MJ) + carregamento (CAT 6090 FS; 7.3MJ) + Transporte (CAT 795F AC; 1.3MJ + 0.5MJ/km)
	Explosivos (kg/t minério)	0,3	PFM, densidade 2t/m ³
Lavra Subterrânea	Eletricidade (kWh/t minério)	25	Ventilação (20 kWh) + Britagem (1 kWh) + transporte (0.008 kWh/m profundidade)
	Diesel (MJ/t minério)	17,2	Perfuração (11MJ), carregamento e transporte (5.7MJ)
	Explosivos (MJ/t minério)	0,4	
Beneficiamento	Britagem e Moagem (kWh/t minério beneficiado)	12,4	Work Index; 150000 a 400 µm e 400 a 100 µm (Lei de Bond)
	Flotação (kWh/t minério beneficiado)	4,0	Inclui remoagem e deposição de rejeito
	Consumo de água (m ³ /t minério processado)	0,6	Aproximado
	Aço (kg/t minério beneficiado)	0,7	
	Cal (kg/t minério beneficiado)	1,0	Aproximado
	Químicos (kg/t minério beneficiado)	0,1	Coletor: Xantato 30g Frother: MIBC 100g

Lixiviação em pilha	Eletricidade (kWh/t minério)	3,0	Lixiviação, britagem
	Consumo água (m ³ /t minério)	0,1	Aproximado
	H ₂ SO ₄ (kg/t minério)	13.0	Média
SX	Eletricidade (kWh/t Cu)	1000	
EW	Eletricidade (kWh/t Cu)	2000	
Fundição e Conversão	Eletricidade (kWh/t Cu)	500	
	Óleo combustível (MJ/t Cu)	4175	
	Oxigênio (kg/t Cu)	909	
	Fluxo sílica (kg/t Cu)	350	
	Calcário (kg/t Cu)	180	
	Sucata (kg/t Cu)	110	
Refino	Eletricidade (kWh/t Cu)	400	
	Água (m ³ /t Cu)	0,5	

Material	Valor	Fonte
Explosivos (kg CO₂/kg)	2,9	Cálculo dos autores
Aço (kg CO₂/kg)	2,0	Banco de dados Ecoinvent v3.3
Diesel (kg CO₂/kg)	0,1	Banco de dados Ecoinvent v3.3
Cal (kg CO₂/kg)	1,2	Banco de dados Ecoinvent v3.3
Químicos (kg CO₂/kg)	0,87	Cálculo dos autores
Sílica (kg CO₂/kg)	0,05	Banco de dados Ecoinvent v3.3
Eletricidade (kg CO₂/kg)	0,5	Cálculo dos autores

ANEXO C – FORMULAÇÃO DOS SUBSISTEMAS (STELLA ARCHITECT)

Subsistema_Ambiental:

"%_água_rejeito" = 30

UNITS: Dimensionless

"Aço_(kg_CO2)" = Taxa_Consumo_Aço*"Aço_(kg_CO2/kg)"

UNITS: kg CO2/Years

"Aço_(kg_CO2/kg)" = 2

UNITS: kg CO2/kg

AP = 31,25

UNITS: kg CaCO3eq/Tonnes

AP_Acum(t) = AP_Acum(t - dt) + (Taxa_AP) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT AP_Acum = 0

UNITS: kg CaCO3eq

INFLOWS:

Taxa_AP = ("S-C_Estéril"[Enxofre]+ "S-C_Rejeito"[Enxofre])*AP {UNIFLOW}

UNITS: kg CaCO3eq/Years

"Área_Impactada_(ha)" = IF TIME > LeadTime THEN 0,0078*HISTORY(Cu_Produzido; LeadTime+1)+1373,6 ELSE 0

UNITS: ha

"Biodiversidade_(\$/ha)" = 15000

UNITS: \$/ha/years

C_estéril = 0

UNITS: Dimensionless

C_rejeito = 0,05

UNITS: Dimensionless

"Cal_(kg_CO2)" = Taxa_Cal_Consumida*"Cal_(kg_CO2/kg)"

