

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO, UTILIZANDO A TEORIA DAS
OPÇÕES REAIS**

SAVIO VARGAS LORENTZ

ORIENTADOR: PROF^a. DR^a. TÂNIA LÚCIA SANTOS MIRANDA

BELO HORIZONTE - MG

AGOSTO/2012

SAVIO VARGAS LORENTZ

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO UTILIZANDO A TEORIA DAS
OPÇÕES REAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química – UFMG como
requisito parcial para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química

ORIENTADOR: PROF^a. DR^a. TÂNIA LÚCIA SANTOS MIRANDA

BELO HORIZONTE - MG

AGOSTO/2012

Lorentz, Savio Vargas.

Avaliação Técnico-Econômica de Projetos de Eficiência Energética em Mineração utilizando a Teoria das Opções Reais / Savio Vargas Lorentz. Minas Gerais: UFMG / Departamento de Engenharia Química, 2012.

xiii, 158 f.: il.

Orientador: Tânia Lúcia Santos Miranda

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2012.

Referências Bibliográficas: f. 149 - 158.

1. Teoria das Opções Reais. 2. Mineração. 3. Eficiência Energética – Tese. I. Miranda, Tânia Lúcia Santos. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, DEQ. III. Título.

SAVIO VARGAS LORENTZ

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO UTILIZANDO A TEORIA DAS
OPÇÕES REAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Avaliação Técnico-Econômica de Projetos de Eficiência Energética em Mineração, utilizando a Teoria das Opções Reais*, elaborada por Savio Vargas Lorentz, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química

Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Tânia Lúcia Santos Miranda

Prof. Dr. Roberto Fernando de Souza Freitas

Dr. Roberto Mattioli Silva

BELO HORIZONTE - MG

AGOSTO DE 2012

Dedico este trabalho aos meus
amados pais e à minha amada
namorada.

AGRADECIMENTOS

Tenho que agradecer a todos vocês, que foram essenciais durante essa jornada:

- Primeiramente, à minha estimada orientadora Tânia, não só pelo apoio, amizade e paciência, mas também por sempre acreditar em meu potencial;
- Aos meus pais e familiares pela estrutura, pelo incentivo e por todo o amor;
- À minha namorada, Gabrielinha, pelo incentivo, pelas conversas e pela companhia, em todos os momentos;
- À Chemtech, por me propiciar bagagem técnica e flexibilidade de horários, cruciais para a concretização dessa dissertação;
- Ao Departamento de Engenharia Química – UFMG, em especial ao Programa de Pós-Graduação;
- À CAPES, pelo auxílio financeiro cedido para a elaboração deste trabalho;
- E, por último, a Deus, por ter colocado vocês nessa caminhada!

“Veni, vidi, vici”

Júlio César, 47 A.C.

RESUMO

Neste presente trabalho, realizou-se uma avaliação técnico-econômica de um projeto de eficiência energética aplicado ao sistema de geração e distribuição de ar comprimido de uma indústria de mineração de ferro, utilizando os métodos convencionais e a Teoria das Opções Reais. Por meio de um fluxo de caixa tradicional, determinou-se o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto, sendo este valor negativo e igual a R\$ 34.477,68. Posteriormente, a previsão do comportamento do preço do minério de ferro foi estudada, gerando uma nova análise, via fluxo de caixa determinístico, com VPL positivo igual a R\$ 97.022,04. Na seqüência, modelou-se o comportamento do preço do minério por um Movimento Geométrico Browniano, encontrando-se um histograma com a distribuição do VPL do projeto, cuja média foi R\$ 97.161,90. Por último, uma árvore de decisão binomial foi construída, as flexibilidades de adiamento e expansão existentes no projeto foram identificadas e incorporadas ao modelo para análise pela Teoria das Opções Reais. Por meio dessa análise, a opção de adiamento e a opção de expansão no 5º período não foram benéficas para o projeto. Já a opção de expansão no 1º período agregou valor à tomada de decisão, aumentando o VPL do projeto para R\$ 219.427,62. Portanto, por meio da Teoria das Opções Reais foi possível captar as flexibilidades gerenciais existentes no projeto, complementando a análise de viabilidade econômica tradicional e aumentando o VPL do projeto de eficiência energética em mineração analisado nesta dissertação.

Palavras Chave: Teoria das Opções Reais, Mineração, Eficiência Energética.

ABSTRACT

In this present work, a technical-economic evaluation of an energy efficiency project applied to the generation and distribution system of compressed air in an iron mining industry was performed, using conventional methods and the Real Options Theory. By a traditional cash flow, the Net Present Value (NPV) is calculated, being negative and equal to R\$ 34,477.68. Subsequently, the prediction about iron ore price behavior is studied, generating a deterministic cash flow analysis with positive NPV equal to R\$ 97,022.04. Afterwards, the ore price behavior is modeled by a Geometric Brownian Motion, resulting in a histogram of the project NPV distribution, which average was R\$ 97,161.90. Finally, a binomial decision tree is mounted and the postponement and expansion flexibilities are identified, being incorporated into the model to analyze the Real Options Theory. By this analysis, the deferral option and the option to expand in the 5th period are not beneficial for the project. However, the option to expand in the 1st period was able to add value to the decision process, increasing the project NPV to R\$ 219,427.62. Therefore, by using the Real Options Theory, it was possible to capture the existing managerial flexibilities in the project, complementing the traditional viability analysis and increasing the NPV of the energy efficiency project in mining examined in this dissertation.

Keywords: Real Options Theory, Mining, Energy Efficiency.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviatura ou Sigla	Descrição
% trib.	Alíquota relativa a tributos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPM	<i>Capital Asset Pricing Model</i> (Modelo de Apreçamento de Ativos)
CBD	Certificados de Depósito Bancário
CO ₂	Gás Carbônico
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
Ct	Custos no tempo t
d	Dividendos pagos
d	Parâmetro de Descida do Modelo Binomial
dm _{tu}	<i>Dry metric tons unit</i> (unidades por tonelada métrica seca)
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
dP	Variação incremental do preço no intervalo dt
DPL [®]	<i>Decision Programming Language</i>
DSM	<i>Dutch State Mines</i> (Minas de Estados Holandeses)
DTA	<i>Decision Tree Analysis</i> (Análise por Árvores de Decisão)
e	Base dos logaritmos naturais
EBITDA	<i>Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i> (Lucro antes dos Juros, Impostos, Depreciação e Amortização)
FCD	Fluxo de Caixa Descontado
FC _t	Fluxo de Caixa no tempo t
FEL	<i>Front-End Loading</i>
FOB	<i>Free On Board</i>
I	Investimento Inicial
i	Taxa de Juros
IBOVESPA	Índice da Bolsa de Valores de São Paulo
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPA	<i>Independent Project Analysis</i>
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IRPJ	Imposto de Renda de Pessoa Jurídica
ISA	<i>International Society of Automation</i>
MGB	Movimento Geométrico Browniano
N(d1)	Probabilidade normal padronizada cumulativa da variável d1
ONU	Organização das Nações Unidas
p	Probabilidade de Subida do Modelo Binomial
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>

Abreviatura ou Sigla	Descrição
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
P_t	Preço do Minério de Ferro no período t
r	Taxa de Juros Livre de Risco
R_t	Receitas no tempo t
S_0	Preço do ativo subjacente
t	Tempo
T	Período de Vida Útil
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
u	Parâmetro de Subida do Modelo Binomial
VPL	Valor Presente Líquido
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i> (Custo Médio Ponderado do Capital)
α	Taxa de crescimento do preço no intervalo dt
ε	Parâmetro pertencente à distribuição normal reduzida
σ	Volatilidade

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Representação Esquemática do Processo de Beneficiamento Mineral
- Figura 2.2 – Estágios de Concentração - adaptada de WILLS & NAPIER-MUNN (2006)
- Figura 3.1 – Ciclo de Vida de Projeto – Metodologia FEL - adaptada de SILVA (2007); SANTIAGO *et al.* (2008)
- Figura 3.2 – Etapas de uma Auditoria Energética - adaptada de NOGUEIRA (2001)
- Figura 4.1 – Evolução dos Métodos de Avaliação de Investimentos – adaptado de BRANDÃO (2011)
- Figura 5.1 – Diagrama de Retorno de uma Opção de Compra – adaptado de DAMODARAN (2004) e BREALEY (2008)
- Figura 5.2 – Diagrama de Retorno de uma Opção de Venda – adaptado de DAMODARAN (2004) e BREALEY (2008)
- Figura 5.3 – Assimetria na Distribuição de Probabilidade do VPL ocasionada pela Flexibilidade Gerencial – adaptada de SANTOS (1999) *apud* PESSOA (2006)
- Figura 5.4 – Relação entre Tipo de Projeto e Forma de Análise – adaptada de PARK & HERATH (2000) *apud* MELIN (2008)
- Figura 5.5 – Movimento Geométrico Browniano aproximado por uma Árvore Binomial – adaptado de DIAS (2006); BRANDÃO (2011)
- Figura 6.1 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Tradicional
- Figura 6.2 - Análise de Sensibilidade da Viabilidade do Projeto
- Figura 6.3 - Análise de Cenários da Viabilidade do Projeto
- Figura 6.4 – Variação anual do Preço do Minério de Ferro
- Figura 6.5 – Fluxo de Caixa Determinístico do Projeto
- Figura 6.6 – MGB do Preço do Minério de Ferro
- Figura 6.7 – Distribuição de Probabilidade do VPL do Projeto
- Figura 6.8 – Representação da Árvore Binomial do Preço do Minério de Ferro
- Figura 6.9 – Representação Esquemática das Opções do Projeto

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 - Principais Aplicações de diferentes Metais – adaptada de DNPM (2009)
- Tabela 2.2 – Importância da Indústria Mineral para o Brasil – LOBÃO (2010)
- Tabela 2.3 – Reservas Mundiais dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009)
- Tabela 2.4 – Dados de Produção Mundial dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009, 2010)
- Tabela 2.5 – Reservas Brasileiras dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009, 2010)
- Tabela 2.6 – Reservas e Produção Mundial de Minério de Ferro – DNPM (2010)
- Tabela 2.7 – Reservas Brasileiras de Minério de Ferro – adaptada de DNPM (2009)
- Tabela 2.8 – Evolução de Preços do Minério de Ferro – VIDAL(2008); UNCTAD (2011)
- Tabela 5.1 – Posições de uma Opção em relação ao Fluxo de Caixa – adaptado de PAMPLONA (2005); MELIN (2008)
- Tabela 5.2 – Comparação entre Opções Financeiras e Reais – adaptado de PARK & HERATH (2000) *apud* PESSOA (2006); VIDAL (2008)
- Tabela 5.3 – Influência de diferentes variáveis no valor da Opção – adaptado de DAMODARAN (2000); BREALEY (2008); MELIN (2008); SOUSA NETO (2008)
- Tabela 5.4 – Comparação entre os Modelos de Black & Scholes e Binomial – adaptado de BRANDÃO (2011) *apud* PESSOA (2006)
- Tabela 6.1 – Estimativa do Investimento para o Projeto
- Tabela 6.2 – Ganho estimado devido ao não travamento de válvulas
- Tabela 6.3 – Ganho estimado devido à redução de paradas de filtros a disco
- Tabela 6.4 – Ganho estimado devido à redução do mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo
- Tabela 6.5 – Ganho estimado devido à redução do consumo de energia elétrica
- Tabela 6.6 – Estimativa dos Retornos para o Projeto
- Tabela 6.7 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Tradicional
- Tabela 6.8 – Gasto necessário para manutenção do sistema de ar comprimido
- Tabela 6.9 – Tributos incidentes sobre a Base Tributável
- Tabela 6.10 – Compilação da Análise via período de *Payback*
- Tabela 6.11 – Análise Econômica do Projeto por meio do Valor Presente Líquido (VPL)
- Tabela 6.12 – Compilação da Análise via Taxa Interna de Retorno
- Tabela 6.13 – Análise de Sensibilidade do VPL (em R\$) do Projeto
- Tabela 6.14 – Análise de Cenários do VPL (em R\$) do Projeto
- Tabela 6.15 – Previsão para Preço do Minério de Ferro – adaptada de UBS (2011)
- Tabela 6.16 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Determinística
- Tabela 6.17 – Compilação das Variáveis de Engenharia Econômica
- Tabela 6.18 – Compilação das Informações da Opção de Expansão
- Tabela 6.19 – Síntese das Diversas Análises Efetuadas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2: MINERAÇÃO	5
2.1 IMPORTÂNCIA	5
2.2 MINERAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO.....	7
2.3 MINÉRIO DE FERRO.....	9
2.3.1 RESERVAS E PRODUÇÃO.....	10
2.3.2 PREÇO.....	12
2.4 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO.....	15
2.4.1 COMINUIÇÃO	16
2.4.2 PENEIRAMENTO.....	19
2.4.3 CLASSIFICAÇÃO.....	19
2.4.4 CONCENTRAÇÃO.....	21
2.4.5 DESAGUAMENTO	25
2.4.6 MANEJO DE MATERIAIS	27
CAPÍTULO 3: PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO....	32
3.1 PROJETOS: DEFINIÇÃO E CICLO DE VIDA	32
3.2 METODOLOGIA FEL (FRONT-END LOADING).....	33
3.2.1 ANÁLISE DO NEGÓCIO (FEL 1).....	36
3.2.2 DESENVOLVIMENTO DO ESCOPO (FEL 2).....	37
3.2.3 PLANEJAMENTO DA IMPLANTAÇÃO (FEL 3).....	38

3.2.4	EXECUÇÃO	38
3.2.5	OPERAÇÃO	39
3.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	39
3.3.1	GERENCIAMENTO ENERGÉTICO	41
3.3.2	DIAGNÓSTICO E AUDITORIA ENERGÉTICA	42
3.4	AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO	44
3.4.1	GESTÃO ENERGÉTICA	45
3.4.2	OPERAÇÕES DE COMINUIÇÃO.....	46
3.4.3	EQUIPAMENTOS DE MINA.....	46
3.4.4	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA E DE POLPA.....	47
3.4.5	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO	48
3.4.6	SISTEMAS DE AR CONDICIONADO	49
3.4.7	MOTORES ELÉTRICOS	51
3.4.8	SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR.....	52
3.4.9	SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO.....	53
CAPÍTULO 4:	ENGENHARIA ECONÔMICA	55
4.1	ESTIMATIVAS DE INVESTIMENTOS	56
4.2	ESTIMATIVAS DE GANHOS.....	57
4.2.1	ANÁLISE BASEADA NO COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO	57
4.2.2	ANÁLISE BASEADA EM EVENTOS DISCRETOS	59
4.3	FLUXO DE CAIXA	61
4.3.1	INVESTIMENTOS	62
4.3.2	RECEITAS	63
4.3.3	GASTOS	63
4.3.4	IMPOSTOS	64
4.3.5	DEPRECIÇÃO	65
4.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS.....	66
4.4.1	DIRECIONADORES DO NEGÓCIO.....	66
4.4.2	PERÍODO DE <i>PAYBACK</i>	69

4.4.3	VALOR PRESENTE LÍQUIDO	70
4.4.4	TAXA INTERNA DE RETORNO.....	71
4.5	ANÁLISE DE INVESTIMENTOS EM CONDIÇÕES DE RISCOS	73
4.5.1	ABORDAGENS CONSIDERANDO O RISCO	74
4.5.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E DE CENÁRIOS	76
4.5.3	MÉTODO DE MONTE CARLO.....	77
4.5.4	ANÁLISE POR ÁRVORE DE DECISÃO	79
 CAPÍTULO 5: OPÇÕES REAIS EM ANÁLISE DE INVESTIMENTOS		80
5.1	INTRODUÇÃO ÀS OPÇÕES.....	80
5.2	IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS	84
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE OPÇÕES REAIS E FINANCEIRAS.....	88
5.4	TIPOS DE OÇÕES REAIS	91
5.4.1	OPÇÃO DE ABANDONO	92
5.4.2	OPÇÃO DE FECHAR TEMPORARIAMENTE UM PROJETO	92
5.4.3	OPÇÃO DE TROCA.....	92
5.4.4	OPÇÃO DE CRESCIMENTO FUTURO	93
5.4.5	OPÇÃO DE ADIAR O INVESTIMENTO	93
5.4.6	OPÇÃO DE EXPANSÃO.....	94
5.4.7	OPÇÃO DE CONTRAÇÃO.....	94
5.4.8	OPÇÃO COMBINADA.....	95
5.4.9	OPÇÃO DE INVESTIMENTO EM ESTÁGIOS	95
5.5	PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES	95
5.5.1	PROCESSOS ESTOCÁSTICOS.....	96
5.5.2	MODELO DE BLACK & SCHOLES.....	98
5.5.3	MODELO BINOMIAL.....	101
5.6	LIMITAÇÕES DAS OPÇÕES REAIS.....	103

CAPÍTULO 6: ESTUDO DE CASO	105
6.1 MOTIVAÇÃO.....	106
6.2 AVALIAÇÃO TÉCNICA DO PROJETO.....	107
6.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA TRADICIONAL DO PROJETO.....	109
6.3.1 ESTIMATIVA DO INVESTIMENTO.....	110
6.3.2 ESTIMATIVA DOS GANHOS.....	110
6.3.3 MONTAGEM DO FLUXO DE CAIXA	114
6.3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO PROJETO.....	119
6.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA VIA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS.....	127
6.4.1 PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO.....	127
6.4.2 DETERMINAÇÃO DA VOLATILIDADE.....	128
6.4.3 PREVISÃO DE VARIAÇÃO DO PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO.....	129
6.4.4 FLUXO DE CAIXA DETERMINÍSTICO	130
6.4.5 COMPORTAMENTO DO PROCESSO ESTOCÁSTICO.....	132
6.4.6 MODELO BINOMIAL.....	135
6.4.7 AVALIAÇÃO À TAXA LIVRE DE RISCO.....	136
6.4.8 ÁRVORE DE DECISÃO	136
6.4.9 FLEXIBILIDADES EXISTENTES NO PROJETO	139
6.4.10 ANÁLISE VIA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS.....	140
6.5 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS.....	143
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	147
CAPÍTULO 8: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
CAPÍTULO 9: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Neste capítulo, inicialmente apresenta-se a justificativa para a realização deste trabalho. Na seqüência, além do objetivo geral, são explicitados os objetivos específicos, e, ao final, é apresentada a estrutura da dissertação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a mineração é fundamental para a sobrevivência e desenvolvimento da sociedade moderna, uma vez que gera metais indispensáveis para nosso cotidiano, tais como ferro, cobre e alumínio, além de apresentar importante participação na economia brasileira, respondendo por 4,4% do PIB e 22,4% das exportações (LOBÃO, 2010). O minério de ferro é o principal responsável por esses valores, abrangendo cerca de 60% da produção mineral brasileira, sendo responsável pela geração de 29,2 mil empregos diretos e indiretos, o que evidencia a enorme importância desse metal para o Brasil (DNPM, 2010).

Adicionalmente, em um mercado tão competitivo, marcado por rápidas mudanças em tecnologias e em demandas dos clientes, as organizações executam, sob a forma de projetos, as atividades que não se enquadram em seus limites operacionais normais (CARVALHO, 2010; LUECKE, 2010). Assim, de acordo com o guia PMBOK, do inglês *Project Management Body of Knowledge*, um projeto é definido como um esforço temporário que visa gerar um produto, serviço ou resultado exclusivo, constituindo parte essencial do planejamento estratégico de uma organização (PMI, 2008). Dessa forma, um enorme montante de capital é investido na realização de projetos de diversos tipos, o que torna fundamental a adoção de ciclos de vida, como a metodologia *Front-End Loading* (FEL), que visem

definir escopos, evitar retrabalhos e aperfeiçoar o planejamento, buscando sempre obter melhores retornos financeiros (SILVA, 2007; LIMA, 2008).

O projeto analisado neste trabalho almeja, além de obter ganhos de produção, reduzir custos energéticos e gerar ganhos sócio-ambientais, a partir do uso consciente e eficaz dos recursos energéticos. Logo, as crescentes preocupações sobre a escassez, a possibilidade de esgotamento de fontes não renováveis de energia, além de graves acidentes ambientais, estão contribuindo para a disseminação da realização desse tipo de projeto, uma vez que esses aliam ganhos ambientais e econômicos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. O processo de mineração, em especial, apresenta um significativo potencial para práticas de eficiência energética, uma vez que grandes reduções de consumo energético podem ser obtidas a partir do investimento de pequenos montantes de capital (CNI, 2009).