UNITS: kg CO2/Years

"Cal_(kg_CO2/kg)" = 1,2

UNITS: kg CO2/kg

"Custo_Carbono_(Externalidade)" = "Preço_Carbono_(\$/kg)"*kgCO2eq

UNITS: \$/Years

"Custo_de_Biodiversidade_(Externalidade)" =
 "Área_Impactada_(ha)"*HISTORY("Biodiversidade_(\$/ha)"; 0)

UNITS: \$/Years

DEB_Acumulado(t) = DEB_Acumulado(t - dt) + (Demanda_Primária_de_Energia) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT DEB_Acumulado = 0

UNITS: MJ/Tonnes

INFLOWS:

Demanda_Primária_de_Energia =
 SAFEDIV((AçoEnergia+CalEnergia+QuímicosEnergia+Taxa_Explosivos_Energia+EnergiaElétrica+EnergiaDiesel); Beneficiamento) {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Tonnes/Years

"Diesel_(kg_CO2)" = EnergiaDiesel*"Diesel_(kg_CO2/MJ)"

UNITS: kg CO2/Years

"Diesel_(kg_CO2/MJ)" = 0,1

UNITS: kg CO2/MJ

"Eletricidade_(kg_CO2)" = "Eletricidade_(kg_CO2/kWh)"*"Eletricidade_(kWh)"

UNITS: kg CO2/Years

"Eletricidade_(kg_CO2/kWh)" = 1

UNITS: kg CO2/kWh

"Eletricidade_(kWh)" = EnergiaBeneficiamento+EnergiaMina

UNITS: kWh/Years

"Explosivos_(kg_CO2)" = Explosivos*"Explosivos_(kg_CO2/kg)"

UNITS: kg CO2/Years

"Explosivos_(kg_CO2/kg)" = 2,9

UNITS: kg CO2/kg

"Intensidade_de_Emissão_CO2eq_(kg_CO2eq/t_conc_Cu)" = SAFEDIV(kgCO2eq_Acum; Concentrado_de_Cobre)

UNITS: kg CO2/Tonnes

kgCO2eq_Acum(t) = kgCO2eq_Acum(t - dt) + (kgCO2eq) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT kgCO2eq_Acum = 0

UNITS: kg CO2

INFLOWS:

kgCO2eq =
 "Aço_(kg_CO2)"+"Explosivos_(kg_CO2)"+"Eletricidade_(kg_CO2)"+"Químicos_(kg_CO2)"+"Diesel_(kg_CO2)"+"Cal_(kg_CO2)" {UNIFLOW}

UNITS: kg CO2/Years

$$NNP = NP_Acum - AP_Acum$$

UNITS: kg CaCO₃eq

$$NP = 83,3$$

UNITS: kg CaCO₃eq/Tonnes

$$NP_Acum(t) = NP_Acum(t - dt) + (Taxa_NP) * dt \{NON-NEGATIVE\}$$

$$INIT\ NP_Acum = 0$$

UNITS: kg CaCO₃eq

INFLOWS:

$$Taxa_NP = ("S-C_Rejeito"[Carbono] + "S-C_Estéril"[Carbono]) * NP \{UNIFLOW\}$$

UNITS: kg CaCO₃eq/Years

$$"NP/AP" = SAFEDIV(NP_Acum; AP_Acum; 0)$$

UNITS: Dimensionless

$$NPR = SAFEDIV(Taxa_NP; Taxa_AP)$$

UNITS: Dimensionless

$$Pot_Acido_Estéril[C_S](t) = Pot_Acido_Estéril[C_S](t - dt) + ("S-C_Estéril"[C_S]) * dt \{NON-NEGATIVE\}$$

$$INIT\ Pot_Acido_Estéril[C_S] = 0$$

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

$$"S-C_Estéril"[Enxofre] = Estéril * S_estéril / Conversor\% \{UNIFLOW\}$$

UNITS: Tonnes/Years

$$"S-C_Estéril"[Carbono] = Estéril * C_estéril / Conversor\% \{UNIFLOW\}$$

UNITS: Tonnes/Years

UNITS: Tonnes/Years

$$Pot_Ácido_Rejeito[C_S](t) = Pot_Ácido_Rejeito[C_S](t - dt) + ("S-C_Rejeito"[C_S]) * dt \{NON-NEGATIVE\}$$

$$INIT\ Pot_Ácido_Rejeito[C_S] = 0$$

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

$$"S-C_Rejeito"[Enxofre] = Rejeito * S_rejeito / Conversor\% \{UNIFLOW\}$$

UNITS: Tonnes/Years

$$"S-C_Rejeito"[Carbono] = Rejeito * C_rejeito / Conversor\% \{UNIFLOW\}$$

UNITS: Tonnes/Years

UNITS: Tonnes/Years

$$"Preço_Carbono_(\$/kg)" = 0,031$$

UNITS: \$/kg CO2

Presença_água_Rejeito(t) = Presença_água_Rejeito(t - dt) + ("Rejeito+_Água") * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Presença_água_Rejeito = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