Assim, esses projetos, quando tecnicamente viáveis, devem ser analisados com o intuito de avaliar sua viabilidade econômica, uma vez que sempre que um projeto de engenharia é realizado, espera-se obter retorno financeiro que justifique os recursos investidos. Para auxiliar no processo decisório, são utilizados diferentes princípios e técnicas, que constituem os pilares da engenharia econômica (GRANT, 1982). Entretanto, as formas de análise de investimentos tradicionalmente empregadas, que se baseiam no fluxo de caixa descontado, tais como VPL, TIR e payback, apresentam limitações por não considerarem os riscos e incertezas envolvidos nos projetos (SAMANEZ, 2009).

Por isso, surgiram novas abordagens tais como o custo médio ponderado do capital (WACC), modelo de apreamento de ativos (CAPM), análise de sensibilidade e

cenários, além do método de monte Carlo e da análise por árvores de decisão, visando mitigar os problemas descobertos. No entanto, essas técnicas, apesar de englobarem os riscos e probabilidade inerentes ao projeto, não são capazes de agregar o valor da flexibilidade gerencial, o que culminou no desenvolvimento de técnicas ainda mais modernas, como a Teoria das Opções Reais (PESSOA, 2005).

Portanto, devido ao elevado montante de investimentos existentes em projetos no setor mineral, somado ao fato de os recursos empresariais serem, geralmente, limitados, faz-se necessário utilizar metodologias mais avançadas e completas para a avaliação e tomada de decisão em projetos, buscando aproveitar as melhores oportunidades disponíveis, contribuindo para o crescimento do setor e, conseqüentemente, de nosso país.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação consiste em aplicar a Teoria das Opções Reais, utilizando simulação de monte Carlo e árvores de decisão, para avaliar um projeto de eficiência energética em mineração, visando complementar os métodos tradicionais de avaliação de investimentos comumente empregados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação consiste em um trabalho multidisciplinar, de forma que é necessária uma abrangente revisão bibliográfica de diversos assuntos antes da formulação do estudo de caso. Para isso, no Capítulo 2, é discutida a mineração no Brasil e no mundo, dando enfoque especial ao minério de ferro e ao processo de produção e de beneficiamento de minério.

Já no Capítulo 3, são apresentados os projetos de engenharia, de acordo com os padrões preconizados pelo *Project Management Institute* (PMI), seguindo a metodologia FEL. Adicionalmente, nesse mesmo capítulo, é conceituada a eficiência energética, sendo estudadas as principais ações de eficiência aplicadas à mineração.

No Capítulo 4, são apresentados os principais tópicos em engenharia econômica, envolvendo formas de estimativas de investimentos e ganhos, montagem de fluxo de caixa e análise de viabilidade de projetos com e sem riscos.

No Capítulo 5, por sua vez, é apresentada a Teoria das Opções reais, explicitando principais definições, vantagens e aplicações.

O estudo de caso a ser desenvolvido, envolvendo a avaliação técnico-econômica de um projeto de eficiência energética em sistemas de ar comprimido aplicado à mineração, está contido no Capítulo 6.

Já no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do estudo de caso, sendo as sugestões para trabalhos futuros apresentadas no Capítulo 8.

Por último, no Capítulo 9, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a realização desta dissertação.

CAPÍTULO 2: MINERAÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a mineração pode ser definida como a extração, elaboração e beneficiamento de minerais que se encontram em estado natural, podendo ser sólido, como carvão e metais; líquido, como petróleo bruto; e gasoso, como o gás natural (DNPM-PE, 2010).

Este capítulo visa introduzir o tema de mineração, dando enfoque especial para os minérios sólidos, sobretudo para os que, após o beneficiamento, geram metais. Inicialmente, é discutida a importância da mineração, tanto para a sociedade quanto para a economia. Posteriormente, os aspectos da mineração no Brasil e no mundo são abordados, com ênfase especial para o minério de ferro. Por último, o processo de beneficiamento de minério é apresentado, incluindo as principais operações unitárias e auxiliares.

2.1 IMPORTÂNCIA

Os metais e, conseqüentemente, a mineração são de importância fundamental para a sociedade moderna, devido à vasta gama de aplicações desses. Alguns minerais vêm sendo utilizados a milhares de anos, como, por exemplo, o cobre, enquanto outros metais, como titânio e nióbio, começaram a ser utilizados apenas há cerca de 50 anos (PAULA, 2002; PESSOA, 2006). Na Tabela 2.1, são apresentadas as formas de uso mais importantes dos principais metais.

Tabela 2.1 - Principais Aplicações de diferentes Metais – adaptada de DNPM (2009)

Metal	Aplicação
Alumínio	Bens de Uso / Meios de Transporte / Construção Civil / Indústrias de Embalagens
Chumbo	Baterias para automóveis / Revestimentos antioxidantes / Proteção para aparelhos de raios-X
Cobre	Condutores elétricos / Ligas metálicas (com estanho e zinco, formando, respectivamente, bronze e latão)
Estanho	Soldas / Folha-de-flandres / Ligas metálicas (bronze)
Ferro	Fabricação de aço e ferro fundido / Indústrias de ferro-ligas e cimento
Manganês	Elemento de liga em siderúrgicas / Produção de pilhas
Nióbio	Indústrias Siderúrgicas / Produção de cerâmicas finas
Níquel	Fabricação de aço inoxidável e superligas / Produção de baterias recarregáveis e revestimentos metálicos / Catalisador em processos industriais
Ouro	Joalheria / Eletrônicos / Odontologia
Platina	Termômetros e termopares / Fabricação de utensílios cirúrgicos / Catalisador de reações químicas / Joalheria
Tungstênio	Produção de carboneto (máquinas cortantes) / Filamentos de lâmpadas incandescentes / Ligas especiais
Zinco	Revestimento protetor (galvanização) / Ligas (latão) / Produção de pilhas e baterias

Além disso, a mineração consiste em um dos pilares da economia brasileira, contribuindo para a geração de riquezas e de empregos, de modo a garantir um desenvolvimento sustentável. Na Tabela 2.2 são apresentadas evidências da importância da economia mineral no PIB e nas exportações brasileiras.

Tabela 2.2 – Importância da Indústria Mineral para o Brasil – adaptada de LOBÃO (2010)

Produto Interno Bruto (PIB)	2006	2007	2008
PIB mineração e transformação mineral (US\$ Bilhões)	64,2	68,1	69,1
Participação no PIB Brasil (%)	4,5	4,5	4,4
Comércio Exterior	2006	2007	2008
Exportações (US\$ Bilhões)	29,4	33,7	44,3
Participação - Exportações Brasil (%)	21,3	21,0	22,4
Participação no Saldo Brasil (%)	35,5	40,3	60,1

Nota: Valores de mineração e transformação mineral, exceto petróleo e gás natural.

É importante ressaltar que, do montante de US\$ 44,3 bilhões em exportações, cerca de 72% desse valor corresponde à participação do minério de ferro, o que evidencia a importância fundamental desse minério para nossa economia. Adicionalmente, acredita-se que a participação da mineração na economia tende a aumentar, uma vez que serão investidos, até o final de 2013, US\$ 47 bilhões para expansão da produção e descobertas de novas jazidas (LOBÃO, 2010).

A seguir, são destacados diferentes aspectos da mineração no Brasil e no mundo, tais como reservas e produção.

2.2 MINERAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO

Com o intuito de apresentar o panorama atual da mineração, nas Tabelas 2.3 e 2.4 estão compilados, respectivamente, os dados de reservas e produção mundial para diferentes metais.

Tabela 2.3 – Reservas Mundiais dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009)

Metal	Principais Reservas Mundiais
Alumínio	Guiné (25%) / Austrália (23%) / Brasil (10%)
Chumbo	Austrália (34%) / China (21%) / EUA (11%)
Cobre	Chile (36%) / Peru (12%) / EUA (7%)
Estanho	China (30%) / Indonésia (14%) / Peru (13%)
Ferro	Ucrânia (19%) / Rússia (16%) / China (13%)
Manganês	África do Sul (77%) / Ucrânia (10%) / Austrália (3%)
Nióbio	Brasil (98%) / Canadá (1,5%) / Austrália (0,5%)
Níquel	Austrália (19%) / Cuba (15%) / Canadá (10%)
Ouro	África do Sul (40%) / Austrália (7%) / China (5%)
Platina	África do Sul (87%) / Rússia (8%) / EUA (2,5%)
Tungstênio	China (46%) / Canadá (12%) / Rússia (7%)
Zinco	Austrália (21%) / China (19%) / EUA (19%)

Tabela 2.4 – Dados de Produção Mundial dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009, 2010)

Metal	Participação na Produção Mundial
Alumínio	China (32%) / Rússia (11%) / Canadá (8%)
Chumbo	Austrália (40%) / China (15%) / EUA (12%)
Cobre	Chile (36%) / EUA (8%) / Peru (8%)
Estanho	China (37%) / Indonésia (21%) / Peru (12%)
Ferro	China (35%) / Brasil (16%) / Austrália (15%)
Manganês	Brasil (20%) / África do Sul (19%) / China (18%)
Nióbio	Brasil (98%) / Canadá (1%) / Austrália (1%)
Níquel	Rússia (17%) / Canadá (16%) / Indonésia (13%)
Ouro	Austrália (11%) / África do Sul (11%) / China (10%)
Platina	África do Sul (80%) / Rússia (12%) / Canadá (4%)
Tungstênio	China (75%) / Rússia (6%) / Canadá (5%)
Zinco	China (28%) / Austrália (13%) / Peru (13%)

Como se pode observar, o Brasil se situa entre as nações com maior potencial mineral, possuindo uma posição privilegiada no quadro das reservas mundiais, com destaque para o nióbio, ferro, manganês e alumínio (PESSOA, 2006).

Já na Tabela 2.5 pode-se observar a proporção de reservas minerais em relação aos estados brasileiros, para cada um desses metais. É importante ressaltar que o estado de Minas Gerais apresenta as maiores reservas minerais para os principais metais brasileiros.

Tabela 2.5 – Reservas Brasileiras dos Principais Metais – adaptada de DNPM (2009, 2010)

Metal	Principais Reservas Brasileiras
Alumínio	Pará (85%) / Minas Gerais (12%) / Outros (3%)
Chumbo	Rio Grande do Sul (63%) / Minas Gerais (6%) / Paraná (3%)
Cobre	Pará (83%) / Goiás (7%) / Bahia (5%)
Estanho	Amazonas (87%) / Roraima (12%) / Pará (1%)
Ferro	Minas Gerais (67%) / Pará (16%) / Mato Grosso do Sul (16%)
Manganês	Minas Gerais (87%) / Mato Grosso do Sul (7%) / Pará (4%)
Nióbio	Minas Gerais (75%) / Amazonas (21%) / Goiás (4%)
Níquel	Goiás (38%) / Pará (34%) / Piauí (16%)
Ouro	Pará (42%) / Minas Gerais (37%) / Goiás (7%)
Platina	Reservas sem representatividade. Destaque: Minas Gerais, Pará e Rondônia
Tungstênio	Rio Grande do Norte (63%) / Pará (36%) / Santa Catarina (1%)
Zinco	Minas Gerais (88%) / Rio Grande do Sul (10%) / Mato Grosso (2%)

Em 2008, o minério de ferro respondeu por 61,2% do valor da produção mineral brasileira, sendo grande parte dessa riqueza gerada por nosso Estado. Portanto, o minério de ferro apresenta fundamental importância para o desenvolvimento do estado de Minas Gerais e, conseqüentemente, de todo o Brasil. Além disso, a mineração de ferro gerou 29,2 mil empregos, dos quais 20,5 mil diretos e 8,7 mil indiretos, o que evidencia a enorme importância sócio-econômica desse mineral (DNPM, 2010).

2.3 MINÉRIO DE FERRO

O elemento químico Ferro trata-se do quarto elemento mais encontrado na crosta terrestre, constituindo 4,2% dessa. Além disso, entre todos os metais, o ferro é o mais produzido, sendo o mais utilizado em nosso cotidiano. O ferro é encontrado na natureza sob diferentes formas, no entanto apenas os óxidos apresentam uma grande porcentagem de ferro. Entre os principais minerais que contêm ferro, pode-se citar magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e siderita (FeCO_3).

No Brasil, os depósitos de ferro mais importantes, consistem nos itabiritos, que são compostos por hematita e sílica (DNPM, 2009; EERE, 2010).

Entre os principais produtos obtidos após o beneficiamento de minério de ferro, destacam-se (DNPM, 2009):

- Granulados: minério de ferro bruto, comercializado granulado ou bitolado, apresentando granulometria acima de 6,3 milímetros;
- *Sinter Feed*: minério de ferro beneficiado, com granulometria entre 0,15 e 6,3 milímetros;
- *Pellet Feed*: minério de ferro beneficiado, com granulometria menor ou igual a 0,15 milímetros, utilizado para geração de pelotas utilizadas em usinas siderúrgicas.

2.3.1 RESERVAS E PRODUÇÃO

Atualmente, as reservas mundiais de minério de ferro totalizam 350 bilhões de toneladas, com destaque para Ucrânia (com 19,4% das reservas), Rússia (16,0%), China (13,1%), Austrália (12,9%) e Brasil (10,9%). Já a produção mundial em 2008 atingiu a marca de 2,2 bilhões de toneladas, sendo a produção brasileira responsável por 15,9% desse montante (DNPM, 2010).

Os dados compilados de reservas e produção de minério de ferro estão apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Reservas e Produção Mundial de Minério de Ferro – adaptada de DNPM (2010)

Países	Reservas ⁽¹⁾ (10 ³ t)		Produção (10 ³ t)		
	2007 ⁽²⁾	%	2007 ⁽²⁾	2008 ⁽²⁾	%
Brasil	40.000	10,9	354.674	350.707	15,9
África do Sul	2.300	0,7	42.000	42.000	1,9
Austrália	45.000	12,9	299.000	330.000	15,0
Canadá	3.900	1,1	33.000	35.000	1,6
Cazaquistão	19.000	5,4	24.000	26.000	1,2
China	46.000	13,1	707.000	77.000	35,0
Estados Unidos	15.000	4,3	52.000	54.000	2,5
Índia	9.800	2,8	180.000	200.000	9,1
Irã	2.500	0,7	32.000	32.000	1,5
Mauritânia	1.500	0,4	12.000	12.000	0,5
México	1.500	0,4	12.000	12.000	0,5
Rússia	56.000	16,0	105.000	110.000	5,0
Suécia	7.800	2,2	25.000	27.000	1,2
Ucrânia	68.000	19,4	78.000	80.000	3,6
Venezuela	6.000	1,7	23.000	20.000	0,9
Outros Países	25.700	7,9	21.326	99.293	4,5
TOTAL	350.000	100,0	2.000.000	2.200.000	100,0

Notas: (1) Reservas medidas e estimadas; (2) Dados estimados, exceto Brasil.

Em relação às reservas brasileiras, medidas e indicadas, que possuem um teor médio de 54,89% de ferro, destacam-se os estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, conforme se pode observar na Tabela 2.7 (DNPM, 2009; DNPM, 2010).

Tabela 2.7 – Reservas Brasileiras de Minério de Ferro – adaptada de DNPM (2009)

Unidade da Federação	Porcentagem das Reservas (%)	Teor de Ferro (%)
Alagoas	0,001	54,95
Amazonas	0,249	65,92
Bahia	0,007	56,00
Ceará	0,089	36,69
Distrito Federal	0,004	50,00
Goiás	0,015	50,00
Minas Gerais	66,968	51,53
Mato Grosso do Sul	15,470	55,09
Pará	15,970	67,37
Pernambuco	0,0031	60,62
Rio Grande do Norte	0,004	57,91
São Paulo	1,192	31,91
TOTAL	100,0	54,89

Notas: Reservas medidas e indicadas. Ano base: 2007.

A produção brasileira de minério de ferro em 2008 foi de 350,7 milhões de toneladas, apresentando teor médio de 65,9% de ferro. Essa produção possui um valor de 27,7 bilhões de reais, representando 61,2% do valor da produção mineral brasileira. Quanto ao tipo de produto, a produção se divide em 14,2% de granulados e 85,8% de finos, dentre os quais 58,1% correspondem a *sinter feed* e 27,7% *pellet feed*. Em relação às principais empresas produtoras, destacam-se VALE, Minerações Brasileiras Reunidas – MBR, Samarco Mineração e Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, sendo a VALE responsável por cerca de 62% dessa produção (DNPM, 2009; DNPM, 2010).

Em relação às exportações, em 2008, foram exportadas 231,7 milhões de toneladas de minério de ferro, apresentando um valor FOB (*Free On Board*) de 11,1 bilhões de dólares. Entre os principais países de destino, destacam-se China (36%), Japão (13%) e Alemanha (9%) (DNPM, 2009; DNPM, 2010).

2.3.2 PREÇO

Os preços do minério de ferro são determinados em negociações anuais, através de acordos entre os compradores (usinas siderúrgicas) e vendedores (empresas mineradoras) (DNPM, 2010).

O preço é fixado para um teor de ferro pré-determinado (base 65%) por unidade metálica (1%) em centavos de dólar, em base seca, e em função da granulometria do minério obtido (DNPM, 2009). De modo geral, o preço do minério de ferro é definido em– unidades de ferro por tonelada métrica seca (*dry metric tons unit – dmtu*). Essa medida serve para equiparar os preços de minérios de ferros de diferentes especificações de teor de ferro e umidade (VIDAL, 2008).

Assim, o preço é influenciado por variáveis como custo de lavra, beneficiamento e transporte. Além disso, fatores como tipo de transação, *status* do comprador e condições do mercado também afetam o preço formado. Adicionalmente, é importante ressaltar que podem ser aplicados bônus e penalidades em relação à adequação, ou não, do teor de ferro contido no minério (DNPM, 2009). Portanto, devido à forma de definição de preços acima descrita, o minério de ferro não se adéqua à definição tradicional de *commodity*, sobretudo devido ao fato de não ser negociado em bolsas de mercadorias (PESSOA, 2006).

Conforme se pode observar na Tabela 2.8, o preço do minério de ferro beneficiado (*sinter feed*), foco do presente trabalho, se manteve estável entre 1981 e 2003. No entanto, entre 2003 e 2008, as mineradoras vêm obtendo expressivos aumentos nos contratos de exportação, o que contribuiu para um aumento acumulado de 162% para finos (DNPM, 2009).

Tabela 2.8 – Evolução de Preços do Minério de Ferro – VIDAL(2008), UNCTAD (2011), MONGABAY (2011)

Ano	Sinter Feed (US¢/dm ³ tu)		Ano	Sinter Feed (US¢/dm ³ tu)	
	Real	Nominal		Real	Nominal
1981	70,71	28,10	1996	38,87	28,57
1982	74,13	32,50	1997	38,16	28,88
1983	62,31	29,00	1998	38,36	29,69
1984	54,44	26,15	1999	34,29	26,96
1985	53,00	26,56	2000	34,44	27,67
1986	50,60	26,26	2001	34,82	28,92
1987	46,35	24,50	2002	33,51	28,62
1988	42,89	23,50	2003	35,77	31,04
1989	46,55	26,56	2004	41,07	36,45
1990	51,50	30,80	2005	68,61	62,51
1991	52,75	33,25	2006	78,98	74,39
1992	48,14	31,62	2007	83,78	81,46
1993	41,59	28,14	2008	140,60	100,50*
1994	36,55	25,47	2009	100,00*	77,50*
1995	37,70	26,95	2010	213,00*	161,00*

*Obtidos a partir de gráfico

Partindo-se do preço nominal, em US¢/dm³tu multiplicando-o pelo teor de ferro presente no minério, fixado em 65%, e retirando-se a umidade, considerada como 8%, chega-se ao preço do minério em US\$/tonelada (VIDAL, 2008). Assim, por exemplo, para o preço nominal de US¢ 81,46/dm³tu, com teor de ferro 65% e umidade 8%, obtém-se um preço de US\$ 48,71/tonelada.

A expectativa com relação a preços futuros é de que os minerais e metais permaneçam com os preços acima da média histórica, pois tem se observado um elevado montante de investimentos feitos nesses setores, uma crescente demanda internacional, além da conhecida diminuição das reservas (PESSOA, 2006).

2.4 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO

O processo de beneficiamento tem como objetivo possibilitar a extração e utilização dos bens minerais, sendo a etapa que ocorre após a lavra do minério. Minério pode ser definido como todo agregado natural de minerais, a partir do qual um metal ou composto metálico pode ser obtido, com lucro e em larga escala. Já o mineral-minério, por sua vez, constitui no mineral que contém o metal ou substância útil do minério, como, por exemplo, no caso do minério de ferro, hematita (Fe_2O_3), pirita (FeS_2) e calcopirita (CuFeS_2). Os minerais não aproveitáveis existentes no minério são denominados ganga, como o Quartzo (SiO_2), no beneficiamento de ferro (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

Desse modo, o objetivo do processo de beneficiamento de minério consiste em obter uma relação ótima entre teor e recuperação de mineral-minério, de modo a produzir a maior quantidade possível de um produto que atenda às especificações do mercado. O teor é definido como a massa de um elemento, ou substância pura, em relação à massa total do material, sendo comumente expresso em percentagem. Já a recuperação metálica mede a quantidade do elemento de interesse obtida ao final do processo de concentração, em relação à quantidade existente na alimentação (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

O processo de beneficiamento consiste em uma série de operações unitárias, que visam transformar o mineral extraído das minas em um produto concentrado que atenda as condições de granulometria e teor requeridas (BASTOS JÚNIOR, 2010). Na Figura 2.1 é apresentada uma representação esquemática do processo de beneficiamento mineral.

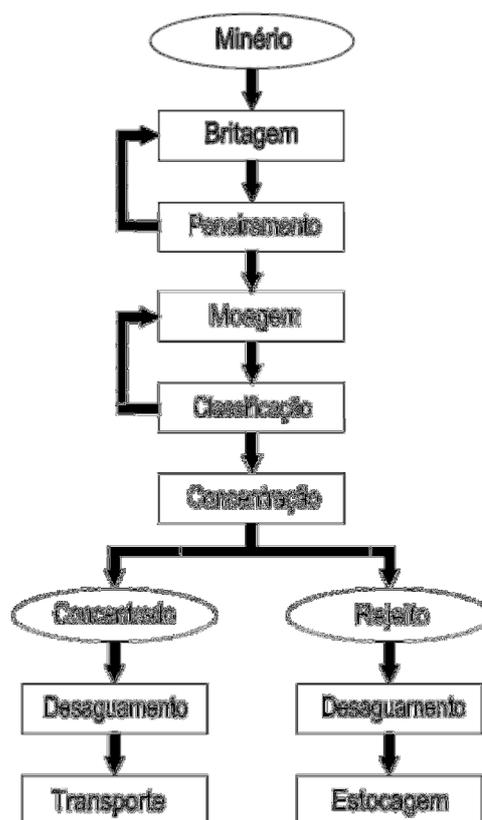


Figura 2.1 – Representação Esquemática do Processo de Beneficiamento Mineral

Nos subitens subseqüentes, são descritas as operações unitárias e auxiliares envolvidas no processo de beneficiamento de minério.

2.4.1 COMINUIÇÃO

Cominuição pode ser definida como o processo pelo qual o tamanho das partículas de minério é progressivamente reduzido até que essas atinjam uma granulometria que permita a separação do mineral-minério pelas operações unitárias subseqüentes. A cominuição visa controlar o tamanho máximo de produto gerado, evitar a geração de grandes quantidades de finos e facilitar o manuseio do material (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES & PERES, 2003; MARTINS, 2008).

Em processos de beneficiamento de minério, o processo de cominuição ocorre através de britagens e moagens, que são descritos nos subitens seguintes.

Adicionalmente, a cominuição costuma ocorrer associada a processos de classificação, de modo a garantir que o produto oriundo da cominuição atenda às especificações de granulometria exigidas (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

2.4.1.1 BRITAGEM

A britagem consiste na primeira operação unitária do processo de cominuição, tendo como principal objetivo a liberação do mineral-minério da ganga a partir de forças de compressão, impacto ou cisalhamento (CHAVES & PERES, 2003). De modo geral, ocorre em via seca, apresentando comumente dois ou três estágios, ocorrendo, em casos especiais, circuitos de até quatro estágios. Britadores primários robustos podem reduzir fragmentos de minério de 1,5 metros para menos de 20 centímetros de largura, enquanto britadores secundários geram partículas de diâmetro entre 0,5 e 2 centímetros (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Entre os principais tipos de britadores primários, destacam-se o tipo mandíbula, giratório e de impacto (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

Os britadores secundários visam diminuir a granulometria do minério de forma a obter diâmetros adequados para a alimentação da moagem. Como principais tipos de britadores secundários destacam-se os britadores tipo cone, de mandíbulas ou giratório (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

Além disso, o sistema pode também apresentar britadores terciários ou, até mesmo, quaternários. Nesses casos, são utilizados os mesmos equipamentos utilizados na britagem secundária com a diferença de que a faixa de especificação granulométrica é mais bem definida, sendo o material gerado mais homogêneo (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES & PERES, 2003).

2.4.1.2 MOAGEM

A moagem consiste no último estágio do processo de cominuição, sendo a granulometria do minério reduzida de valores entre 5 e 250 milímetros para diâmetros na faixa de 10 a 300 micrômetros (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Os minérios podem ser processados tanto em via seca quanto em polpa. Geralmente, o processamento em via úmida é recomendado devido à maior facilidade de transporte e dissipação de calor, resultando em uma maior eficiência energética. Adicionalmente, a moagem em polpa inibe a formação de poeira, não sendo necessários gastos com sistemas auxiliares para abatê-la. No entanto, a moagem a úmido acarreta um maior consumo de corpos moedores e gera um custo posterior com a retirada de água do produto (CHAVES & PERES, 2003; MARTINS, 2008).

Dentre os principais tipos de moinhos, destacam-se os moinhos de barras e de bolas, que apresentam como corpos moedores, respectivamente, hastes e bolas de aço. Além disso, podem também ser utilizadas pedras rígidas ou até mesmo o próprio minério. Moinhos que utilizam o próprio minério como carga circulante são denominados autógenos, enquanto moinhos que usam tanto minério como outros corpos são denominados semi-autógenos (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Do ponto de vista energético, a operação unitária de moagem apresenta o maior consumo de energia. No entanto, a granulometria obtida na moagem é de fundamental importância para uma maior eficiência das operações posteriores do processo. Dessa forma, deve ser buscado o ponto ótimo da moagem, que permite obter um grau adequado de liberação sem incorrer em um gasto desnecessário de energia (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES & PERES, 2003).

2.4.2 PENEIRAMENTO

O peneiramento trata-se de um método de análise e classificação de partículas bastante tradicional, consistindo no processo de classificação do minério, a partir do tamanho das partículas, em duas ou mais frações, através de uma ou mais superfícies perfuradas (CHAVES & PERES, 2003). O processo de peneiramento pode ser conduzido a úmido ou a seco, sendo geralmente agitado, de forma a permitir um melhor assentamento das partículas (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

A operação unitária de peneiramento é utilizada tanto para analisar a granulometria do minério presente no processo, quanto para servir de corte para as partículas que necessitem de ser novamente cominuídas (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

Os equipamentos de peneiramento podem ser divididos entre estacionários e móveis. Dentre os estacionários, destacam-se a grelha fixa e as peneiras tipo DSM (“*Dutch State Mines*” ou Minas de Estado Holandeses, local onde esse tipo de peneira foi inicialmente desenvolvido). Já as peneiras móveis mais utilizadas tratam-se das grelhas, peneiras vibratórias e rotativas (CHAVES & PERES, 2003).

2.4.3 CLASSIFICAÇÃO

A classificação consiste na separação de uma população original, denominada alimentação, em duas ou mais populações que se diferem pela distribuição relativa dos tamanhos das partículas constituintes. Após a classificação, a alimentação é dividida em duas partes: uma composta predominantemente pelas partículas de maiores diâmetros, denominada *underflow*; outra população formada pelas partículas mais finas, chamada de *overflow* (CHAVES, 2002).

De modo geral, a classificação a úmido é utilizada para minérios bastante finos, que não conseguiriam ser eficientemente separados a partir do peneiramento. Além disso, os processos de classificação encontram-se associados à cominuição, separando as partículas que devem seguir para a operação seguinte, daquelas que devem recircular para a etapa anterior do processo (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Os tipos de classificadores podem ser divididos de acordo com a direção de fluxo da corrente carregada. Os classificadores horizontais, como, por exemplo, os mecânicos e os espirais, geralmente apresentam como força motriz a sedimentação livre, sendo mais acurados para partículas com diferentes tamanhos. Já os classificadores verticais, predominantemente hidráulicos se baseiam na sedimentação impedida, sendo mais eficientes para minerais com diferentes valores de densidade (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

Entre os equipamentos de classificação, destacam-se ainda os hidrociclones. Nesses dispositivos, utiliza-se a força centrífuga para acelerar a taxa de sedimentação das partículas, de forma que a operação ocorra de forma contínua. Geralmente, os hidrociclones são utilizados como classificadores associados a circuitos fechados de britagem, apresentando uma elevada eficiência na separação de finos, podendo ser também utilizados em outros processos, como no espessamento (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES, 2002).

2.4.4 CONCENTRAÇÃO

O processo de concentração é a etapa que segrega os grãos de ganga do mineral minério, visando recuperar os minerais úteis, contidos no minério, com o mínimo possível de perdas para o rejeito (BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Para se obter uma concentração eficiente, o processo deve satisfazer três condições básicas: liberalidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica (SILVA, 1973 apud CHAVES, 2006). A liberação consiste na individualização das partículas a serem processadas, devendo ser garantida pelas etapas de cominuição e classificação. A separabilidade mecânica está relacionada com os equipamentos, que compõem um mecanismo de forças capaz de atuar de formas distintas nas diferentes partículas, promovendo a separação. Já a diferenciabilidade se caracteriza pela existência de uma propriedade físico-química diferenciadora, natural ou induzida, que permita diferenciar o mineral minério da ganga (CHAVES, 2006; MARTINS, 2008; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Dessa forma, a escolha do método de concentração depende da natureza e das propriedades do minério. Dentre as principais formas de concentração, se destacam concentração gravítica, concentração magnética e flotação (MARTINS, 2008; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

2.4.4.1 CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

Na concentração gravítica, partículas de diferentes densidades são separadas por ação da força da gravidade ou por outras forças, como a resistência ao movimento em um fluido. Dessa forma, para uma separação efetiva, é necessária a existência de um fluido com densidade intermediária entre o mineral e a ganga (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Dentre os principais equipamentos de concentração gravítica, destacam-se jigues, concentradores espirais, mesas vibratórias e cones, sendo os dois primeiros os mais utilizados no beneficiamento de minério de ferro (BASTOS JÚNIOR, 2010b).

2.4.4.2 CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA

A concentração magnética consiste na aplicação de um campo magnético convergente sobre partículas de diferentes afinidades magnéticas, de modo a gerar diferentes trajetórias que possibilitem a separação das espécies minerais (BASTOS JÚNIOR, 2010b). Pode ser utilizada tanto para retirar minerais valiosos de uma ganga não magnética, quanto para retirar ganga, ou outros minerais magnéticos, de um material não magnético de interesse (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Portanto, a concentração magnética é amplamente utilizada na concentração do minério de ferro, uma vez que o ferro apresenta propriedades magnéticas bastante diferentes do quartzo, que é a ganga mais encontrada nesse minério (BASTOS JÚNIOR, 2010b). Além disso, a concentração magnética é bastante útil para a extração de peças de ferro que são conduzidas junto com o minério, como, por exemplo, dentes de britadores e outras ferramentas, servindo assim como proteção para as operações subseqüentes. Adicionalmente, a concentração magnética é mais utilizada, em detrimento à concentração gravítica, em processos que operam com faixas granulométricas estreitas (MARTINS, 2008).

Em relação ao meio, o processo de concentração magnética pode ocorrer a seco ou a úmido. Já em relação às características do campo de indução, os concentradores magnéticos podem ser de baixa ou alta intensidade (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008). Dentre os concentradores magnéticos de alta intensidade, o mais

utilizado na concentração do minério de ferro trata-se do concentrador Jones, capaz de concentrar grandes massas de minério, com alta recuperação, mesmo para frações ultrafinas. Já entre os de baixa intensidade, destaca-se o concentrador de tambor. No entanto, independentemente do tipo de concentrador, as principais variáveis de operação são as condições da alimentação, o campo magnético e o tempo de exposição das partículas (MARTINS, 2008; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

2.4.4.3 FLOTAÇÃO

A flotação pode ser definida como um processo de separação de minerais em uma polpa ou suspensão aquosa, realizado a partir da diferença de características das superfícies dos minerais envolvidos. Com a adição de bolhas ao sistema, uma fração das partículas minerais, de polaridade similar à da bolha, é carregada, preferencialmente para a superfície, enquanto a fração restante se dirige para o fundo do reator (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES, 2006; MARTINS, 2008; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Portanto, diferentemente das concentrações gravítica e magnética, a flotação é um processo que se baseia nas propriedades químicas das espécies envolvidas, que permite beneficiar minérios de baixo teor, sendo necessários diferentes tipos de reagentes para que uma boa eficiência seja garantida (BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Os dois tipos de equipamentos utilizados na flotação são as colunas e as células de flotação. Em ambos os casos, a polpa, já previamente tratada com os reagentes para induzir a diferenciabilidade, é introduzida pela parte superior do reator, seguindo um fluxo descendente, por gravidade, enquanto entra em contato com as bolhas de ar, em contracorrente. Portanto, mesmo com as diferenças, ambas apresentam o mesmo princípio de operação, sendo as colunas mais comumente

utilizadas para a flotação de finos e as células para a flotação de grossos (BASTOS JÚNIOR, 2010b).

2.4.4.4 ESTÁGIOS DE CONCENTRAÇÃO

De modo geral, o processo de concentração costuma ocorrer em mais de um estágio, com o intuito de otimizar o teor e a recuperação de mineral minério obtido, ao permitir que esse tenha mais de uma oportunidade de seguir para o concentrado (CHAVES, 2002; BASTOS JÚNIOR, 2010b).

Uma operação padrão de concentração costuma apresentar os seguintes estágios típicos, conforme se pode notar na Figura 2.2:

- *Rougher* (Desbaste): trata-se do primeiro estágio da concentração, apresentando uma alta porcentagem de sólidos. O concentrado e o rejeito desta etapa seguem, respectivamente, para os estágios Cleaner e Scavenger;
- *Scavenger* (Recuperação): estágio alimentado com o material de rejeito dos outros estágios. O rejeito deste estágio gera o rejeito final, enquanto o concentrado re-alimenta o Rougher. O principal objetivo deste estágio é minimizar o teor de ferro no rejeito;
- *Cleaner* (Limpeza): recebe o material previamente concentrado nos outros estágios, visando obter um concentrado com um maior teor do mineral-minério (CHAVES, 2002; BALTAR, 2008 *apud* BASTOS JÚNIOR, 2010).

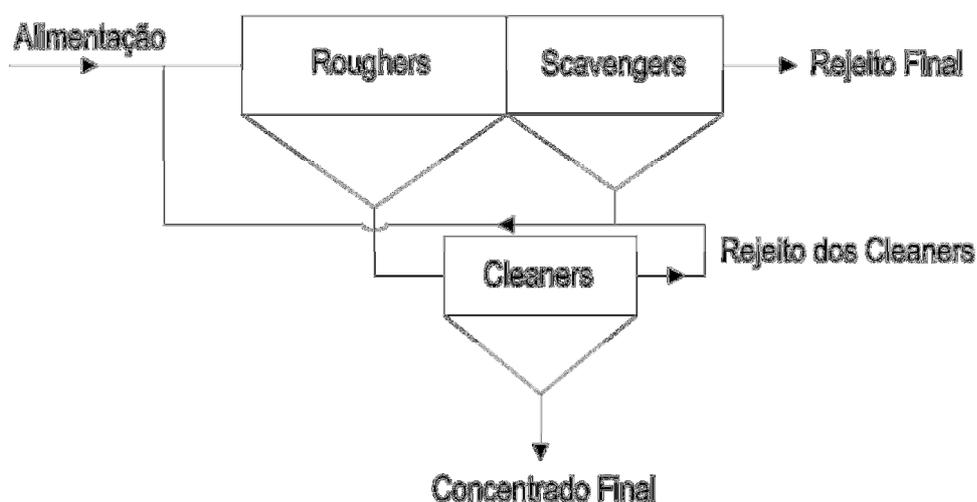


Figura 2.2 – Estágios de Concentração - adaptada de WILLS & NAPIER-MUNN (2006)

2.4.5 DESAGUAMENTO

De forma geral, os processos de beneficiamento mineral envolvem o uso de uma grande quantidade de água, de modo que o mineral de interesse encontra-se presente em uma polpa diluída. Torna-se, então, necessário o desaguamento dessa polpa, com o intuito de facilitar o armazenamento e transporte de produtos e rejeitos, além de adequar a umidade desses às condições de especificação requeridas. Adicionalmente, a operação de desaguamento é importante por permitir o reaproveitamento de água de processo, diminuindo tanto custos quanto impacto ambiental (CHAVES, 2004; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Dentre os equipamentos de desaguamento, pode-se citar peneiras vibratórias, peneiras DSM, classificadores espirais, cones desaguadores, ciclones desaguadores, pilhas e silos de drenagem. Os equipamentos mais extensamente utilizados consistem nos espessadores e nos filtros, sendo esses operados geralmente a vácuo (CHAVES, 2004).

2.4.5.1 ESPESSAMENTO

O espessamento consiste em uma operação de separação sólido líquido, que apresenta como principais funções a recuperação de água de polpas de rejeitos ou concentrados, o aumento da concentração de sólidos nas polpas de rejeitos e o adensamento do material para valores adequados às operações subseqüentes (CHAVES, 2004; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

No entanto, os espessadores apresentam a desvantagem de ocupar uma área significativamente maior que os outros métodos de desaguamento, além de possuírem um elevado custo de capital para a implantação devido à grande quantidade de materiais envolvidos em sua construção (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

É importante atentar que não se deve permitir o acúmulo de material espessado no interior do espessador e, muito menos, utilizá-lo como local de estoque. O uso indevido de espessadores costuma levar a problemas operacionais e à necessidade de paradas para limpeza, o que acarreta perdas tanto de material quanto de produção (CHAVES, 2004).

2.4.5.2 FILTRAGEM

A filtragem consiste em uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em um líquido, ocasionada pela retenção das partículas sólidas em um meio poroso, enquanto esse é atravessado pelo líquido. O material sólido retido no filtro é denominado torta, enquanto o líquido passante constitui o filtrado. Dessa forma, os filtros devem ser capazes de, simultaneamente, suportar a torta e permitir a

passagem do filtrado (CHAVES, 2004; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; CHAVES, 2004; MARTINS, 2008).

A pressão se constitui em uma importante força motriz do processo de filtração. A filtração a vácuo trata-se do tipo mais comumente usado em tratamento de minérios, consistindo na formação de vácuo debaixo do meio filtrante, facilitando assim a passagem do filtrado pelo meio poroso (CHAVES, 2004).

Entre os principais equipamentos de filtração utilizados na mineração, destacam-se os filtros de discos, de mesa (horizontal), tambor e correia. O tipo mais utilizado costuma ser o filtro de discos, uma vez que esse apresenta custos de aquisição e operação inferiores aos dos demais modelos, além de apresentar uma elevada relação entre área filtrante e área ocupada. Entretanto, para esse tipo de filtro, as polpas devem ser homogêneas e não obstruírem a tela de filtração (CHAVES, 2004; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006; MARTINS, 2008).

2.4.6 MANEJO DE MATERIAIS

O transporte e a estocagem de materiais constituem uma operação auxiliar imprescindível no processo de tratamento de minérios. Essas operações estão presentes durante todas as etapas, desde a extração em mina até a disposição dos rejeitos e transporte dos produtos. Dessa forma, o manuseio de materiais engloba tanto produtos sólidos secos, quanto polpas de minérios (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). O transporte e armazenamento de sólidos e líquidos são descritos a seguir.