"Rejeito+_Água" = relação_conteudo_água_no_rejeito*Rejeito {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

"Químicos_(kg_CO2)" = "Químicos_(kg_CO2/kg)"*QuímicosFlot

UNITS: kg CO2/Years

"Químicos_(kg_CO2/kg)" = 5,67

UNITS: kg CO2/kg

relação_conteudo_água_no_rejeito = GRAPH("%_água_rejeito")

(25,00, 3,000), (31,50, 2,0439281335), (38,00, 1,40305399594), (44,50, 0,973463214545), (51,00, 0,685499902185), (57,50, 0,492472321386), (64,00, 0,363082064539), (70,50, 0,276349181613), (77,00, 0,218210391537), (83,50, 0,179238795097), (90,00, 0,153115352777)

UNITS: Dimensionless

S_estéril = 5

UNITS: Dimensionless

S_rejeito = 1

UNITS: Dimensionless

Subsistema_de_Produção:

"Aço_(kg/t)" = 0,7

UNITS: kg/Tonnes

"Aço_(MJ/kg)" = 22,7

UNITS: MJ/kg

Aço_Demandado(t) = Aço_Demandado(t - dt) + (Taxa_Consumo_Aço) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Aço_Demandado = 0

UNITS: kg

INFLOWS:

Taxa_Consumo_Aço = "Aço_(kg/t)"*Extração {UNIFLOW}

UNITS: kg/Years

Água_consumida(t) = Água_consumida(t - dt) + (Taxa_Consumo_Água) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Agua_consumida = 0

UNITS: Cubic Meters

INFLOWS:

Taxa_Consumo_Água = Extração*"ConsumoÁguaBeneficiamento_(m³/t)" {UNIFLOW}

UNITS: Cubic Meters/Years

Byproducts_Adcumulado[AgAu](t) = Byproducts_Adcumulado[AgAu](t - dt) + (Byproducts[AgAu]) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Byproducts_Adcumulado[AgAu] = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

Byproducts[Ag] = Beneficiamento*TeorAg*(Recuperação_AuAg/Conversor%)/"Conversor_g/t" {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

Byproducts[Au] = Beneficiamento*(Recuperação_AuAg/Conversor%)*TeorAu/"Conversor_g/t" {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

UNITS: Tonnes/Years

"Cal_(kg/t)" = 1

UNITS: kg/Tonnes

"Cal_MJ/kg" = 7,1

UNITS: MJ/kg

CalDemandada(t) = CalDemandada(t - dt) + (Taxa_Cal_Consumida) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT CalDemandada = 0

UNITS: kg

INFLOWS:

Taxa_Cal_Consumida = Extração*"Cal_(kg/t)" {UNIFLOW}

UNITS: kg/Years

CoG = GRAPH(Reserva_Lavrável)

(0, 1,98661429815), (155000000, 1,95404526018), (3,1e+08, 1,84828363996), (465000000, 1,55459972235), (6,2e+08, 1,000), (775000000, 0,445400277651), (9,3e+08, 0,151716360042), (1085000000, 0,0459547398201), (1,24e+09, 0,0133857018486)

UNITS: Dimensionless

Concentrado_de_Cobre(t) = Concentrado_de_Cobre(t - dt) + (Beneficiamento) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Concentrado_de_Cobre = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

Beneficiamento =

$$\text{Extração} * ((\text{Teor_de_Alimentação} / \text{Conversor\%}) * (\text{Recuperação} / \text{Conversor\%})) / (\text{Teor_do_Concentrado} / \text{Conversor\%}) \text{ {UNIFLOW}}$$