2.4.6.1 TRANSPORTE DE LÍQUIDOS

Na mineração, a principal forma de transporte de fluidos consiste no bombeamento, sendo esse método utilizado tanto no transporte de água quanto de polpa. No entanto, deve-se ressaltar que tanto a bomba quanto a tubulação correspondente apresentam características diferentes para cada um desses fluidos. Para sistemas de bombeamento de polpa, os constituintes da bomba devem ser robustos, apresentando revestimento de material resistente à abrasão, enquanto a tubulação deve ser especificada com uma sobre-espessura correspondente ao desgaste previsto. Dessa forma, o ato de girar a tubulação em 90° ao longo de sua vida útil constitui em prática operacional bastante disseminada, que visa distribuir o desgaste sofrido pela tubulação, que ocorre preferencialmente na superfície inferior do tubo. Adicionalmente, é importante destacar que tubulações de transporte de polpa estão sujeitas a entupimento, sobretudo em curvas, sendo os tubos, dessa forma, flangeados, com o intuito de facilitar a desmontagem da tubulação para desentupi-la (CHAVES, 2002; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Já para transportes de médias e longas distâncias, os minerodutos vêm ganhando crescente importância na indústria mineral, por se tratarem de um modo de transporte econômico e confiável em relação às formas convencionais de transporte de sólidos. Entre as principais vantagens dos minerodutos, além da alta confiabilidade, destaca-se o pequeno impacto ambiental causado. No entanto, minerodutos demandam um elevado investimento inicial e são inflexíveis em relação à origem e destino, não podendo ter o trajeto alterado após a construção. É interessante ressaltar que os minerodutos são bastante disseminados, em especial no território brasileiro, devido à grande extensão territorial aliada à ineficiência das redes de transporte convencionais (CHAVES, 2002).

2.4.6.2 TRANSPORTE DE SÓLIDOS

No transporte de produtos sólidos, tais como minérios brutos e concentrados secos, os principais meios utilizados são correias transportadoras, carregadeiras, caminhões, empilhadeiras e retomadoras.

Para o transporte de sólidos entre diferentes etapas do processo produtivo, são geralmente utilizadas correias transportadoras, que são guiadas e suportadas por roletes (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Além das correias tradicionais, destacam-se os transportadores tipo tubular, na qual a correia, inicialmente aberta, se enrola sobre sua própria estrutura; tipo fechado, sendo o sólido conduzido dentro de uma correia com as extremidades fechadas; e sanduíche, na qual uma esteira se desloca sobre a outra, comprimindo o sólido. Por fim, é comum a interligação das correias transportadoras com balanças integradoras, com o intuito de quantificar a vazão e permitir a totalização da produção (BASTOS JÚNIOR, 2010a).

Além disso, no transporte de sólidos, estão também envolvidos equipamentos denominados chutes ou desviadores de fluxo, que constituem uma parte fundamental do sistema de transporte. Os chutes são responsáveis pela transferência do minério entre correias transportadoras, direcionando a queda e impedindo perdas de material no transporte (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Um problema comum associado aos chutes consiste no entupimento desses, que pode ocasionar a parada das correias transportadoras e, conseqüentemente, de toda a planta. Com o intuito de minimizar tal problema, são utilizados canhões de ar, também chamados de *blasters*, que direcionam disparos de ar comprimido nos pontos de acúmulo de materiais dentro do chute (BASTOS JÚNIOR, 2010a).

No processo de lavra, após o desmonte ocasionado por perfuratrizes e explosivos, são utilizadas escavadeiras e carregadeiras para retirar o minério. Alternativamente, quando o desmonte não necessita de explosivos, a escavação e transporte são feitos com o uso de tratores. Após essa etapa, a fração rejeitada, ou seja, o estéril é então disposto em pilhas, enquanto o mineral-minério é transportado em caminhões fora-de-estrada para silos, que abastecerão a britagem primária. Após a cominuição, o minério é estocado, com empilhadeiras (*stackers*), em pilhas de homogeneização, das quais será posteriormente retirado com o uso de recuperadoras (*reclaimers*) (BASTOS JÚNIOR, 2010a).

Finalmente, um dos principais problemas operacionais associados ao manuseio de materiais secos consiste na inevitável formação de poeiras. Dessa forma, existem diversas formas de controle que visam minimizar a geração e propagação de poeiras, como, exemplo, o alinhamento das pilhas com os ventos predominantes, a criação de barreiras naturais ou artificiais e o enclausuramento da pilha. Adicionalmente, pode-se utilizar a técnica de aspensão de água, contendo ou não reagentes ligantes, visando o abatimento do pó gerado. Outra técnica bastante utilizada para minimizar a formação de poeira consiste no uso de chutes especiais, como os espirais, em cascata ou telescópicos (BASTOS JÚNIOR, 2010a).

2.4.6.3 ESTOCAGEM E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Em relação à estocagem de materiais secos, costuma-se utilizar pilhas para grandes volumes de material de maior granulometria, enquanto silos são empregados para menores quantidades de materiais finos.

A disposição de rejeitos vem se tornando mais importante devido ao aumento do consumo de bens minerais e da crescente necessidade de beneficiar minérios com teores mais baixos, o que implica numa maior quantidade de estéril gerado, potencializando os efeitos ambientais. Associada à poluição visual, existe ainda a poluição da água ocasionada pelo descarte de água de processo contaminada com sólidos e reagentes (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Dessa forma, com o intuito de minimizar tais impactos ambientais, os sólidos secos são geralmente empregados na recomposição das áreas previamente exploradas, enquanto os rejeitos sob a forma de polpa costumam ser depositados em barragens especialmente projetadas para essa aplicação. Adicionalmente, os rejeitos podem também ser reprocessados com o intuito de aumentar a recuperação de mineral-minério (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

CAPÍTULO 3: PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO

Este capítulo visa conceituar projetos e ciclos de vida, dando enfoque especial para a metodologia FEL (*Front-End Loading*). Posteriormente, o tema eficiência energética é abordado, explicitando sua importância econômica e ambiental. Por último, são destacadas as principais ações de eficiência no processo de beneficiamento mineral.

3.1 PROJETOS: DEFINIÇÃO E CICLO DE VIDA

O guia PMBOK define projeto como sendo um esforço temporário que visa gerar um produto, serviço ou resultado exclusivo. O caráter temporário significa que projetos apresentam início e fim definidos, sendo o projeto encerrado, de modo geral, quando os objetivos são atingidos. A exclusividade dos entregáveis constitui a singularidade de cada projeto, o que, juntamente com o caráter temporário, diferencia os projetos das operações rotineiras de uma organização (PMI, 2008).

Através de projetos, as organizações são capazes de executar atividades que não se englobam em seus limites operacionais normais. Além disso, as rápidas mudanças na tecnologia e na demanda do cliente têm tornado o trabalho menos rotineiro, contribuindo para o aumento do número de projetos. Dessa forma, os projetos constituem parte essencial do planejamento estratégico de uma organização, podendo visar desde adequações a requisitos legais, como, por exemplo, ambientais, até atividades de pesquisa e desenvolvimento (PMI, 2008; CARVALHO, 2010; LUECKE, 2010).

Com o intuito permitir um melhor controle gerencial, os projetos costumam ser divididos em fases, constituindo o ciclo de vida do projeto. O ciclo de vida representa as etapas que devem ser seguidas desde o início de um projeto até o seu término, sendo de fundamental importância para o sucesso do projeto. Um projeto é realizado com sucesso quando consegue respeitar a chamada restrição tripla, balanceando os limites de escopo, tempo e custos definidos, além de seguir os padrões de qualidades desejados (PMI, 2008).

Em muitas organizações, é comum existir um conjunto de ciclos pré-definidos, que são utilizados na maioria dos projetos executados, enquanto, em outras empresas, a equipe de gerenciamento apresenta liberdade para escolher o ciclo que se adequar melhor ao projeto (PMI, 2008). De modo geral, o setor de Engenharia apresenta projetos semelhantes em relação à natureza e aplicação, o que, com o aprendizado adquirido ao longo de inúmeros projetos, culminou na adoção de um ciclo de vida preferencial, no caso, o ciclo definido pela metodologia FEL (*Front-End Loading*) (CARVALHO, 2010).

3.2 METODOLOGIA FEL (FRONT-END LOADING)

A metodologia FEL (*Front-End Loading*) foi desenvolvida pelo IPA (*Independent Project Analysis*), organização criada em 1987, sendo especializada em avaliação e gerenciamento de projetos de capital. O FEL consiste em um processo bastante utilizado em projetos de mega empreendimentos, também chamados de projetos de capital, empregado, sobretudo, nos setores de mineração, energia e petroquímica. Essa metodologia apresenta um processo para o desenvolvimento de projetos baseado em uma adequada e gradual definição do empreendimento, visando minimizar riscos de investimentos em projetos inviáveis e potencializar o

alinhamento desses projetos com o planejamento estratégico das organizações (CHOMA, 2010; CARVALHO, 2010; IPA, 2011).

Dessa forma, a metodologia FEL consiste em uma importante ferramenta de gerenciamento de projetos e de portfólios, sendo capaz de estruturar e sistematizar as fases de desenvolvimento, contribuindo para o aumento da qualidade dos projetos efetuados (IPA, 2011). Além disso, o FEL auxilia na definição do escopo e na geração de um planejamento detalhado, que visa minimizar possíveis retrabalhos e mudanças que possam ocorrer durante a fase de execução do projeto (SILVA, 2007; LIMA, 2008).

Adicionalmente, é importante ressaltar que os estudos envolvendo a metodologia FEL são atualmente escassos, de forma que esse campo se constitui como uma grande oportunidade de pesquisas (MORAES, 2010).

De acordo com a metodologia FEL, o ciclo de vida de um projeto divide-se em três fases: desenvolvimento, execução e operação. Já a fase de desenvolvimento, por sua vez, é dividida em três etapas: análise do negócio (FEL 1), desenvolvimento do escopo (FEL 2) e planejamento da implantação (FEL 3). As transições entre os estágios são denominadas *gates* ou portões de passagem, consistindo nos pontos de tomada de decisão nos quais o projeto pode ser aprovado para a fase seguinte, retornado para melhor definição, arquivado ou ainda cancelado (CHOMA, 2010; CARVALHO, 2010; IPA, 2011). O objetivo do estabelecimento de portões de aprovação consiste em garantir que o nível de planejamento e maturidade do projeto esteja de acordo com a expectativa, de forma que possam ser investidos mais recursos em seu prosseguimento (LIMA, 2008).

Para definição sobre a continuidade, ou não, do projeto, são analisados os seguintes fatores:

- Fatores do local: localização do empreendimento e dos equipamentos, exigências legais, ambientais e de segurança;
- *Status* de Engenharia: qualidade da documentação de engenharia, aceitação do projeto pelos *stakeholders* e estimativas de custos;
- Plano de Execução do Projeto: estratégias de contratação, qualidade do cronograma, procedimentos de controle e plano de implantação (SANTIAGO *et al.*, 2008; TAPIA, 2010; CHOMA, 2010).

O desenvolvimento e implementação de projetos, utilizando a metodologia FEL, consiste em um processo longo e contínuo (MORAES, 2010), sendo apresentado na Figura 3.1.

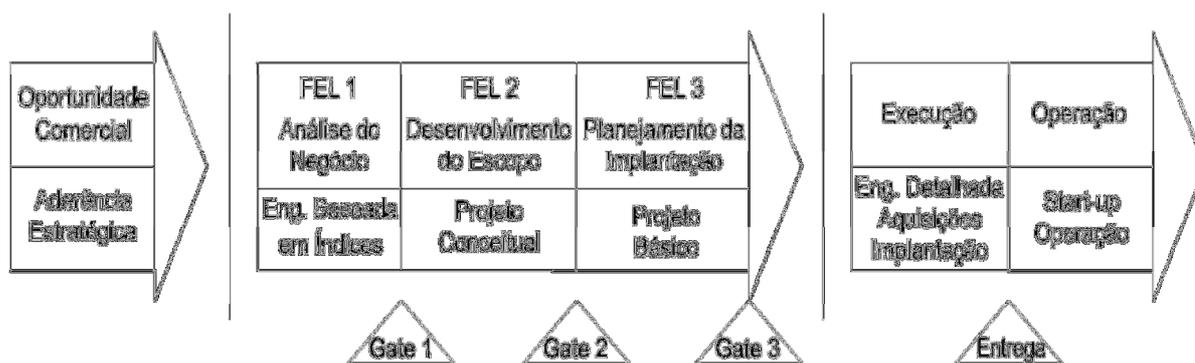


Figura 3.1 – Ciclo de Vida de Projeto – Metodologia FEL - adaptada de SILVA (2007); SANTIAGO *et al.* (2008)

A título de ilustração, é importante ressaltar que, de modo geral, 75% dos projetos não passam do primeiro portão, 50% não passam do segundo, enquanto apenas 1% dos projetos é barrado no terceiro *gate* (SILVA, 2007; CHOMA, 2010). A seguir,

serão descritos os três estágios da fase de desenvolvimento, além das fases de execução e operação.

3.2.1 ANÁLISE DO NEGÓCIO (FEL 1)

A análise do negócio corresponde à etapa inicial do ciclo de vida do projeto, consistindo em identificar, desenvolver e avaliar a oportunidade de investimento, garantindo o alinhamento com as estratégias definidas pela organização (LIMA, 2008). Para isso, além de um cronograma macro contendo os principais marcos (*milestones*) do projeto, deve ser apresentada uma avaliação técnica preliminar do escopo, geralmente feita a partir de Engenharia Baseada em Índices, que consiste na comparação com outros projetos similares. Adicionalmente, devem também ser estimados os custos envolvidos no projeto, sendo aceita uma margem de tolerância de -25 a +40% de imprecisão (SILVA, 2007; MORAES, 2010; IPA, 2011). É importante ressaltar que, paralelamente aos custos, devem ser também estimados os potenciais de ganho, com o intuito de promover uma avaliação econômico-financeira do projeto (CARVALHO, 2010; IPA, 2011).

Entre as principais atividades do FEL 1, destacam-se a criação de valor a partir da identificação de novos negócios, o estudo e previsões sobre o mercado, a identificação de tecnologias e alternativas a serem utilizadas no decorrer do projeto, a declaração dos objetivos, a definição do escopo inicial do projeto e o planejamento da etapa de FEL 2 (SANTIAGO *et al.*, 2008; LIMA, 2008; TAPIA, 2010).

3.2.2 DESENVOLVIMENTO DO ESCOPO (FEL 2)

A etapa de desenvolvimento do escopo é iniciada com a definição da equipe de projeto, que será responsável por desenvolver os objetivos do projeto e o escopo das alternativas identificadas na etapa FEL 1, visando atender a necessidade do negócio (TAPIA, 2010; IPA, 2011). O principal objetivo do FEL 2 consiste na definição da alternativa capaz de maximizar o valor do empreendimento para a organização, garantindo um projeto técnica e economicamente viável (SILVA, 2007; LIMA, 2008).

Além disso, a equipe de projeto deve balizar a escolha da alternativa, com documentos que comprovem a escolha tomada e permitam a continuidade das próximas fases. Entre a documentação a ser gerada, destacam-se os documentos de Engenharia Conceitual, além da clara definição dos objetivos do projeto e de uma estimativa de custos mais apurada, com -25% a + 25% de incerteza (MORAES, 2010; TAPIA, 2010). O término da etapa de FEL 2 é marcado quando, após a seleção da alternativa a ser seguida, os patrocinadores do projeto decidem investir no detalhamento desse, desenvolvendo um cronograma mais detalhado e aprimorando as estimativas de custos e ganhos (CARVALHO, 2010; IPA, 2011).

Dentre as principais etapas da fase FEL 2, destacam-se a elaboração de múltiplas alternativas, a escolha da melhor alternativa a ser desenvolvida na etapa seguinte, elaboração de documentação de engenharia, análise de saúde, segurança, meio-ambiente e riscos, além do refinamento da avaliação econômica e do planejamento das etapas subseqüentes (SILVA, 2007; SANTIAGO, 2008; LIMA, 2008; TAPIA, 2010).

3.2.3 PLANEJAMENTO DA IMPLANTAÇÃO (FEL 3)

Durante o FEL 3, a alternativa selecionada na etapa de FEL 2 é aprofundada, visando planejar a execução do empreendimento, a fim de garantir o cumprimento dos objetivos do projeto. Dessa forma, deve ser desenvolvida toda a documentação preliminar para a execução do projeto, desde especificação de equipamentos até diagramas de engenharia, o que gera a necessidade do aumento da equipe do projeto (SILVA, 2007; CARVALHO, 2010). Assim, as características de custo e prazo da fase de execução podem ser refinadas, sendo aceitáveis variações de -20% a +20% nessas estimativas (IPA, 2011). O FEL 3 é finalizado quando o projeto é oficialmente autorizado e os recursos necessários são destinados à equipe, para que as etapas de engenharia detalhada e execução possam ser seguidas (CARVALHO, 2010).

Como principais etapas de FEL 3, pode-se citar a revisão dos documentos de Engenharia Conceitual, a elaboração de documentação de Engenharia Básica, a definição completa do escopo e do estudo de viabilidade técnico-econômica, a compra de equipamentos críticos, a finalização da análise de saúde, segurança, meio-ambiente e riscos, além do planejamento da execução do projeto (SILVA, 2007; SANTIAGO, *et al.*, 2008; LIMA, 2008).

3.2.4 EXECUÇÃO

De acordo com a metodologia FEL, a fase de execução contempla desde o início da Engenharia Detalhada até o final da implantação do empreendimento. A engenharia detalhada contempla, a partir de informações resultantes do projeto básico e de desenhos de fornecedores, a elaboração de todos os documentos e o planejamento de atividades que permitam a completa execução da implantação e operação dos

itens envolvidos no projeto. O término da fase de execução consiste no término físico do projeto, no qual ocorre a transferência de responsabilidades entre a equipe de projeto e a equipe de *start-up* (SILVA, 2007; CARVALHO, 2010).

3.2.5 OPERAÇÃO

A operação engloba as atividades de *start-up*, que compreendem desde a conclusão da implantação física, com o respectivo comissionamento, até a operação do sistema em regime permanente. Paralelamente à entrada do sistema em regime permanente ocorre a desmobilização de parte da equipe, até que restem apenas os responsáveis pela operação assistida. A operação assistida consiste na transição gradual do produto gerado pelo projeto entre a empresa contratada e o cliente. Além disso, deve ser também efetuado *as-built* do projeto, que consiste na adequação dos documentos gerados à situação realmente implantada, de forma a garantir a confiabilidade da documentação entregue (CARVALHO, 2010).

3.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Atualmente, as preocupações sobre a escassez e a possibilidade de esgotamento de fontes não renováveis de energia estão contribuindo para a disseminação da importância do uso sustentável dos recursos energéticos.

Além disso, restrições ao uso indiscriminado de tecnologias convencionais vêm crescendo mundialmente, devido ao maior conhecimento de suas conseqüências ambientais, como o aquecimento global ocasionado pelo efeito estufa em função da liberação de gases liberados, como, por exemplo, o dióxido de carbono, no processo de queima de combustíveis fósseis e a possibilidade de perda de controle no processo de produção de energia nuclear, tal como ocorreu em Chernobyl, em 1986.

Dessa forma, como tentativa de solucionar tais problemas, formas alternativas de obtenção de energia estão sendo desenvolvidas, além do aumento da consciência sobre a importância da racionalização do uso dos recursos energéticos. No cenário brasileiro, com o intuito de definir estratégias visando mobilizar a sociedade para o uso responsável e eficiente de energia elétrica, o Governo Federal, representado pelo Ministério de Minas e Energia, criou, em 1985, o PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (MARQUES *et al.*, 2007).

Assim, a eficiência energética consiste no uso eficaz e inteligente dos recursos energéticos, visando redução de custos e ganhos sócio-ambientais. Para a sociedade, a diminuição do desperdício de energia gera uma maior disponibilidade, além de permitir que os recursos economizados possam ser destinados para outros fins e contribuir para a diminuição da emissão de gás carbônico. Já para as indústrias, a eficiência energética contribui para reduzir os gastos com insumos energéticos, além de possibilitar ganhos de marketing à empresa, devido à prática de ações sustentáveis (NOGUEIRA, 2007). É importante fazer distinção entre o uso eficiente de energia, ou seja, racionalização e o racionamento. O primeiro consiste no combate ao desperdício, propondo mudanças permanentes de hábitos e processos, além da utilização de novas tecnologias. Já o segundo, por sua vez, consiste apenas em uma limitação temporária de consumo, imposta devido à escassez de energia (NOGUEIRA, 2001; SALUM, 2005).

Assim, sendo as indústrias as maiores consumidoras do mercado energético brasileiro, respondendo por 39,6% do consumo total (BRASIL, 2009), a eficiência energética neste presente trabalho é focada apenas às atividades industriais.