UNITS: Tonnes/Years

Construção = 3

UNITS: Years

"ConsumoÁguaBeneficiamento_(m³/t)" = 0,6

UNITS: Cubic Meters/Tonnes

"Conversor_g/t" = 1000*1000

UNITS: g/Tonnes

Conversor% = 100

UNITS: Dimensionless

"Cu_Contido_in-situ" = Extração*Teor_médio/Conversor%

UNITS: Tonnes/Years

Cu_Produzido = Beneficiamento*Teor_do_Concentrado/Conversor%

UNITS: Tonnes/Years

"Diesel_(MJ/ton)" = 15,7

UNITS: MJ/Tonnes

Diesel_Demandado(t) = Diesel_Demandado(t - dt) + (Diesel) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Diesel_Demandado = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

Diesel = Extração*"Diesel_(MJ/ton)" {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

Diesel_eq = 1,5

UNITS: Dimensionless

Diluição = 4

UNITS: Dimensionless

"Duração_do_Ramp-up" = 2

UNITS: Years

Eficiência_Material = SAFEDIV(Receita_Total; Total_Material_Movimentado; 0)

UNITS: \$/Tonnes

Eletricidade = 7,7

UNITS: MJ/kWh

Eletricidade_Demandada(t) = Eletricidade_Demandada(t - dt) + (EnergiaElétrica) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Eletricidade_Demandada = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

$EnergiaElétrica = (EnergiaBeneficiamento + EnergiaMina) * Eletricidade$ {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

$Energi_Aço_Demandado(t) = Energi_Aço_Demandado(t - dt) + (AçoEnergia) * dt$ {NON-NEGATIVE}

INIT Energi_Aço_Demandado = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

$AçoEnergia = Taxa_Consumo_Aço * Aço_ (MJ/kg)$ {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

Energia_Beneficiamento = 22

UNITS: kWh/Tonnes

$Energia_Cal_Demandada(t) = Energia_Cal_Demandada(t - dt) + (CalEnergia) * dt$ {NON-NEGATIVE}

INIT Energia_Cal_Demandada = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

$CalEnergia = "Cal_MJ/kg" * Taxa_Cal_Consumida$ {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

$Energia_Diesel_Demandado(t) = Energia_Diesel_Demandado(t - dt) + (EnergiaDiesel) * dt$ {NON-NEGATIVE}

INIT Energia_Diesel_Demandado = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

$EnergiaDiesel = Diesel_eq * Diesel$ {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

$Energia_Explosivos_Demandado(t) = Energia_Explosivos_Demandado(t - dt) + (Taxa_Explosivos_Energia) * dt$ {NON-NEGATIVE}

INIT Energia_Explosivos_Demandado = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

$Taxa_Explosivos_Energia = Explosivos * Explosivos_Energia$ {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

$Energia_Quimicos_Demandado(t) = Energia_Quimicos_Demandado(t - dt) + (QuímicosEnergia) * dt$ {NON-NEGATIVE}

INIT Energia_Quimicos_Demandado = 0

UNITS: MJ

INFLOWS:

QuímicosEnergia = QuímicosFlot*"Químicos_(MJ/kg)" {UNIFLOW}

UNITS: MJ/Years

EnergiaMina_Demandada(t) = EnergiaMina_Demandada(t - dt) + (EnergiaMina) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT EnergiaMina_Demandada = 0

UNITS: kWh

INFLOWS:

EnergiaMina = "TaxaEnergiaMina_(kWh/t_minério)"*Extração {UNIFLOW}

UNITS: kWh/Years

EnergiaPlanta_Demandada(t) = EnergiaPlanta_Demandada(t - dt) + (EnergiaBeneficiamento) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT EnergiaPlanta_Demandada = 0

UNITS: kWh

INFLOWS:

EnergiaBeneficiamento = Energia_Beneficiamento*Extração {UNIFLOW}

UNITS: kWh/Years

"Explosivos_(kg/t)" = 0,3

UNITS: kg/Tonnes

Explosivos_Demandado(t) = Explosivos_Demandado(t - dt) + (Explosivos) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Explosivos_Demandado = 0

UNITS: kg

INFLOWS:

Explosivos = "Explosivos_(kg/t)"*Extração {UNIFLOW}

UNITS: kg/Years

Explosivos_Energia = 22,7

UNITS: MJ/kg

Ineficiência_de_Extração = SAFEDIV(Perdas_Minerais_Rejeito; Perdas_Minerais_Rejeito+Receita_Total; 0)

UNITS: Dimensionless

LeadTime = Licenciamento+Construção

UNITS: Years

Licenciamento = 1

UNITS: Years

"Perdas_Acumuladas_(AgAu)"[AgAu](t) = "Perdas_Acumuladas_(AgAu)"[AgAu](t - dt) + ("Perdas_Minerais_(AgAu)"[AgAu]) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT "Perdas_Acumuladas_(AgAu)"[AgAu] = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

"Perdas_Minerais_(AgAu)"[Ag] = Byproducts[Ag]*(Conversor%-Recuperação_AuAg)/Recuperação_AuAg {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

"Perdas_Minerais_(AgAu)"[Au] = Byproducts[Au]*(Conversor%-Recuperação_AuAg)/Recuperação_AuAg {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

UNITS: Tonnes/Years

"Perdas_Minerais_(Cu)_Acumulado"(t) = "Perdas_Minerais_(Cu)_Acumulado"(t - dt) + ("Perdas_Minerais_(Cu)") * dt {NON-NEGATIVE}

INIT "Perdas_Minerais_(Cu)_Acumulado" = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

"Perdas_Minerais_(Cu)" = "Cu_Contido_in-situ"-Cu_Produzido {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

Perdas_Minerais_Rejeito = ("Perdas_Minerais_(Cu)"*Preço_do_Cobre)+("Perdas_Minerais_(AgAu)"[Ag]*Preço_Ag)+("Perdas_Minerais_(AgAu)"[Au]*Preço_Au)

UNITS: \$/Years

Pilha_de_Estéril(t) = Pilha_de_Estéril(t - dt) + (Estéril) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Pilha_de_Estéril = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

Estéril = Extração*SR {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

"Químicos_(MJ/kg)" = 66,3

UNITS: MJ/kg

Quimicos_Demandado(t) = Quimicos_Demandado(t - dt) + (QuímicosFlot) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Quimicos_Demandado = 0

UNITS: kg

INFLOWS:

QuímicosFlot = "QuimicosFlotação_(kg/t)"*Extração {UNIFLOW}

UNITS: kg/Years

"QuimicosFlotação_(kg/t)" = 0,1

UNITS: kg/Tonnes

"Ramp-up" = RAMP(SAFEDIV(Taxa_de_Extração; "Duração_do_Ramp-up"; Taxa_de_Extração);
LeadTime; LeadTime+"Duração_do_Ramp-up")

UNITS: Tonnes

Recuperação = 86,5

UNITS: Dimensionless

Recuperação_AuAg = 67,5

UNITS: Dimensionless

Rejeito_Gerado(t) = Rejeito_Gerado(t - dt) + (Rejeito) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Rejeito_Gerado = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

Rejeito = Extração-Beneficiamento {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

Reserva_Lavrada(t) = Reserva_Lavrada(t - dt) + (Extração) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Reserva_Lavrada = 0

UNITS: Tonnes

INFLOWS:

Extração = IF "Duração_do_Ramp-up" = 0 THEN STEP(Taxa_de_Extração; LeadTime) ELSE
"Ramp-up" {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

Reserva_Lavrável(t) = Reserva_Lavrável(t - dt) + (- Extração) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Reserva_Lavrável = 784000000

UNITS: Tonnes

OUTFLOWS:

Extração = IF "Duração_do_Ramp-up" = 0 THEN STEP(Taxa_de_Extração; LeadTime) ELSE
"Ramp-up" {UNIFLOW}

UNITS: Tonnes/Years

SR = 2,14

UNITS: Dimensionless

Taxa_de_Extração = 23430000

UNITS: Tonnes/Years

"TaxaEnergiaMina_(kWh/t_minério)" = 1

UNITS: kWh/Tonnes

Teor_de_Alimentação = ((Conversor%*Teor_médio)+(Diluição*0))/(Diluição+Conversor%)

UNITS: Dimensionless

Teor_do_Concentrado = 38

UNITS: Dimensionless

Teor_médio = 0,98

UNITS: Dimensionless

"Teor_Médio_>_CoG" = GRAPH(CoG)