Do ponto de vista industrial, a eficiência energética pode ser definida como a razão entre a saída útil de um processo (ou equipamento) e a energia introduzida nesse (ABEE, 2011). É importante ressaltar que a saída do processo não precisa ser necessariamente medida em termos energéticos, podendo ser utilizadas diferentes grandezas como quantidade produzida e receita obtida (PATTERSON, 1996).

Para isso, ao longo do desenvolvimento deste item, é inicialmente apresentada a metodologia de gerenciamento energético, sendo depois detalhadas as auditorias e, finalmente, estudadas as principais formas de economia de energia.

3.3.1 GERENCIAMENTO ENERGÉTICO

Os gastos energéticos consistem em um dos principais custos de uma indústria, dessa forma seu gerenciamento apresenta uma crescente importância, motivado pela necessidade de redução de custos em um mercado competitivo, além das incertezas sobre a disponibilidade energética e das restrições ambientais. Assim, por se tratar de um tema complexo, devem ser utilizados métodos e técnicas na busca por um melhor desempenho energético, a partir da definição de ações e objetivos concretos, representados por indicadores de desempenho energético (SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007).

Como prática fundamental do processo de gerenciamento energético, deve ser criado um comitê de gestão de energia, que visa aumentar a eficiência de instalações, sistemas e equipamentos, além de avaliar a demanda energética necessária pela indústria, a disponibilidade da energia necessária no mercado e a possibilidade de co-geração. Adicionalmente, deve também propor, implantar e

acompanhar medidas de uso racional de energia, promovendo a conscientização e motivação dos empregados.

É importante ressaltar que a metodologia de gestão energética deve ser apoiada e disseminada por toda empresa, fazendo parte do modelo de gestão corporativa e tendo seus indicadores acompanhados de forma contínua (FURNARI, 1985; SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007).

No entanto, para que um plano de gerenciamento de energia possa ser bem desenvolvido, é necessário conhecer a realidade energética das instalações. Para isso, são realizados diagnósticos e auditorias energéticas.

3.3.2 DIAGNÓSTICO E AUDITORIA ENERGÉTICA

Conforme previamente discutido, o diagnóstico energético constitui uma etapa crucial para se avaliar o uso geral de energia de uma instalação, consistindo na fase inicial de um projeto de eficiência energética. Dessa forma, após um estudo energético superficial, denominado diagnóstico, é realizada uma auditoria energética, que consiste em uma análise mais minuciosa e criteriosa dos pontos abordados no diagnóstico (NOGUEIRA, 2001). Na Figura 3.2 é apresentada uma abordagem genérica a ser utilizada no desenvolvimento de uma auditoria energética.



Figura 3.2 – Etapas de uma Auditoria Energética - adaptada de NOGUEIRA (2001)

Como resultado de uma auditoria energética, deve ser gerado um relatório capaz de compilar o trabalho de levantamento de informações desenvolvido, apresentando os resultados, recomendações e conclusões de uma maneira clara e coerente. Deve ser analisada tanto a situação atual quanto as condições a serem atingidas a partir de projetos posteriores (NOGUEIRA, 2001; SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007). É importante ressaltar a existência de um *trade-off* entre a qualidade e abrangência do estudo energético e a quantidade de recursos gastos, uma vez que a coleta, processamento e análise dos dados requerem esforços significativos (ABEE, 2011).

Dessa forma, durante uma auditoria energética, devem ser analisados os balanços energéticos da planta, além de se estudar os sistemas elétricos, térmicos e mecânicos. Dentre os sistemas elétricos, as principais ações consistem no levantamento da carga elétrica instalada, na análise das condições de suprimento e distribuição, envolvendo estudo do sistema de iluminação e motores elétricos, além

de outros equipamentos que demandem um elevado consumo energético. Em relação aos sistemas térmicos e mecânicos, devem ser avaliados os seguintes sistemas:

- Condicionamento de ar, exaustão e refrigeração;
- Fornos e combustíveis;
- Geração e distribuição de vapor e condensado;
- Bombeamento e tratamento de água;
- Compressão e distribuição de ar comprimido (NOGUEIRA, 2001; MARQUES *et al.*, 2007).

Dessa forma, uma vez realizada a auditoria energética, podem ser planejadas ações de eficiência viáveis técnica e economicamente, que apresentem metas definidas, permitindo a racionalização do uso de energia (NOGUEIRA, 2001; MARQUES *et al.*, 2007; ENGELESCO, 2011). De modo geral, deve-se priorizar a implementação dos itens associados a processos com menores eficiências e que apresentem baixos investimentos para a racionalização energética (NOGUEIRA, 2001). Como o foco do presente trabalho se baseia na atividade mineradora, as principais ações de eficiência energética relacionadas à mineração são apresentadas a seguir.

3.4 AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MINERAÇÃO

No processo de mineração, inúmeras oportunidades de redução de consumo energético merecem ser destacadas. Adicionalmente, quando comparada com outros setores da economia, a mineração apresenta um significativo potencial de

eficiência energética, uma vez que são obtidas grandes reduções de consumo de energia para pequenos montantes de capital investidos (CNI, 2009). As principais ações de eficiência energética em processos minerais estão detalhadas nos próximos subitens.

3.4.1 GESTÃO ENERGÉTICA

De modo geral, ganhos significativos de energia são observados a partir da simples adoção de práticas de gerenciamento energético. Apesar de a gestão energética servir, sobretudo, como base para a implantação de outras ações de redução de consumo, determinadas ações de curto prazo podem gerar reduções significativas nos gastos de energia (MARQUES *et al.*, 2007):

- Conscientização dos colaboradores sobre o desperdício e o uso racional dos recursos, a partir de campanhas e palestras;
- Redução do consumo energético nos horários de ponta;
- Avaliação das demandas contratadas junto à concessionária de energia;
- Utilização de um Sistema de Gestão de Energia, para supervisionar e controlar o consumo de energia do sistema elétrico presente na instalação industrial;
- Implementar uma política de manutenção preventiva, utilizando, por exemplo, sistemas de gestão de ativos e telemetria.

3.4.2 OPERAÇÕES DE COMINUIÇÃO

As operações de cominuição constituem a parte do processo de mineração que necessitam de um maior consumo de energia. É estimado que o custo energético associado à produção de alguns metais atinja valores de cerca de 35% do preço de venda desses (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Adicionalmente, nos Estados Unidos, a energia gasta em processos de cominuição de minerais corresponde a 1% do total de energia elétrica produzida (FUERSTENAU, 2003). Portanto, a busca por melhorias de eficiência energética em operações de cominuição é bastante relevante, sendo as principais ações destacadas abaixo (FURNARI, 1985):

- Em processos de moagem, deve-se efetuar uma escolha adequada dos tipos de corpos moedores e da relação de carga por corpos moedores no moinho;
- Preferencialmente, o tempo de descarga dos moinhos deve ser escolhido a partir da análise do grau, e não do tempo de moagem;
- Evitar o funcionamento de moinhos em vazio (sem carga);
- Para casos de moagem úmida, evitar a diluição excessiva da polpa;
- Dimensionar adequadamente os motores envolvidos no processo de britagem, evitando o superdimensionamento.

3.4.3 EQUIPAMENTOS DE MINA

O processo de mineração envolve vários tipos de equipamentos, conforme previamente mencionado no Capítulo 2. Como principais ações de eficiência energética em equipamentos associados à mineração, destacam-se as listadas a seguir (FURNARI, 1985; SALUM, 2005):

- Seguir as determinações dos fabricantes em relação às condições operação e manutenção;
- Devem ser monitorados os consumos de energia e as condições dos equipamentos;
- Utilizar equipamentos de elevado rendimento e avaliar a substituição de equipamentos antigos, que consumam uma grande quantidade de energia;
- Evitar a sobrecarga dos equipamentos, evitando que esses tenham que ser desligados e, logo em seguida, religados, o que gera um alto consumo energético;
- Para os equipamentos de mina, como as escavadeiras e correias transportadoras, deve ser verificada a existência de períodos de pico ou ausência de carga;
- Verificar a existência de equipamentos superdimensionados;
- Automatizar e controlar processos de tancagem, sobretudo de combustíveis, como o óleo diesel, evitando vazamentos e desperdícios.

3.4.4 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA E DE POLPA

As principais maneiras de se obter uma maior eficiência energética nos sistemas de bombeamento estão compiladas abaixo (VIANA, 2001; CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2005; SALUM, 2005):

- Dimensionar adequadamente o conjunto moto-bomba para a condição de vazão e altura manométrica existente;

- Avaliar o processo verificando se é possível operar com pressões inferiores às comumente utilizadas;
- Eliminar vazamentos em tubulações e acidentes;
- Utilizar diâmetros e trajetos adequados para as tubulações de sucção e recalque, de modo que não haja uma perda de carga excessiva;
- Eliminar a entrada de ar na linha de sucção, evitando a cavitação, que reduz a eficiência volumétrica e a vida útil da bomba;
- Utilizar, sempre que possível, acoplamentos diretos entre o motor e a bomba;
- Operar com as bombas em pontos de melhor eficiência para as condições de vazão e altura manométrica normais;
- Evitar o uso de válvulas para controle de vazão na tubulação de recalque, pois o estrangulamento da tubulação acarreta em um aumento da perda de carga do sistema;
- Avaliar a possibilidade de recirculação de água de processo;
- Realizar a limpeza e manutenção das tubulações e filtros periodicamente, de forma a evitar a perda de energia devido à incrustação.

3.4.5 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

A iluminação responde por uma parcela de 1% do consumo de energia elétrica de uma indústria (YAMACHITA & HADDAD, 2001; MARQUES *et al.*, 2007). Mesmo essa porcentagem sendo relativamente pequena, o montante de energia gasto é bastante elevado, de forma que se torna necessário racionalizar o consumo de energia. É importante ressaltar que essa economia energética não deve incorrer em

uma diminuição da qualidade de trabalho dos colaboradores, de acordo com a norma ABNT NBR-5413 – Iluminância de Interiores (SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007). As principais ações de redução de consumo em sistemas de iluminação estão listadas a seguir:

- Aproveitar, sempre que possível, a iluminação natural, a partir da instalação de telhas translúcidas e janelas amplas;
- Evitar o uso desnecessário de lâmpadas acesas durante o dia, sobretudo em ambientes desocupados;
- Analisar a quantidade de luminárias necessárias para garantir um nível de iluminação adequado;
- Segregar os circuitos de iluminação, permitindo o uso de um circuito de forma independente e por setores;
- Automatizar circuitos de iluminação, a partir de sensores, principalmente em lugares de pouca movimentação;
- Utilizar lâmpadas fluorescentes e reatores eficientes;
- Realizar manutenção adequada, envolvendo a limpeza de luminárias e paredes (SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007).

3.4.6 SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

Com o intuito de garantir o conforto dos colaboradores e, conseqüentemente, aumentar a produtividade, os escritórios costumam contar com sistemas de condicionamento de ar. Além disso, os aparelhos de ar condicionado são extremamente necessários para manter a temperatura adequada para o

funcionamento de alguns equipamentos, tais como servidores e computadores. Dessa forma, os sistemas de ar condicionado são necessários para manter o ambiente de trabalho dentro das condições de ergonomia necessárias, garantindo, por exemplo, condições adequadas de umidade, temperatura e pureza do ar, além de um baixo nível de ruído (PIRANI *et al.*, 2001; SALUM, 2005). As principais formas de eficiência energética para sistemas de condicionamento de ar encontram-se listadas abaixo:

- Utilizar modelos que apresentem o selo de economia de energia Procel/Inmetro;
- Dimensionar adequadamente o aparelho, de acordo com o tamanho do ambiente;
- Proteger a superfície externa do equipamento da incidência direta do sol, mantendo as saídas de ventilação desbloqueadas;
- Isolar adequadamente as tubulações do sistema de condicionamento de ar;
- Desligar o aparelho quando o ambiente for ficar desocupado por um longo período de tempo;
- Manter janelas e portas fechadas durante o funcionamento do aparelho, podendo ser utilizadas molas ou sensores nas portas;
- Minimizar a perda de carga presente nos dutos, a partir da redução da quantidade de acidentes e da utilização de curvas com raio longo;
- Evitar a radiação solar direta no ambiente, a partir do uso de cortinas ou filmes especiais nas janelas;

- Utilizar lâmpadas que liberam uma menor quantidade de calor, como as fluorescentes;
- Realizar a manutenção e a limpeza periódica do aparelho, em especial do filtro (SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007).

3.4.7 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores representam uma parcela significativa de consumo de energia elétrica em qualquer unidade industrial, representando, no cenário nacional, 50% da energia elétrica consumida (SALUM, 2005). Na mineração, são utilizados inúmeros tipos de motores para várias funções, variando desde motores de baixa potência associados a bombas até motores de grande potência para processos de britagem. Dessa forma, os motores são fundamentais para a atividade mineradora, incorrendo em um grande consumo de energia, o que gera a necessidade de práticas de eficiência energética para reduzir esse consumo. Dentre as principais ações, destacam-se (BORTONI & SANTOS, 2001; SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007):

- Dimensionar adequadamente o motor para sua respectiva atuação, evitando o sobredimensionamento;
- Realizar manutenções preventivas periódicas;
- Evitar operar com o motor a vazio, ou seja, quando não há carga no eixo;
- Desligar os motores das máquinas quando essas não estiverem operando;
- Ajustar o motor por meio de inversores de frequência, quando o regime de funcionamento for bastante variável;

- Utilizar motores de alto rendimento, uma vez que esses apresentam perdas reduzidas e maior vida útil;
- Priorizar, quando da compra de novos motores, aqueles que apresentem o Selo Procel/Inmetro de economia de energia.

3.4.8 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR

Uma forma alternativa de geração de energia consiste no uso de sistemas de aquecimento solar. De modo geral, em uma unidade de mineração, essa forma de obtenção de energia é bastante utilizada para o aquecimento de água em refeitórios e vestiários. Embora o uso dessa tecnologia normalmente incorra em uma baixa redução do consumo de energia elétrica, os ganhos associados são facilmente obtidos, merecendo ser analisada. As principais formas de eficiência energética que podem ser aplicadas a sistemas de aquecimento são (SALUM, 2005; COPEL, 2011):

- Dimensionar corretamente o sistema, considerando a vazão adequada e a temperatura desejada;
- Adquirir sistemas solares que apresentem o selo de garantia Procel/Inmetro;
- Verificar se o local de instalação das placas de aquecimento apresenta grande incidência de raios solares;
- Instalar o sistema o mais próximo possível do local de consumo;
- Isolar adequadamente as tubulações de água quente e o reservatório;
- Realizar a manutenção adequada do sistema de acordo com recomendações do fornecedor.

3.4.9 SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Na mineração, o ar comprimido é bastante utilizado como forma de energia no acionamento de instrumentos, além de ser utilizado em canhões de ar (*blasters*) para impedir a obstrução de chutes, silos e desviadores de fluxo. Os custos associados à geração e distribuição de ar comprimido em uma unidade industrial são significativos, o que gera a necessidade de ações que visam aumentar a eficiência do sistema. As principais ações de eficiência energética comumente empregadas em sistemas de ar comprimido estão listadas a seguir (FURNARI, 1985; CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2005; SALUM, 2005; MARQUES *et al.*, 2007; COPEL, 2011).

- Verificar periodicamente a existência de vazamentos no sistema, assim como o desgaste dos componentes;
- Realizar a admissão de ar fora da casa de máquinas, em um ambiente com uma menor temperatura e com ar mais limpo e seco;
- Dimensionar a tubulação e o trajeto de modo a minimizar a perda de carga ao longo do fluxo, evitando acidentes, tais como curvas e reduções;
- Avaliar o tipo adequado de compressor para cada sistema;
- Limpeza e substituição periódica dos filtros, com o intuito de impedir o aumento da perda de carga;
- Avaliar periodicamente os reservatórios, procedendo à drenagem desses;
- Retirar da rede de distribuição os ramais secundários desativados, evitando acúmulo de condensado, vazamentos e perdas de carga;

- Instalação de purgadores automáticos nos pontos mais baixos, para eliminar o condensado existente no sistema;
- Regular a pressão de liga/desliga dos compressores de acordo com as pressões requeridas pelos clientes, buscando sempre operar com a pressão próxima ao limite mínimo definido pelo processo;
- Otimizar o layout do sistema, avaliando a possibilidade de se utilizar um conjunto central, localizado em uma casa de máquinas, ou diversos compressores de menor porte, instalados mais próximos aos pontos de consumo;
- Verificar se o sistema de resfriamento, composto por cooler e aftercooler, está operando de forma satisfatória;
- Aproveitar o calor gerado na compressão como fonte de energia para outros processos.

O estudo de caso a ser realizado neste presente trabalho contempla uma ação de eficiência energética em um sistema de ar comprimido existente em uma mineradora.

CAPÍTULO 4: ENGENHARIA ECONÔMICA

Nos capítulos anteriores, os projetos de engenharia foram apresentados, sobretudo, do ponto de vista técnico, sendo analisados os aspectos tecnológicos de eficiência energética em mineração. No entanto, tais projetos apresentam ainda o aspecto econômico, que também é de extrema importância. De forma geral, quando projetos de engenharia são implantados, espera-se obter retorno financeiro que justifique os recursos investidos, visando criar valor para os acionistas. Desse modo, com o intuito de avaliar diferentes projetos e garantir a viabilidade econômica desses, devem ser empregadas técnicas de engenharia econômica (GRANT, 1982).

A engenharia econômica pode ser definida como os princípios e técnicas necessários para se tomar decisões relativas à aquisição e à disposição de bens de capital, nas indústrias e nos órgãos governamentais (GRANT, 1982). No entanto, pode-se extrapolar essa definição e conceituar a engenharia econômica como o conjunto de conhecimentos necessários à tomada de decisão sobre qualquer tipo de investimento (HESS *et al.*, 1992).

Para desenvolver um estudo de engenharia econômica deve ser utilizado um procedimento analítico, que consiste, inicialmente, na estimativa do montante de capital a ser investido, além das estimativas de ganhos a serem obtidos com a execução do projeto. Assim, posteriormente, pode-se montar o fluxo de caixa do empreendimento, o que permite a avaliação desse segundo técnicas tradicionais de análise de investimentos. Por último, são estudadas técnicas de avaliação de investimentos em condições de incerteza, que permitem certa flexibilidade gerencial.

4.1 ESTIMATIVAS DE INVESTIMENTOS

A primeira etapa de qualquer análise de viabilidade deve iniciar pela estimativa do montante de capital a ser investido para a realização do projeto. De modo geral, conforme defendido pela metodologia FEL e preconizado pelo PMI, as estimativas de investimentos devem ser refinadas ao longo do desenvolvimento do empreendimento, sendo aceita uma maior margem de erro no início da definição de escopo e uma estimativa mais apurada e acurada ao final da fase de detalhamento.

Inicialmente, o montante a ser investido pode ser avaliado a partir da comparação com projetos similares ou ainda a partir apenas do conhecimento dos custos dos principais equipamentos, sendo geralmente admitidos erros de cerca de 30%. Posteriormente, já tendo os principais equipamentos especificados e maiores informações sobre o processo, têm-se condições de efetuar uma estimativa preliminar, com erros de 20%. Por fim, idealmente, ao término da fase de detalhamento, com a elaboração de um quadro de quantidades e preços de materiais, instrumentos e serviços, pode ser efetuada uma estimativa detalhada, na qual o erro aceito é de 5% (PAULA, 1983; PETERS, 1991). Entretanto, conforme preconizado pela metodologia FEL, são admitidos, no detalhamento, erros da ordem de 20%. Adicionalmente, é importante ressaltar a existência de um *trade-off* entre o grau de precisão da estimativa de investimento e os recursos gastos para realizá-la, de modo que deve-se avaliar sempre o nível de refinamento adequado para a estimativa de cada projeto.

4.2 ESTIMATIVAS DE GANHOS

Com o intuito de montar o fluxo de caixa de um projeto, é importante, além de avaliar o montante de investimento a ser despendido, estimar também os ganhos a serem obtidos a partir da realização do projeto. De forma geral, o ganho potencial de um empreendimento costuma advir de duas principais conseqüências desse: alteração no comportamento estatístico das variáveis de interesse e redução da ocorrência de eventos operacionais indesejáveis (FRIEDMANN, 2006 *apud* CARVALHO, 2010).