(0,000, 0,000), (0,200, 0,700), (0,400, 0,950), (0,600, 1,088), (0,800, 1,184), (1,000, 1,325), (1,200, 1,465), (1,400, 1,561), (1,600, 1,649), (1,800, 1,807), (2,000, 2,000)

UNITS: Dimensionless

TeorAg = 55

UNITS: g/Tonnes

TeorAu = 16

UNITS: g/Tonnes

Total_Material_Movimentado = Estéril+Extração

UNITS: Tonnes/Years

"Vida_útil_-_Taylor" = 0,2*((HISTORY(Reserva_Lavrável; 0))^(1/4))

UNITS: Years

Subsistema_Financeiro:

CAPEX(t) = CAPEX(t - dt) + (- CAPEXInvestimento) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT CAPEX = 1287000000

UNITS: \$

OUTFLOWS:

CAPEXInvestimento = STEP(HISTORY(CAPEX; 0)/Construção; Licenciamento)-STEP(CAPEX/Construção; Licenciamento+Construção) {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

CAPEX_Gasto(t) = CAPEX_Gasto(t - dt) + (CAPEXInvestimento) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT CAPEX_Gasto = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

CAPEXInvestimento = STEP(HISTORY(CAPEX; 0)/Construção; Licenciamento)-STEP(CAPEX/Construção; Licenciamento+Construção) {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Capital_de_Giro = STEP(HISTORY(CAPEX; 0)*Capital_de_Giro_%/Conversor%; LeadTime+1)-STEP(HISTORY(CAPEX; 0)*Capital_de_Giro_%/Conversor%; LeadTime+2)

UNITS: \$/Years

Capital_de_Giro_% = 15

UNITS: Dimensionless

"Capital_de_Giro_-_Saída" = DELAY(Capital_de_Giro; "Vida_útil_-_Taylor"; LeadTime)

UNITS: \$/Years

Custo_de_Eletricidade = 3,5

UNITS: \$/Tonnes

Custo_de_Lavra = 3

UNITS: \$/Tonnes

Custos_Administrativos = 350*25000

UNITS: \$/Years

Custos_de_Manutenção = 350*50000

UNITS: \$/Years

Custos_de_operação = Custos_Diretos+Custos_Indiretos

UNITS: \$/Years

Custos_de_Processamento = 7

UNITS: \$/Tonnes

Custos_de_Serviços = 30000*350

UNITS: \$/Years

Custos_Diretos = Extração*(Custo_de_Lavra+Custos_de_Processamento+Custo_de_Eletricidade)

UNITS: \$/Years

Custos_Indiretos =

Custos_de_Manutenção+Custos_Administrativos+Custos_de_Serviços+Externalidades+CSR_Anual

UNITS: \$/Years

Depreciação = HISTORY(CAPEX; 0)

UNITS: \$

Depreciação_Linear = STEP(Depreciação/Duração_Depreciação; LeadTime)-STEP(Depreciação/Duração_Depreciação; Duração_Depreciação+LeadTime)

UNITS: \$/Years

Duração_Depreciação = 5

UNITS: Years

Duração_Fechamento_de_Mina = 5

UNITS: Years

EBITDA = Receita_Líquida-Custos_de_operação

UNITS: \$/Years

Fator_de_Desconto = DELAY(1/(1+(SAFEDIV(TMA; Conversor%; 0)))^(TIME); LeadTime; 0)

UNITS: Dimensionless

"Fator_Desconto_-_CAPEX" = DELAY(1/(1+(SAFEDIV(TMA_CAPEX; Conversor%; 0)))^(TIME); 1; 0)

UNITS: Dimensionless

Fator_Preço_de_Venda_AgAu = 95

UNITS: Dimensionless

FCD_Acumulado(t) = FCD_Acumulado(t - dt) + (Fluxo_de_Caixa_Descontado) * dt

INIT FCD_Acumulado = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Fluxo_de_Caixa_Descontado = Fluxo_de_Caixa_Livre*Fator_de_Desconto

UNITS: \$/Years

FCD_Investimento(t) = FCD_Investimento(t - dt) + ("Fluxo_de_Caixa_Descontado_-_Investimento") * dt

INIT FCD_Investimento = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

"Fluxo_de_Caixa_Descontado_-_Investimento" = ("Capital_de_Giro_-_Saída"-Sustaining_Anual-Capital_de_Giro-"Fator_Desconto_-_CAPEX"-CAPEXInvestimento-Fechamento_de_Mina)*"Fator_Desconto_-_CAPEX"

UNITS: \$/Years

FCL_Acumulado(t) = FCL_Acumulado(t - dt) + (Fluxo_de_Caixa_Livre) * dt

INIT FCL_Acumulado = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Fluxo_de_Caixa_Livre = EBITDA-Impostos_Pagos

UNITS: \$/Years

Fechamento_de_Mina = STEP(HISTORY(Fechamento_de_Mina_\$; 0)/Duração_Fechamento_de_Mina; LeadTime+"Vida_útil_-_Taylor"-Duração_Fechamento_de_Mina)

UNITS: \$/Years

Fechamento_de_Mina_\$ = CAPEX*Fechamento_de_Mina_%/Conversor%

UNITS: \$

Fechamento_de_Mina_% = 25

UNITS: Dimensionless
 Impostos = 34
 UNITS: Dimensionless
 Impostos_Pagos = IF Lucro_Tributável > 0 THEN Lucro_Tributável*Impostos/Conversor% ELSE 0
 UNITS: \$/Years
 Lucro_Tributável = EBITDA-Depreciação_Linear
 UNITS: \$/Years
 NSR = 70
 UNITS: Dimensionless
 "PIS/COFINS" = 9,25
 UNITS: Dimensionless
 "PIS/COFINS_Pago" = Receita_Total*"PIS/COFINS"/Conversor%
 UNITS: \$/Years
 Preço_Ag = 0,48*1000000
 UNITS: \$/Tonnes
 Preço_Au = 50*1000000
 UNITS: \$/Tonnes
 Preço_do_Cobre = 7000
 UNITS: \$/Tonnes
 Receita_AgAu =
 (Fator_Preço_de_Venda_AgAu/Conversor%)*((Preço_Au*Byproducts[Au])+(Preço_Ag*Byproducts[Ag]))
 UNITS: \$/Years
 Receita_Cobre = Cu_Produzido*Preço_do_Cobre*NSR/Conversor%
 UNITS: \$/Years
 Receita_Líquida = Receita_Total-Royalties_Pagos-"PIS/COFINS_Pago"
 UNITS: \$/Years
 Receita_Total = Receita_Cobre+Receita_AgAu
 UNITS: \$/Years
 Royalties = 2
 UNITS: Dimensionless
 Royalties_Pagos = Receita_Total*Royalties/Conversor%
 UNITS: \$/Years
 Sustaining_% = 5
 UNITS: Dimensionless

Sustaining_Anual = STEP(HISTORY(CAPEX; 0)*Sustaining_%/Conversor%; LeadTime)

UNITS: \$

Taxa_Interna_de_Returno = Fluxo_de_Caixa_Livre+(SAFEDIV("Fluxo_de_Caixa_Descontado_-
_Investimento"; "Fator_Desconto_- CAPEX"))

UNITS: \$/Years

TIR_Calculada = IRR(Taxa_Interna_de_Returno)

UNITS: Dimensionless

TMA = 13

UNITS: Dimensionless

TMA_CAPEX = 7

UNITS: Dimensionless

Valor_Presente_Líquido_Esperado = FCD_Acumulado+FCD_Investimento

UNITS: \$

Subsistema_Socioeconômico:

"%_da_receita_em_CSR" = 2

UNITS: Dimensionless

Base_Gastos_Mão_de_Obra = Custos_de_operação

UNITS: \$/Years

ContribLocalAcum(t) = ContribLocalAcum(t - dt) + (Gasto_Consumo_Local) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT ContribLocalAcum = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Gasto_Consumo_Local =
((Empregos_EPC+Empregados_durante_Operação)*Gastos_Mão_de_Obra_Local)/Numero_base_
de_Empregados {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Contribuição_Local_Acumulada(t) = Contribuição_Local_Acumulada(t - dt) +
(Contribuição_Local_Total) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Contribuição_Local_Acumulada = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Contribuição_Local_Total =
CSR_Anual+Gasto_Consumo_Local+Impostos_Contribuição_Local+Investimentos_Locais
{UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Contribuição_Local_Por_t_Concentrado = SAFEDIV(Contribuição_Local_Acumulada; Concentrado_de_Cobre; 0)