4.2.1 ANÁLISE BASEADA NO COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO

A primeira etapa associada à análise do comportamento estatísticos das variáveis de processo trata-se da identificação de uma janela de oportunidade, que consiste na margem de melhoria possível para determinada etapa do processo. Assim, quanto maior a janela de oportunidade, maior a possibilidade de se aprimorar esse processo (CARVALHO, 2010). Para a quantificação da janela de oportunidade, foram desenvolvidos diferentes métodos, que são apresentados a seguir.

Segundo o método da variabilidade capaz, a variabilidade total de um processo pode ser decomposta em dois fatores: a variabilidade especial, resultante de fatores externos ou de causas especiais, e a variabilidade natural, também chamada de capaz, oriunda de variações inerentes ao processo. Assim, caso um processo esteja bem controlado, é possível eliminar grande parte das causas especiais, fazendo com que a variabilidade do processo tenda a se aproximar da variabilidade natural. Dessa forma, com uma variabilidade reduzida, pode-se trabalhar com um ponto de operação mais próximo aos limites de especificação ou de segurança, o que consiste em um potencial de ganho para o projeto (SHUNTA, 1995 *apud* CARVALHO, 2010).

Adicionalmente, outro método bastante difundido consiste no *benchmarking*, que se baseia na aprendizagem das melhores experiências da própria empresa (*benchmarking* interno) ou de outras empresas do mercado e estudos teóricos (*benchmarking* externo), e na conseqüente aplicação dessas, buscando níveis de excelência. Dessa forma, a diferença entre o valor médio da organização e o valor padrão (obtido via *benchmarking*) corresponde a uma janela de oportunidade. Como todo método comparativo, o *benchmarking* leva a discussões sobre os valores obtidos, servindo para corrigir problemas sistemáticos, que, anteriormente, eram considerados como uma situação normal do processo. No entanto, deve-se analisar cautelosamente a base de comparação do *benchmarking*, uma vez que, caso as condições básicas de operação e infra-estrutura sejam diferentes, o resultado obtido pode levar a conclusões equivocadas, como um valor de referência inatingível ou a acomodação por ter obtido, mesmo que de forma errônea, um valor superior ao de referência (CARVALHO, 2010).

Por último, outro método também empregado consiste na comparação entre a média recente da variável analisada e a média dessa mesma variável após a eliminação dos piores resultados. Os piores pontos obtidos durante o comportamento da variável ocorrem quando o processo não está bem controlado, de modo que, após a implantação do projeto, esses piores resultados tendem a ser eliminados. Existem boas práticas para a exclusão dos pontos, como, por exemplo, aproximar os dados a uma distribuição normal e eliminar os pontos que estão distantes a mais de um desvio padrão da média, na região de rejeição. No entanto, não existe nenhuma regra padronizada para a análise dos pontos a serem eliminados, o que torna esse procedimento bastante subjetivo. De qualquer forma, por apresentar um tratamento

estatístico relativamente simples, constitui-se em um método bastante difundido para a análise da janela de oportunidade (CARVALHO, 2010).

Após a identificação da janela de oportunidade, deve-se quantificar a melhoria possível de ser obtida dessa janela com a execução do projeto. Muitas vezes, apenas um projeto não é capaz de aproveitar toda a janela de oportunidades, sendo exigidos projetos complementares para fazer com que o direcionador do negócio impactado atinja os níveis requeridos. Dessa forma, torna-se necessária uma análise de sensibilidade, com o objetivo de avaliar o percentual da janela de oportunidade que pode ser obtido a partir da realização de determinado projeto. De modo geral, são utilizados para essa análise tanto métodos matemáticos e estatísticos, como matrizes de variabilidade e correlação cruzada entre as variáveis de processo e o direcionador de negócio, quanto métodos mais subjetivos, com base na opinião de especialistas (CARVALHO, 2010).

Portanto, tendo-se a janela de oportunidade e o percentual dessa que será obtido a partir da implantação do projeto, pode-se estimar o ganho potencial a ser utilizado na construção do fluxo de caixa.

4.2.2 ANÁLISE BASEADA EM EVENTOS DISCRETOS

Esse tipo de estimativa de ganho consiste na avaliação da redução de ocorrência de eventos operacionais indesejáveis durante o processo produtivo. Os eventos a serem impedidos variam desde paradas de planta e equipamentos até acidentes ambientais e operacionais. Para isso, após se conhecer o escopo do processo e o impacto qualitativo que o projeto terá nesse, deve-se inicialmente proceder ao levantamento de dados históricos (CARVALHO, 2010).

No levantamento de dados históricos, devem ser obtidos dados do sistema de gerenciamento de informações da planta, também chamado de PIMS (*Plant Information Management System*). Caso a unidade não possua um sistema automatizado, devem ser obtidos dados dos eventos previamente anotados pelos operadores. Em ambos os casos, os registros devem conter informações sobre a natureza e impacto do evento, os equipamentos envolvidos, a causa atribuída e a data e duração da ocorrência. Assim, a partir do histórico de todos os registros da planta, devem-se selecionar os que serão impactos pelo escopo do projeto, seja de forma direta ou indireta (CARVALHO, 2010).

Feito isso, deve-se buscar separar os eventos selecionados entre os ocasionados por fatores externos e aqueles que poderiam ser evitados com a realização do projeto (CARVALHO, 2010). Desse modo, pode-se, por exemplo, verificar que grande parte dos eventos depende de fatores externos à realização do projeto ou que existe, teoricamente, um considerável potencial de melhorias.

Finalmente, deve-se avaliar o impacto que a implantação do projeto representa na redução da ocorrência dos eventos que podem ser evitados. Mesmo contando com o apoio de especialistas, essa análise é bastante subjetiva, sendo geralmente utilizados fatores obtidos em estudos similares ou ainda fatores considerados conservativos, com certa margem de segurança. Assim, com o percentual de redução da ocorrência, a ser obtido graças à realização projeto, e com a frequência de ocorrência do evento indesejável, pode-se quantificar o ganho. De qualquer forma, devido à facilidade do método e como se deseja apenas uma estimativa do retorno, o grau de imprecisão associado a essa técnica é aceitável (CARVALHO, 2010).

4.3 FLUXO DE CAIXA

O fluxo de caixa consiste em um quadro síntese, que indica as entradas e saídas dos recursos financeiros previstos para um determinado projeto, explicitando os períodos de tempo nos quais esses devem ocorrer. Quase sempre, os fluxos de caixa são discretos, estando receitas e gastos alocadas apenas no início ou no término de cada período. Os investimentos ocorridos ao longo de um período são, por convenção, alocados no início desse período, enquanto os custos operacionais e receitas são considerados como realizados ao final do período em questão (PAULA, 1983; HESS *et al.*, 1992).

Geralmente, em projetos industriais, o intervalo de tempo utilizado é medido em anos, podendo-se, em casos especiais, serem considerados períodos diferentes, tais como semestres ou meses. O número de períodos a serem considerados em um fluxo de caixa é denominado vida útil do projeto (PAULA, 1983). O valor a ser considerado para a vida útil depende da natureza do projeto realizado, sendo, de modo geral, para projetos de mineração, de 10 a 20 anos.

Todo fluxo de caixa deve levar em consideração o valor de dinheiro ao longo do tempo, que faz com que mesmas quantias de dinheiro apresentem valores diferentes no tempo atual e no futuro. O denominado valor temporal do dinheiro ocorre devido aos juros existentes, que podem ser definidos como os retornos obtidos em um investimento de capital. Por definição, a taxa de juros consiste na razão entre o dinheiro obtido no final de um período e o dinheiro investido no início desse mesmo período, sendo o intervalo de tempo geralmente mensal ou anual. Em engenharia

econômica são praticados os juros compostos, ou seja, os juros acumulam-se sobre o montante com o passar dos períodos de tempo (GRANT, 1982; BREALEY, 2008).

4.3.1 INVESTIMENTOS

Em um projeto, os investimentos correspondem a todo capital despendido durante todo o ciclo de vida, incluindo desde estudos técnicos e econômicos preliminares até os equipamentos e partida das instalações produtivas. O investimento total pode ser decomposto em investimento fixo, despesas financeiras durante a implantação e capital de giro (PAULA, 1983).

O investimento fixo, por sua vez, pode ser dividido entre custos diretos e indiretos. Entre os custos diretos, destacam-se a compra e montagem de equipamentos, tubulações, instrumentos, materiais elétricos, entre outros. Já entre os custos indiretos, podem-se citar os gastos administrativos e de supervisão, além de despesas necessárias durante a construção do empreendimento (PAULA, 1983). Freqüentemente, o investimento fixo é avaliado de acordo com os métodos descritos no item 4.1.

Além disso, caso haja a necessidade de se obter capital emprestado para a execução do projeto, devem ser consideradas também as despesas financeiras relativas à amortização desse empréstimo. É importante ressaltar que, em alguns casos, os empréstimos podem possuir um período de carência, durante o qual os pagamentos não são realizados até que o empreendimento esteja em funcionamento (PAULA, 1983).

Adicionalmente, quando necessário, deve ser considerado também o capital de giro, que corresponde aos recursos financeiros necessários para que a empresa possa operar e comercializar seus produtos de forma satisfatória, englobando desde estoques até reservas de caixa necessárias. Esse capital consiste em um complemento de investimento requerido permanentemente, sendo, de modo geral, para mercados não sazonais, considerado como 15% do valor do investimento fixo (PAULA, 1983).

4.3.2 RECEITAS

As receitas são comumente definidas pela multiplicação entre o volume produzido e o preço de venda, para cada um dos bens ou serviços produzidos. O preço de venda pode ser estimado a partir de estudos de mercado ou então, em caso de uma empresa já existente, podem ser empregados os preços de venda vigentes (PAULA, 1983).

Em projetos, as receitas podem ser dadas tanto pelo aumento de produção quanto pela redução de custos ocasionada pela execução desses. No caso especial de projetos de eficiência energética, a redução do consumo de energia elétrica constitui a principal forma de receita, garantindo a viabilidade do projeto.

4.3.3 GASTOS

Os gastos existentes em um projeto podem ser divididos em despesas, que não possuem relação direta com a produção, e em custos, que se dividem entre fixos e variáveis. Entre os principais gastos a serem consideradas em um projeto, deve-se destacar os custos de manutenção e o aumento de custeio ocasionado, por

exemplo, devido ao aumento de recursos necessários para determinada atividade. Adicionalmente, quando aplicável, devem ser considerados também os juros referentes à amortização de empréstimos previamente efetuados. Por fim, é recomendado incluir uma margem de contingência no cálculo dos custos totais, com o intuito de cobrir imprevistos tais como greves, enchentes e flutuações de preços. A margem de segurança geralmente utilizada consiste em 5% do custo total do projeto (PAULA, 1983).

4.3.4 IMPOSTOS

Entre os custos associados à implantação de um projeto, devem-se destacar os impostos relativos aos produtos adquiridos e produzidos, além do imposto que recai sobre os lucros da empresa.

Na aquisição de equipamentos e instrumentos, deve-se sempre atentar para a existência do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), que incide sobre o preço de venda dos produtos. Alguns produtos são isentos de IPI, enquanto sobre outros produtos incidem taxas variáveis, que atingem, como no caso de instrumentos, valores médios de 15% (RECEITA FEDERAL, 2011). No entanto, para efeitos de fluxo de caixa, esse imposto já costuma estar incorporado ao investimento a ser despendido em equipamentos.

Adicionalmente, outro imposto que merece destaque é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que consiste em um imposto estadual calculado com base no valor agregado pelo produto gerado, apresentando percentuais diferentes para cada estado (PAULA, 1983). Além disso, sobre os lucros da

empresa, incorre o Imposto de Renda, que representa, como aproximação, um percentual de 30% (PAULA, 1983; HESS *et al.*, 1992).

4.3.5 DEPRECIAÇÃO

A depreciação consiste na perda de valor sofrida pelos ativos fixos renováveis, como, por exemplo, os equipamentos, com o decorrer do tempo, devido ao desgaste causado pelo uso ou pelo obsolescimento. Corresponde a um custo não-desembolsável, uma vez que não ocorre saída de dinheiro do caixa. No entanto, é considerada no fluxo de caixa como um custo, apenas para efeito do cálculo do imposto de renda, contribuindo para uma redução desse (PAULA, 1983; HESS *et al.*, 1992).

Adicionalmente, devido à depreciação, os ativos apresentam seu valor reduzido ao longo dos anos, restando apenas um valor residual ao fim da vida útil desses, permitindo a recuperação de parte do capital investido. O método mais comumente utilizado, sobretudo por sua simplicidade, consiste na depreciação linear, na qual o valor da depreciação é dado pela diferença entre o investimento inicial do ativo e o valor residual desse, dividido pelo tempo de vida útil do ativo. De modo geral, considera-se que a depreciação para equipamentos que operam em apenas um turno é de 10% ano, enquanto para equipamentos que operam em dois ou três turnos a depreciação é de 15% e 20% ao ano, respectivamente (PAULA, 1983).

4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETOS

A engenharia econômica apresenta a função de fornecer critérios de decisão para a escolha entre diferentes alternativas de investimento, buscando sempre uma relação equilibrada entre risco e retorno. Os critérios de engenharia econômica levam em consideração apenas fatores econômicos, tomando como base apenas a escolha da melhor rentabilidade. No entanto, essa não é a única meta das partes interessadas na execução do projeto, devendo também ser analisado o interesse estratégico para a organização (HESS *et al.*, 1992; DOMINGOS, 2005; PESSOA, 2006).

Assim, inicialmente, são apresentados os direcionadores do negócio, ou seja, os motivos pelos quais as organizações tendem a realizar projetos. Posteriormente, são analisadas as principais formas de avaliação de projetos atualmente empregadas, que não levam em consideração os riscos e se baseiam no fluxo de caixa descontado: período de *payback*, valor presente líquido e taxa interna de retorno. Finalmente, serão apresentadas as técnicas que englobam o risco, como análise de sensibilidade e de cenários, método de Monte Carlo e árvore de decisão.

4.4.1 DIRECIONADORES DO NEGÓCIO

Os direcionadores de negócio podem ser definidos como os objetivos ou metas que representam o planejamento estratégico de uma organização (SHUNTA, 1995 *apud* CARVALHO, 2010). Sempre que possível, os direcionadores do negócio devem ser tangíveis, de forma que os ganhos obtidos possam ser expressos em termos monetários, facilitando assim a tomada de decisão. Ganhos intangíveis, mesmo sendo subjetivos, também devem ser destacados, assumindo, geralmente, no entanto, importância secundária (GRANT, 1982).

Deve-se ressaltar que a importância desses direcionadores varia de acordo com o segmento industrial da organização, variando também em relação ao tempo, sobretudo para fortes demandas de mercado. Por exemplo, em períodos de baixa demanda de produtos, o custo operacional da empresa torna-se mais relevante que o volume produzido ou a disponibilidade (CARVALHO, 2010).

Entre os principais direcionadores de negócio, destacam-se (FRIEDMANN, 2006 *apud* CARVALHO, 2010):

- Volume de produção: corresponde à quantidade de produtos gerados em um período de referência, medindo a capacidade da unidade de suprir a demanda existente;
- Taxa de produção: também chamada de produtividade, mede a quantidade de produtos gerados por unidade de tempo, refletindo a eficiência e a maturidade tecnológica do processo produtivo;
- Custo operacional: consiste na soma de todos os custos que incidem sobre a operação da planta, envolvendo, insumos, matérias-primas, mão-de-obra, serviços e utilidades. Além disso, inclui também o custo associado a perdas de produção e materiais de descarte;
- Consumo energético específico: mede a quantidade de energia consumida por volume de produto gerado, consistindo em um indicador bastante analisado em projetos de eficiência energética;
- Disponibilidade física: corresponde ao percentual de tempo, em um determinado período, no qual a planta esteve em condições de operar, ou

seja, na ausência de falhas ou manutenção. De modo geral, esse indicador encontra-se associado ao volume de produção;

- **Qualidade:** consiste na avaliação de um conjunto de indicadores para avaliar se o produto gerado em uma etapa do processo atende os requisitos especificados pelas unidades consumidoras e clientes;
- **Meio-ambiente:** avalia o nível de impacto que o processo produtivo causa ao meio-ambiente. Com o aumento da consciência ambiental, esse indicador vem ganhando cada vez mais importância, estando, muitas vezes, ligado às necessidades legais e de marketing;
- **Segurança e Saúde ocupacional:** avalia a incidência de eventos que coloquem em risco a segurança e saúde dos colaboradores da empresa, sendo bastante regulamentado a partir de normas e leis.

Dessa forma, para se atingir níveis adequados para os direcionadores, as empresas investem recursos na execução de projetos. De modo geral, a melhoria dos indicadores incorre em um retorno financeiro. No entanto, deve-se ressaltar que o fato de um projeto não ser atrativo financeiramente não significa necessariamente que esse não deve ser realizado. Fatores como atendimento a normas e leis, além de investimentos estratégicos, são comumente suficientes para garantir a execução de um empreendimento, mesmo que esse gere um ônus financeiro à organização.

Nos próximos subitens são apresentados os principais critérios de decisão utilizados para quantificar a atratividade de projetos.

4.4.2 PERÍODO DE *PAYBACK*

O *payback*, também chamado de período de recuperação, consiste no intervalo de tempo necessário até que os fluxos de caixa acumulados estimados igualem o montante inicialmente investido, ou seja, trata-se do tempo decorrido até se recuperar o capital investido (BREALEY, 2008). O *payback* pode ser tanto simples quanto descontado, tendo como diferença a consideração do valor temporal do dinheiro.

As fórmulas para determinação do *payback* simples e descontado são apresentadas nas equações 4.1 e 4.2, respectivamente. Em ambos os casos, o período de *payback* consiste no valor da variável T que satisfaça a igualdade expressa nas equações.

$$\sum_{t=0}^T (Rt - Ct) = I$$

(equação 4.1)

$$\sum_{t=1}^T \frac{(Rt - Ct)}{(1 + i)^t} = I$$

(equação 4.2)

Sendo:

T = Período de recuperação (*payback*)

t = tempo, período do fluxo de caixa

Rt = Receitas no tempo t

Ct = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

A técnica do *payback* constitui-se em um critério de tomada de decisão bastante empregado atualmente devido à sua forma simples e à necessidade que as empresas, muitas vezes, possuem de recuperar rapidamente o capital investido. Assim, de acordo com essa técnica, o investimento é considerado atrativo caso o *payback* calculado seja menor do que um número predeterminado de anos, definido pela organização (PESSOA, 2006). No entanto, esse critério apresenta como falha o fato de não levar em consideração os valores de fluxo de caixa obtidos após o retorno do capital investido, o que pode incorrer em tomadas de decisão equivocadas (BREALEY, 2008), sobretudo em projetos de longo prazo, como os de pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, o *payback* é utilizado, apenas, como um indicador complementar, tendo sido criadas novas formas de avaliação de projetos (DOMINGOS, 2005), como as apresentadas a seguir.

4.4.3 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O valor presente líquido consiste em um método tradicional de avaliação de projetos, que é utilizado por 75% das empresas (BREALEY, 2008). Essa técnica consiste em converter as quantias existentes no fluxo de caixa para o valor atual, momento no qual é tomada a decisão de se investir. Assim, caso o valor presente do empreendimento seja superior a zero, o investimento é dito atrativo, correspondendo seu valor ao ganho adicional esperado em relação à remuneração obtida caso o montante fosse aplicado à taxa de desconto adotada. Caso o valor presente seja nulo ou negativo, o projeto será, respectivamente, indiferente ou não atrativo (GRANT, 1982; HESS *et al.*, 1992; DOMINGOS, 2005).

Do ponto de vista matemático, o valor presente líquido é definido pela Equação 4.3.

$$VPL = I + \sum_{t=1}^T \frac{(Rt - Ct)}{(1 + i)^t}$$

(equação 4.3)

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

T = Período de vida útil

t = tempo, período do fluxo de caixa

Rt = Receitas no tempo t

Ct = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

Apesar de ser o método mais empregado atualmente, o fluxo de caixa descontado, representado pelo VPL, apresenta algumas limitações por não levar em consideração a flexibilidade gerencial, necessária para a adaptação dos projetos às mudanças de mercado, e nem os riscos e incertezas envolvidos. Dessa forma, vêm sendo desenvolvidas formas mais atuais de avaliação de projetos, que serão discutidas no subitem 4.5.