UNITS: \$/Tonnes

CSR_Investido(t) = CSR_Investido(t - dt) + (CSR_Anual) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT CSR_Investido = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

CSR_Anual = Investimentos_em_Sustentabilidade {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Custo_Socioambiental(t) = Custo_Socioambiental(t - dt) + (Externalidades) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Custo_Socioambiental = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Externalidades =
"Custo_de_Biodiversidade_(Externalidade)"+"Custo_Carbono_(Externalidade)" {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Empregados_durante_Operação =
Relação_Empregos_e_Produção*Numero_base_de_Empregados

UNITS: person/Years

Empregos_EPC =
RAMP((Numero_base_de_Empregados*(Intensidade_Mão_de_Obra_EPC/Conversor%))/LeadTime; 0; LeadTime)-
RAMP(Numero_base_de_Empregados*(Intensidade_Mão_de_Obra_EPC/Conversor%); LeadTime; LeadTime+1)

UNITS: person/Years

Gastos_Mão_de_Obra_Local =
((Proporção_Gastos_Locais_Empregados/Conversor%)*(Proporção_Emrpegados_Locais/Conversor%)*(Proporção_de_Gastos_com_Mão_de_Obra/Conversor%))*Base_Gastos_Mão_de_Obra

UNITS: \$/Years

Imposto_Municipal = 20

UNITS: Dimensionless

Impostos_Gerados(t) = Impostos_Gerados(t - dt) + (Geração_de_Renda_de_Impostos) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Impostos_Gerados = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Geração_de_Renda_de_Impostos = Royalties_Pagos+Impostos_Pagos+"PIS/COFINS_Pago" {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Intensidade_Mão_de_Obra_EPC = 400

UNITS: Dimensionless

Inv_Locais_Acum(t) = Inv_Locais_Acum(t - dt) + (Investimentos_Locais) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Inv_Locais_Acum = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Investimentos_Locais =
(CAPEXInvestimento+Sustaining_Anual+Fechamento_de_Mina)*(Proporção_CAPEX_Local/Conv
ersor%) {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Investimentos_em_Sustentabilidade = IF Receita_Total > 0 THEN
Receita_Total*"%_da_receita_em_CSR"/Conversor% ELSE 20000000

UNITS: \$/Years

Numero_base_de_Empregados = 1000

UNITS: person/Years

Proporção_CAPEX_Local = 60

UNITS: Dimensionless

Proporção_de_Gastos_com_Mão_de_Obra = 45

UNITS: Dimensionless

Proporção_Emrpegados_Locais = 70

UNITS: Dimensionless

Proporção_Gastos_Locais_Empregados = 90

UNITS: Dimensionless

Receita_Acumulada(t) = Receita_Acumulada(t - dt) + (Receitas_anuais) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Receita_Acumulada = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Receitas_anuais = Receita_Total {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

Receita_sobre_custo_social = SAFEDIV(Receita_Acumulada; Custo_Socioambiental)

UNITS: Dimensionless

Relação_Empregos_e_Produção = GRAPH(Extração)

(0, 0,000), (3000000, 0,0612070245601), (6000000, 0,128851248086), (9000000,
0,203609676702), (12000000, 0,28623051789), (15000000, 0,377540668798), (18000000,
0,478453992107), (21000000, 0,589980462274), (24000000, 0,713236273698), (27000000,
0,849455011967), (30000000, 1,000)

UNITS: Dimensionless

Royalty_Local = 65

UNITS: Dimensionless

Stock_7(t) = Stock_7(t - dt) + (Impostos_Contribuição_Local) * dt {NON-NEGATIVE}

INIT Stock_7 = 0

UNITS: \$

INFLOWS:

Impostos_Contribuição_Local =
 (Impostos_Pagos*(Imposto_Municipal)/Conversor%)+(Royalties_Pagos*Royalty_Local/Conversor%
) {UNIFLOW}

UNITS: \$/Years

{ The model has 214 (222) variables (array expansion in parens).

In root model and 0 additional modules with 4 sectors.

Stocks: 42 (46) Flows: 40 (44) Converters: 132 (132)

Constants: 73 (73) Equations: 99 (103) Graphicals: 4 (4)

}