4.4.4 TAXA INTERNA DE RETORNO

A taxa interna de retorno, mais geralmente conhecida como TIR, consiste em uma técnica bastante similar ao VPL, sendo também utilizada por 75% das empresas (BREALEY, 2008). A TIR consiste no valor da taxa de juros para a qual as receitas

do projeto tornam-se iguais aos desembolsos, zerando, assim, o valor presente líquido. Matematicamente, é obtido a partir da fórmula do VPL, mantendo-se a taxa como variável e igualando-se a expressão à zero (GRANT, 1982; HESS *et al.*, 1992), conforme Equação 4.4.

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^T \frac{(Rt - Ct)}{(1 + TIR)^t}$$

(equação 4.4)

Sendo:

TIR = Taxa Interna de Retorno

VPL = Valor Presente Líquido

T = Período de vida útil

t = tempo, período do fluxo de caixa

R_t = Receitas no tempo t

C_t = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

A taxa mínima de atratividade de um empreendimento consiste na taxa mínima para a qual a organização está disposta a investir recursos e a assumir riscos na realização de um projeto (GRANT, 1982). De modo geral, essa taxa é definida pela alta gerência da organização, apresentando, para a empresa de mineração, cliente do estudo de caso apresentado, um valor de 12%. A taxa mínima de atratividade costuma ser definida com base na disponibilidade de recursos para investimento, no

grau de retorno das oportunidades de investimento e no grau de risco existente nos projetos (GRANT, 1982).

O método da TIR é geralmente utilizado para comparar investimentos de mesmo valor e de mesma vida útil. No entanto, a partir da avaliação do incremento entre dois investimentos diferentes e do uso da técnica de encontrar o mínimo múltiplo comum para o período de vida útil a ser utilizada, permite-se a aplicação desse método para investimentos e vidas úteis diferentes (HESS *et al.*, 1992). A TIR está intimamente ligada ao VPL, conduzindo a decisões semelhantes, além de ser uma técnica de fácil compreensão, o que justifica a disseminação de seu uso. Entretanto, para fluxos de caixa complexos, podem ser encontrados diversos valores para a TIR, além da possibilidade de se tomar decisões errôneas oriundas do fato de não se analisar o incremento entre dois projetos mutuamente excludentes de investimentos iniciais distintos (HESS *et al.*, 1992; PESSOA, 2006).

4.5 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS EM CONDIÇÕES DE RISCOS

Os métodos abordados anteriormente se baseiam em valores de fluxo de caixa considerados precisos, ou seja, não passíveis de sofrer variações. No entanto, apesar de técnicas como o VPL serem extremamente importantes para a avaliação da viabilidade de um projeto, essas suposições não são corretas, uma vez que os projetos se desenvolvem em ambientes marcados por elevado nível de riscos e incertezas (PESSOA, 2005; SAMANEZ, 2009). Dessa forma, as técnicas de avaliação de projeto estão em constante evolução, conforme se pode visualizar na Figura 4.1.

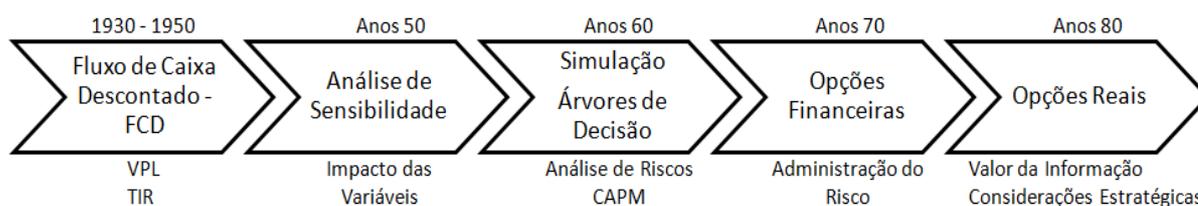


Figura 4.1 – Evolução dos Métodos de Avaliação de Investimentos – adaptado de BRANDÃO (2011)

Apesar de, na prática, os termos riscos e incertezas apresentarem significados semelhantes, eles apresentam definições distintas. O risco consiste em uma situação na qual a variável aleatória apresenta uma distribuição probabilística conhecida, o que não ocorre no caso da incerteza. De qualquer modo, os riscos, ou incertezas, estão sempre presentes na análise de investimentos, gerando a possibilidade de variação nos parâmetros constituintes do fluxo de caixa, que, nem sempre, é considerada na avaliação (SAMANEZ, 2009).

Dessa forma, neste item são feitas considerações sobre técnicas utilizadas para avaliar investimentos em situações de risco, quantificando o impacto das fontes de incertezas sobre o VPL do projeto.

4.5.1 ABORDAGENS CONSIDERANDO O RISCO

Para quantificar a taxa de desconto a ser empregada na análise dos investimentos, são utilizadas técnicas capazes de englobar os riscos dentro da abordagem do fluxo de caixa descontado. Como técnica preliminar, pode-se, a partir da fórmula do VPL, considerar um novo valor para a taxa de desconto, de modo a contemplar também o prêmio de risco (PESSOA, 2005).

Outra forma consiste no cálculo do custo médio ponderado do capital, mais conhecido como WACC (*Weighted Average Cost of Capital*), calculado a partir da média ponderada dos custos das diversas fontes de recursos que financiam os ativos da empresa. Assim, o WACC é formado tanto pela parcela relativa ao próprio capital da empresa, quanto pela parcela referente ao capital da dívida, oriundo de terceiros. É importante ressaltar que essa técnica é aplicada à empresa como um todo, de modo que deve ser aplicada apenas em projetos que não alterem o risco inerente à empresa. Além disso, deve-se sempre utilizar a fonte de renda do projeto, que não precisa ser necessariamente igual à da empresa (PESSOA, 2005; DOMINGOS, 2005; SAMANEZ, 2009).

Entretanto, caso se opere apenas com capital próprio, a abordagem mais consolidada passa a ser a do modelo de apreçamento de ativos com risco, mais conhecida como CAPM (*Capital Asset Pricing Model*). O custo do capital próprio corresponde à expectativa de retorno de capital do próprio investidor, consistindo no parâmetro utilizado por esse para o investimento, ou não, no projeto. Esse modelo fornece uma estimativa de custo de capital, sendo o retorno esperado dado pela soma de dois fatores, um correspondente à rentabilidade sem riscos e o outro relativo ao prêmio de risco. O modelo considera que os investimentos sejam diversificados, de modo que o risco possa ser minimizado, existindo apenas o risco de mercado, ou sistemático, que deve assim ser recompensado (DOMINGOS, 2005; SAMANEZ, 2009).

Assim, a taxa livre de risco consiste no retorno esperado, sem considerar os riscos envolvidos. O prêmio de risco trata-se de um incentivo, ou retorno adicional, que visa compensar os investidores pelo risco assumido, sendo função de duas variáveis: o

beta, que avalia a contribuição incremental do ativo em questão para o risco da carteira diversificada, e a diferença entre o retorno esperado da carteira de mercado e a taxa livre de risco. O fator beta pode ser calculado a partir da covariância entre as rentabilidades do ativo e do mercado, dividida pela variância dos retornos da carteira do mercado, representando a sensibilidade do retorno do ativo em relação ao mercado (DOMINGOS, 2005; SAMANEZ, 2009).

Do ponto de vista prático, a taxa livre de risco pode ser dada pela remuneração média de títulos, como, por exemplo, Certificados de Depósito Bancário (CBD) ou títulos do tesouro nacional. Já a carteira de mercado é considerada como uma aproximação do Índice da Bolsa de Valores de São Paulo (IBOVESPA), enquanto o beta pode ser calculado a partir das cotações das ações da empresa na bolsa de valores, ou ainda obtido na literatura. Logo, por se tratar de uma abordagem bastante simples, o CAPM vem sendo bastante utilizado na análise de investimentos incluindo risco (SAMANEZ, 2009).

Visando minimizar o risco específico para um projeto, tais como os erros de estimativa e erros específicos dos entregáveis, é comum que a empresa invista em um grande número de projetos, mantendo assim o investimento diversificado. Além disso, deve-se sempre analisar e buscar minimizar o risco de mercado, ocasionado por mudanças na inflação, na taxa de juros e na economia como um todo (DAMODARAN, 2004).

4.5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E DE CENÁRIOS

A composição de um fluxo de caixa e a conseqüente obtenção das variáveis de engenharia econômica requer o uso de uma grande quantidade de variáveis. Com

isso, torna-se crucial avaliar quais dessas variáveis apresentam maior influência na viabilidade do projeto. Desse modo, a análise de sensibilidade visa identificar as variáveis críticas na construção do fluxo de caixa, avaliando as alterações no fluxo de caixa ocasionadas a partir da variação dessas variáveis-chave. Assim, os parâmetros críticos devem ser refinados, com o intuito de evitar falhas na tomada de decisão ocasionadas por estimativas errôneas desses. Logo, a análise de sensibilidade consiste em, mantendo as demais variáveis constantes, variar hipoteticamente uma variável, no mínimo, três condições (esperada, pessimista e otimista), e avaliar o resultado dessa alteração no VPL do projeto e, conseqüentemente, na decisão do investimento (PESSOA, 2005; SAMANEZ, 2009).

Já a avaliação do comportamento das variáveis de decisão em relação à variação de um conjunto de parâmetros é denominada avaliação de cenários. Dessa forma, é estudada a correlação entre diversas variáveis, sob uma ótica consistente, observando as alterações que essas principais variáveis, previamente identificadas por meio da análise de sensibilidade, acarretam sobre o fluxo de caixa. Assim, cada um desses cenários podem ser relacionados com uma probabilidade de ocorrência, de modo a se obter o valor esperado dos parâmetros de decisão (DAMODARAN, 2004; PESSOA, 2005; SAMANEZ, 2009).

4.5.3 MÉTODO DE MONTE CARLO

Quando não se possui um modelo capaz de representar denominado fenômeno por meio de uma expressão matemática, pode-se utilizar o denominado método de Monte Carlo. Esse método consiste na geração de números aleatórios, obtidos a partir de curvas de probabilidade das variáveis analisadas, para diferentes situações,

visando determinar os valores esperados para as variáveis cruciais do projeto, previamente identificadas a partir de análise de sensibilidade (DOMINGOS, 2005; PESSOA, 2005). Com o constante desenvolvimento das ferramentas computacionais, a simulação de Monte Carlo vem sendo cada vez mais empregada, uma vez que permite a resolução de sistemas complexos em um curto intervalo de tempo, a partir do uso de softwares como o @Risk[®] e o Crystal Ball[®]. Dessa forma, o processo de simulação apresenta como atividades mais críticas a entrada adequada de dados, a modelagem e a interpretação dos resultados, e não a simulação em si, como acontecia no passado (SAMANEZ, 2009).

Para proceder à simulação utilizando o método de Monte Carlo, é necessário, inicialmente, avaliar as variáveis aleatórias e a probabilidade de ocorrência dos principais valores dessas variáveis. Feito isso, deve-se simular, de forma aleatória, a probabilidade de ocorrência desses valores, de modo a se obter o valor esperado para a variável de interesse. Assim, tendo-se o valor esperado das variáveis aleatórias, pode-se montar o fluxo de caixa, o que permite avaliar a viabilidade econômica do projeto em questão. Por fim, deve-se repetir o processo diversas vezes, gerando a função de probabilidade do próprio indicador econômico do projeto (DOMINGOS, 2005; PESSOA, 2005; SAMANEZ, 2009).

Entretanto, mesmo com a grande capacidade de avaliar problemas complexos de tomada de decisão em condições de incerteza, o método de Monte Carlo apresenta limitações. Inicialmente, destaca-se a grande subjetividade existente no processo de estimativa das probabilidades de ocorrência dos diferentes cenários. Além disso, a técnica se baseia em distribuições probabilísticas estimadas no início da tomada de decisão, não sendo previstas formas de rever a estratégia pré-determinada caso os

fluxos de caixa reais se apresentem significativamente diferentes das expectativas iniciais (PESSOA, 2005).

4.5.4 ANÁLISE POR ÁRVORE DE DECISÃO

Outra abordagem capaz de considerar a incerteza, além de apresentar a possibilidade de decisões gerenciais no decorrer do empreendimento é a análise por árvores de decisão, também denominada DTA, do inglês *Decision Tree Analysis*. As árvores de decisão consistem em uma importante ferramenta para facilitar a visualização e, conseqüentemente, a análise de investimentos seqüenciais, explicitando as opções gerenciais possíveis. Elas permitem avaliar diferentes desdobramentos do projeto, a partir da inclusão de diferentes pontos de decisão e de inclusão de incerteza, que constituem diferentes ramos da árvore, cada um com certa probabilidade de ocorrência. Assim, calcula-se os indicadores de viabilidade do projeto para diferentes ramos, podendo-se eliminar os ramos que apresentem piores indicadores, o que confere às árvores de decisão o caráter de ferramenta de otimização (PESSOA, 2005; SAMANEZ, 2009).

Portanto, as árvores de decisão apresentam a vantagem de agregar flexibilidade às técnicas de engenharia econômica tradicionais, permitindo analisar os riscos e as probabilidades inerentes ao projeto. No entanto, essa abordagem não é capaz de administrar o risco nem de agregar o valor da flexibilidade gerencial ao projeto, tal qual pode ser feito a partir de estratégias mais modernas, como a Teoria das Opções Reais (PESSOA, 2005).

CAPÍTULO 5: OPÇÕES REAIS EM ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

Desde o final da década de 80, a Teoria das Opções Reais tem chamado cada vez mais atenção das grandes organizações. Apesar de ainda não ser tão difundida e de apresentar relativa complexidade, essa técnica, devido à vantagem de incorporar a flexibilidade gerencial no processo decisório, vem sendo utilizada como um complemento das formas tradicionais de avaliação de investimento.

A Teoria das Opções Reais pode ser definida como a aplicação de conceitos e técnicas de precificação de opções financeiras visando avaliar investimentos em ativos reais, como, por exemplo, projetos e empresas (MELIN, 2008). Quando utilizada de forma adequada, a Teoria das Opções Reais é capaz de minimizar perdas e potencializar ganhos (VIDAL, 2008).

De modo geral, as empresas que apresentam maior interesse na Teoria das Opções Reais operam em setores de investimentos elevados com retornos incertos, tais como petrolífero e farmacêutico, ou ainda que tenham passado por mudanças estruturais significativas, como o setor de energia elétrica. Geralmente, essas indústrias praticantes da Teoria das Opções Reais estão associadas à engenharia, uma vez que os profissionais dessa área estão acostumados com o uso de técnicas analíticas (TRIANZIS, 2001).

5.1 INTRODUÇÃO ÀS OPÇÕES

Uma opção pode ser definida como um contrato que proporciona ao titular da opção o direito, mas não a obrigação, de comprar ou vender determinada quantidade de

um ativo a um preço fixo, em uma data de expiração, ou, antes dessa (DAMODARAN, 2004; MINARDI, 2004).

Em relação à data de exercício, as opções podem ser denominadas como americanas, caso possam ser exercidas a qualquer momento antes do vencimento, ou européias, caso apenas possam ser exercidas na própria data de vencimento (DAMORADAN, 2004; BREALEY; 2008).

Existem dois tipos básicos de opções: a opção de compra (*call*) e a opção de venda (*put*) (BREALEY, 2008; DAMODARAN, 2004).

Em uma opção de compra, o titular possui o direito de comprar o objeto da opção a um preço fixado, denominado preço de exercício, a qualquer instante até a data de vencimento. Após essa data, caso a opção não seja exercida, ela expira, deixando de existir. Para adquirir a opção, o comprador paga um determinado preço. Se, no vencimento, o valor do ativo for inferior ao preço de exercício, o titular não exerce a opção. No entanto, caso o valor do ativo seja superior ao preço do exercício, a opção de compra é exercida ao preço de exercício, sendo o lucro bruto do investimento dado pela diferença entre o valor do ativo e o preço de exercício. O lucro líquido é obtido retirando-se do lucro bruto o preço pago inicialmente pela opção de compra (DAMODARAN, 2004; BREALEY, 2008; PAMPLONA, 2005). O diagrama de retorno de uma opção de compra pode ser visualizado na Figura 5.1.

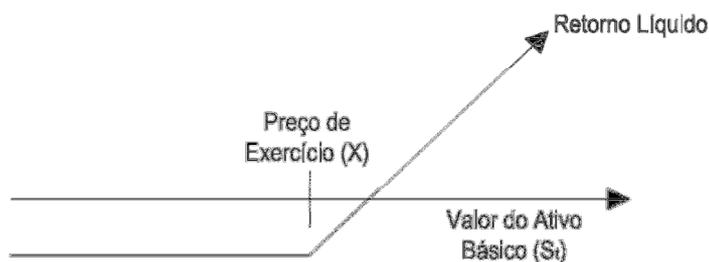


Figura 5.1 – Diagrama de Retorno de uma Opção de Compra – adaptado de DAMODARAN (2004) e BREALEY (2008)

Já em uma opção de venda, também conhecida como *put*, o comprador possui o direito de vender a ação a um preço fixado, chamado preço de exercício, em qualquer momento até a data de expiração da opção. De forma similar à opção de compra, o comprador da opção paga um preço pelo direito adquirido. Caso, no vencimento, o valor do ativo seja maior que o preço de exercício, ele não exerce a opção, que deixa de existir. Entretanto, caso o valor do ativo seja inferior ao preço de exercício, a opção é exercida, sendo o ativo vendido ao preço de exercício. Assim, a diferença entre o valor do ativo e o preço de exercício consiste no lucro bruto, sendo o lucro líquido obtido pela diferença entre o lucro bruto e o preço pago inicialmente pela opção de compra (DAMODARAN, 2004; BREALEY, 2008; PAMPLONA, 2005). O diagrama de retorno de uma opção de venda, em seu vencimento, é representado na Figura 5.2.

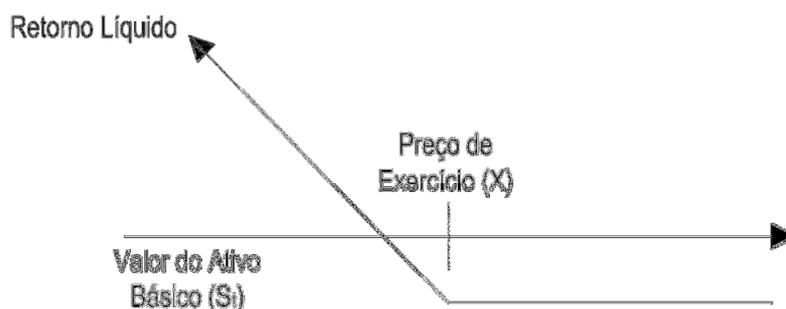


Figura 5.2 – Diagrama de Retorno de uma Opção de Venda – adaptado de DAMODARAN (2004) e BREALEY (2008)

Em relação à posição do investidor ao negociar opções, existe a posição comprada (*long*) e a posição vendida (*short*). Na primeira, o investidor adquire uma opção, passando a ter o direito de exercê-la até a data de vencimento, podendo ser tanto de compra quanto de venda de ativo. Já na segunda, o investidor vende uma opção, assumindo a obrigação de comprar (ou vender) o ativo pelo preço de exercício, caso o comprador exerça a opção (MELIN, 2008).

Nota-se que o retorno da opção depende do momento em que ela é exercida. É importante ressaltar que para o cálculo do lucro líquido, o preço de exercício da opção deve ser levado em consideração. Assim, existem três posições possíveis para uma determinada opção em relação à geração de fluxo de caixa, podendo esse ser positivo, nulo ou negativo, conforme representado na Figura 5.1 (PAMPLONA, 2005; MELIN, 2008).

Tabela 5.1 – Posições de uma Opção em relação ao Fluxo de Caixa – adaptado de PAMPLONA (2005); MELIN (2008)

Situação	Descrição	Compra	Venda
Dentro do dinheiro (in the money)	Caso seja exercida imediatamente, gera fluxo de caixa positivo	$St > X$	$St < X$
No dinheiro (at the money)	Caso seja exercida imediatamente, gera fluxo de caixa nulo	$St = X$	$St = X$
Fora do dinheiro (out of the money)	Caso seja exercida imediatamente, gera fluxo de caixa negativo	$St < X$	$St > X$

Assim, o valor total de uma opção é obtido pela soma entre o valor intrínseco e o valor tempo. O valor intrínseco consiste no valor máximo entre zero e o fluxo de caixa gerado pelo exercício imediato da opção. Já o valor tempo, por sua vez, está ligado à probabilidade de se obter um fluxo de caixa, até o vencimento, superior ao

obtido caso a opção fosse imediatamente exercida. Na data de expiração, como não existe a possibilidade de se obter um fluxo de caixa superior em algum momento futuro, o valor tempo é nulo (MELIN, 2008; BRANDÃO, 2011).

5.2 IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS

Conforme previamente discutido, o fluxo de caixa descontado, apesar de ser a técnica de engenharia econômica mais utilizada no mundo corporativo, apresenta algumas limitações, uma vez que considera uma estratégia imutável para o projeto, não sendo capaz de capturar a flexibilidade gerencial inerente às incertezas existentes. Assim, em mercados previsíveis e confiáveis, as técnicas baseadas no fluxo de caixa descontado são suficientes para a avaliação de investimentos, não sendo necessário despender maiores esforços a partir de uma avaliação de opções reais (PAMPLONA, 2005; MELIN, 2008; BRANDÃO, 2011).

Já para projetos realizados em mercados voláteis, sujeitos a maiores condições de incertezas, o fluxo de caixa descontado não consiste na técnica mais adequada, uma vez que subestima o valor de um projeto, não conseguindo captar os benefícios oriundos da flexibilidade de possíveis ações corretivas no decorrer desse (COPELAND & ANTIKAROV, 2001; MELIN, 2008).

Com o desenvolvimento do projeto e a conseqüente redução da incerteza existente, os fluxos de caixa previstos tendem a ser mais assertivos, o que confere ao gestor uma flexibilidade para alterar a estratégia previamente determinada, visando aproveitar oportunidades futuras favoráveis ou reagir de forma a minimizar perdas

(TRIGEORGIS, 1996). Desse modo, na abordagem da Teoria das Opções Reais, a incerteza é vista como um fator positivo, que pode ser explorado para a obtenção de ganhos, diferentemente do que ocorria no fluxo de caixa descontado (BREALEY, 2008).

Assim, a Teoria das Opções Reais consiste em uma visão de análise de projetos que se baseia na teoria de precificação de opções para avaliar projetos com flexibilidade gerencial. Dessa forma, a Teoria das Opções Reais visa complementar a análise tradicional via fluxo de caixa descontado, capturando o valor da flexibilidade gerencial e fornecendo uma valoração mais consistente do projeto, a partir de regras de decisão mais específicas e detalhadas (BRANDAO, 2011).

Com essa abordagem, o valor presente líquido de um projeto passa a ser descrito pela soma entre o VPL tradicional e o valor presente das opções, também chamado de prêmio da opção, de acordo com a Equação 5.1:

$$VPL_{\text{expandido}} = VPL_{\text{tradicional}} + VALOR_{\text{flexibilidade_gerencial}}$$

(equação 5.1)

Assim, o valor da opção e, conseqüentemente, o valor presente do projeto serão maiores para situações de elevada probabilidade de se receber novas informações (elevada incerteza em relação ao futuro), nas quais o gestor apresenta uma significativa capacidade de reação às mudanças (flexibilidade gerencial). Adicionalmente, nota-se que a análise via opções reais é mais valiosa para projetos que apresentem VPL (sem flexibilidade) próximos de zero, o que faz com que a opção tenha mais condição de afetar o processo decisório (COPELAND, 2001; DIAS, 2006; SOUSA NETO, 2008).

De forma similar às opções sobre ativos financeiros, a flexibilidade gerencial, ao permitir que o gestor se adapte às novas condições do projeto, introduz uma assimetria na distribuição de probabilidade do VPL, uma vez que o potencial de ganhos é maximizado e o potencial de perdas é minimizado, gerando um aumento do valor esperado do VPL do projeto. Dessa maneira, o valor expandido do projeto é dado pela soma do VPL estático ao prêmio da opção, conforme se pode observar na Figura 5.3 (PESSOA, 2006).

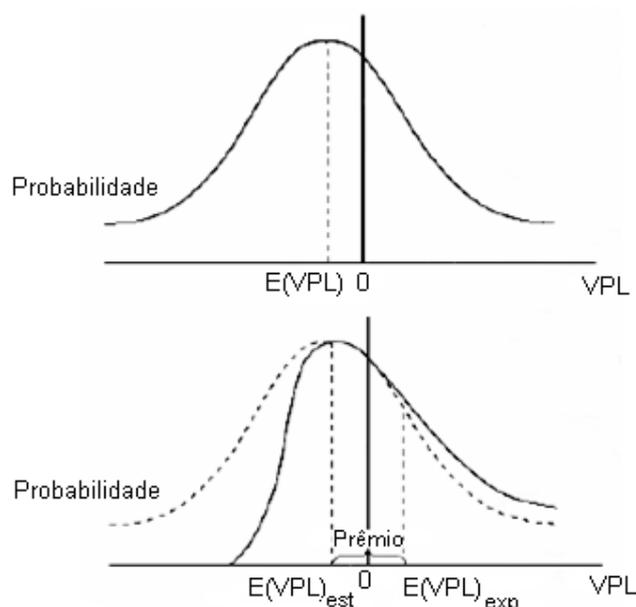


Figura 5.3 – Assimetria na Distribuição de Probabilidade do VPL ocasionada pela Flexibilidade Gerencial – adaptada de SANTOS (1999) *apud* PESSOA (2006)

Pode-se inferir que a abordagem do fluxo de caixa descontado é preferível em condições de baixa incerteza e pouca flexibilidade gerencial, enquanto a Teoria das Opções Reais deve ser aplicada em casos de grande incerteza e flexibilidade (BREALEY, 2008).

Para que um projeto apresente valor de opção, são necessárias três condições: o investimento deve ser, ao menos parcialmente, irreversível (*sunk cost*); a

flexibilidade gerencial deve ser o suficiente para promover alterações na operação do projeto; e que o fluxo de caixa tenha incerteza elevada (BRANDÃO, 2002).

Adicionalmente, por consistir em uma análise relativamente complexa, a Teoria das Opções Reais só deve ser aplicada em situações nas quais os benefícios são evidentes. Isso ocorre em projetos nos quais o VPL tradicional apresenta valores negativos ou próximos de zero ou quando existe um alto valor de flexibilidade que necessite de ser quantificado (COPELAND 2001).

Os projetos podem ser classificados de acordo com a incerteza, a vinculação ao negócio e oportunidades de crescimento. Conforme se pode observar na Figura 5.4, a avaliação a partir de técnicas tradicionais é recomendada para projetos de baixa incerteza, relacionados ao negócio principal da empresa, ao passo que os projetos com alto nível de incerteza, ligados a novas oportunidades, devem ser avaliados pela Teoria das Opções Reais (PARK & HERATH, 2000 *apud* MELIN, 2008).

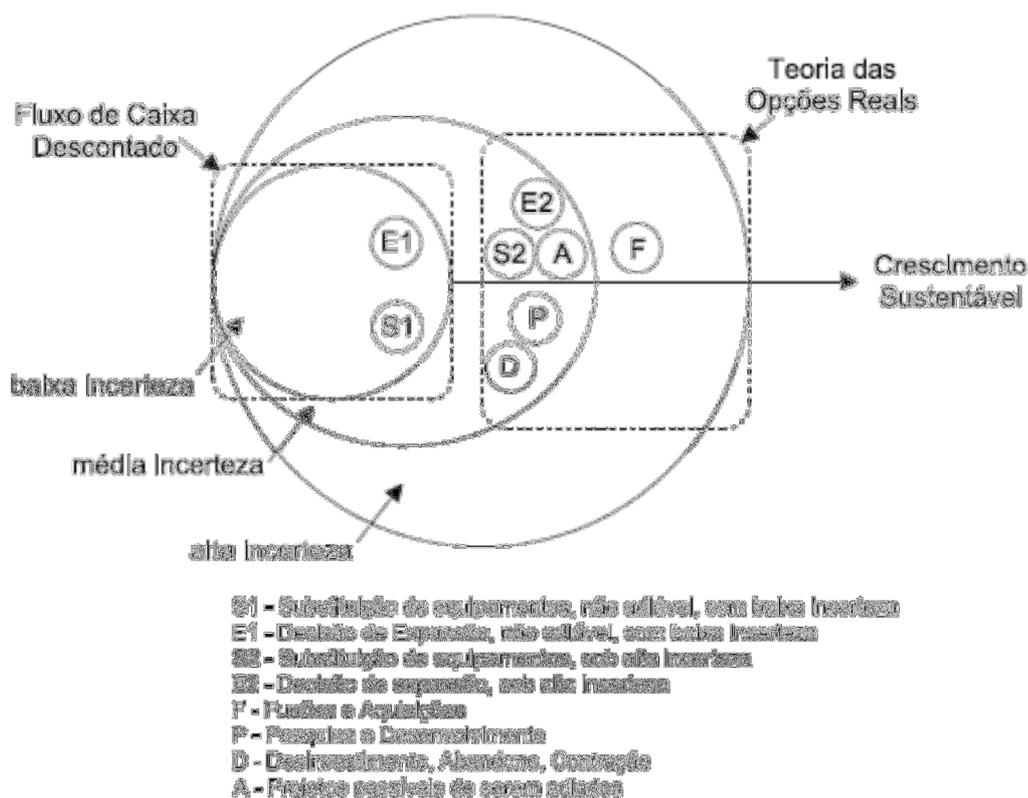


Figura 5.4 – Relação entre Tipo de Projeto e Forma de Análise – adaptada de PARK & HERATH (2000) *apud* MELIN (2008)

Apesar de estudos nesta área ainda serem relativamente escassos, são encontrados na literatura alguns trabalhos contemplando a aplicações da Teoria das Opções Reais, sobretudo nas áreas de Pesquisa e Desenvolvimento (SANTOS & PAMPLONA, 2002), Tecnologia da Informação (SANTOS FILHO, 2003), fontes de energia (LUNA, 2011), petróleo e derivados (DOMINGOS, 2005) e mineração (VIDAL, 2008; MELIN, 2008; PESSOA, 2006).

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OPÇÕES REAIS E FINANCEIRAS

De forma análoga às opções financeiras, uma opção real consiste no direito, mas não na obrigação, de realizar uma ação a um custo predeterminado, chamado de

preço de exercício, por um período preestabelecido (COPELAND, 2001). A comparação entre opções financeiras e reais é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparação entre Opções Financeiras e Reais – adaptado de PARK & HERATH (2000) *apud* PESSOA (2006); VIDAL (2008)

Opções Financeiras	Opções Reais
Opção de compra (<i>call</i>)	Opção de investir
Valor presente da ação	Valor presente do projeto
Preço de exercício	Valor presente do investimento
Tempo para expiração	Tempo até o desaparecimento da oportunidade
Volatilidade da ação	Incertezas do projeto devido à volatilidade dos fluxos de caixa
Dividendos	Fluxo de caixa do projeto

De forma análoga às opções financeiras, o valor das opções reais depende das seguintes variáveis (BREALEY, 2008; BRANDAO, 2011):

- Valor do ativo subjacente sujeito a risco: consiste no valor agregado ao projeto obtido ao se exercer a opção;
- Preço de exercício: trata-se do capital necessário, pré-determinado, para realização do investimento representado pela opção;
- Volatilidade do valor de projeto: representa o grau de incerteza dos fluxos de caixa futuros;
- Prazo de vencimento: consiste no tempo até o qual se pode exercer a opção, após o qual se cessam os direitos garantidos pela opção;
- Taxa de juros livre de risco: representa os juros, isento de risco, incluídos na análise do projeto;
- Dividendos: consiste em pagamentos recebidos no decorrer do projeto.

O efeito dessas variáveis básicas no valor das opções de compra e de venda é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Influência de diferentes variáveis no valor da Opção – adaptado de DAMODARAN (2000); BREALEY (2008); MELIN (2008); SOUSA NETO (2008)

Variável	Influência na Opção
Aumento do Preço do Ativo Básico (S)	Opção de Compra
	Aumenta. O retorno de uma opção de compra é $\max(S-X,0)$, logo um aumento do preço do ativo aumenta o valor da opção.
	Opção de Venda
	Diminui. O retorno de uma opção de venda é $\max(X-S,0)$, logo um aumento do preço do ativo diminui o valor da opção.
Aumento do Preço de Exercício (X)	Opção de Compra
	Diminui. O retorno de uma opção de compra é $\max(S-X,0)$, logo um aumento do preço de exercício diminui o valor da opção.
	Opção de Venda
	Aumenta. O retorno de uma opção de venda é $\max(X-S,0)$, logo um aumento do preço de exercício aumenta o valor da opção.
Aumento da volatilidade (σ)	Opção de Compra e de Venda
	Aumenta. O aumento do prazo para o vencimento aumenta a probabilidade de variação do preço do ativo. Caso essas variações prejudiquem o detentor da opção, ele simplesmente não as exerce. Caso sejam benéficas, aumentarão o valor das opções de compra e de venda.
Aumento no prazo de vencimento (t)	Opção de Compra e de Venda
	Aumenta. O aumento da volatilidade do ativo aumenta a probabilidade de grande variação do preço do ativo. Caso essas variações prejudiquem o detentor da opção, ele simplesmente não as exerce. Caso sejam benéficas, aumentarão o valor das opções de compra e de venda.
Aumento na taxa de juros livre de risco (r)	Opção de Compra
	Aumenta. Com o aumento da taxa de juros, ocorre o aumento da taxa de crescimento do preço da ação e a redução do valor presente dos fluxos de caixa futuros. Tais conseqüências apresentam efeitos contrários, havendo predominância da primeira, o que aumenta o valor da opção de compra.
	Opção de Venda
	Diminui. Em uma opção de venda, a redução do valor presente dos fluxos de caixa futuros predomina em relação ao aumento da taxa de crescimento, levando a uma redução do valor da opção.
Aumento nos dividendos pagos (d)	Opção de Compra
	Diminui. Após o pagamento de dividendos, ocorre uma diminuição no valor do preço do ativo, incorrendo em uma diminuição do valor da opção de compra.
	Opção de Venda
	Aumenta. De maneira oposta, o pagamento de dividendos aumenta o valor da opção de venda.

Entre as principais diferenças entre opções reais e financeiras, destacam-se (COPELAND, 2001; MINARDI, 2004; DIAS, 2006):

- Opções financeiras apresentam, de modo geral, vida curta, enquanto opções reais possuem vidas longas, podendo, inclusive, ser perpétuas;
- Opções financeiras normalmente envolvem uma única opção, ao passo que opções reais costumam ser compostas;
- Opções financeiras apresentam como ativo uma ação ordinária ou título, diferentemente do que ocorre nas opções reais, nas quais o ativo é algo tangível, como um projeto;
- Ativos financeiros, como ações, não podem apresentar valor negativo, diferente do que pode ocorrer com um projeto;
- As opções financeiras são geralmente feitas por agentes independentes, ou seja, que não possuem influência sobre o preço das ações, enquanto nas opções reais o agente consiste no próprio gerente que controla o projeto e, conseqüentemente, as opções envolvidas.

5.4 TIPOS DE OÇÕES REAIS

Para se avaliar um projeto a partir da Teoria das Opções Reais, deve-se fazer uma analogia entre o projeto e uma opção de compra que apresente o preço de exercício igual ao investimento do projeto. Assim, as opções podem ser classificadas de acordo com o tipo de flexibilidade gerencial associadas aos projetos. Os principais tipos de opções são apresentados nos subitens subseqüentes.

5.4.1 OPÇÃO DE ABANDONO

Caso as condições do mercado piorem drasticamente, pode-se optar por abandonar permanentemente o projeto e vender os ativos adquiridos a seus valores residuais, sendo, por isso, uma opção irreversível. Essa opção é bastante empregada em indústrias de capital intensivo, serviços financeiros e para introdução de novos produtos em mercados de riscos (PESSOA, 2006; VIDAL, 2008). Consiste em uma opção do tipo venda americana, que apresenta como ativo o valor do projeto e o preço de exercício é o preço de revenda ou do uso alternativo (MELIN, 2008; BREALEY, 2008).

5.4.2 OPÇÃO DE FECHAR TEMPORARIAMENTE UM PROJETO

Caso as condições do mercado sejam instáveis, pode-se optar por não operar continuamente, paralisando o projeto temporariamente até que o mercado se torne estável e as operações possam ser retomadas. Esse tipo de opção é bastante comum em indústrias de pesquisa e desenvolvimento, como, por exemplo, a farmacêutica (PESSOA, 2006).

5.4.3 OPÇÃO DE TROCA

Caso ocorram alterações nos preços ou nas demandas de determinados produtos, pode-se optar por alterar o mix de produtos da empresa, gerando flexibilidade no produto, ou por modificar as matérias-primas e fornecedores utilizados, criando flexibilidade no processo. Esse tipo de opção é importante, na alteração de produtos, para bens vendidos em pequenos lotes ou sujeitos a demandas voláteis, como brinquedos e eletrônicos, enquanto, na alteração de insumos, é útil para fábricas que possuam fornecedores alternativos para o mesmo insumo ou que dependem de

matérias-primas voláteis, mas que possuem substitutos (PESSOA, 2006). Trata-se de um portfólio de opções de compra e venda americanas, permitindo a opção de troca a partir de um custo fixo entre os modos de operação. O ativo consiste no valor gerado pela substituição do insumo ou do produto, enquanto o preço de exercício é o custo da substituição (MELIN, 2008).

5.4.4 OPÇÃO DE CRESCIMENTO FUTURO

Ocorre quando um determinado investimento corresponde a um pré-requisito de um projeto futuro ou faz parte de uma série de projetos capazes de prospectar novas oportunidades, como na criação de novos produtos, processos e reservas de petróleo. Assim, o investimento inicial equivale a uma opção de compra de oportunidades de crescimento futuras. Esse tipo de opção é empregado em indústrias de infra-estrutura de base ou estratégicas, como as de Pesquisa e Desenvolvimento, além de poder ser aplicada em processos de fusões e aquisições (PESSOA, 2006; MELIN, 2008).

5.4.5 OPÇÃO DE ADIAR O INVESTIMENTO

Consiste em adiar, ou diferir, a realização de um projeto, normalmente que apresente VPL negativo, até que as condições de mercado variem ou até que incertezas sobre algumas premissas fundamentais para o projeto sejam minimizadas. Essa opção deve ser exercida quando informações adicionais sobre o projeto ou a melhoria do mercado não agreguem valor ao retorno do projeto (VIDAL, 2008). Essa opção é útil em indústrias de extração de recursos minerais, de agricultura e empreendimentos imobiliários, uma vez que esses mercados

apresentam uma alta incerteza e um longo prazo (TRIGEORGIS, 1996; PESSOA, 2006). Consiste em uma opção de compra tipo americana, tendo como ativo o valor presente do fluxo de caixa esperado pelo projeto, preço de exercício igual ao investimento necessário para a execução e a vida da opção o período em que a empresa detém direitos sobre o bem (DAMODARAN, 2004; MELIN, 2008; BREALEY, 2008).

5.4.6 OPÇÃO DE EXPANSÃO

Caso as condições de mercado se tornem mais favoráveis que o previsto, pode-se optar por expandir a escala de produção ou acelerar a utilização dos recursos, investindo-se os recursos necessários a essa expansão. Essa opção, que é semelhante a uma opção de compra, é geralmente utilizada em indústrias de recursos minerais e bens de consumo (PESSOA, 2006). Dessa forma, trata-se de uma opção de compra para adquirir capacidade extra de produção, a partir do pagamento do preço de exercício (MELIN, 2008; BREALEY, 2008).

5.4.7 OPÇÃO DE CONTRAÇÃO

De forma oposta à opção de expansão, caso as condições do mercado se tornem desfavoráveis em relação ao previsto, pode-se contrair o projeto, reduzindo a escala de produção e economizando parte dos investimentos planejados. Essa opção é empregada em indústrias de recursos minerais e bens de consumo, consistindo em uma opção de venda de parte da escala do projeto original (PESSOA, 2006; MELIN, 2008).

5.4.8 OPÇÃO COMBINADA

Consiste na interação entre diferentes tipos de opções, sendo a opção que mais se assemelha às geralmente encontradas pelas empresas na valoração de investimentos (PESSOA, 2006). É interessante ressaltar que o valor das opções combinadas pode diferir da soma dos valores de cada opção, devido à interação existente entre elas (MELIN, 2008).

5.4.9 OPÇÃO DE INVESTIMENTO EM ESTÁGIOS

De modo geral, projetos de engenharia são realizados em diversas fases, conforme preconizado pela metodologia FEL, o que gera a opção de investimento em estágios. Assim, os desembolsos são efetuados ao longo do projeto, possuindo-se a opção de abandono, caso as perspectivas sejam desfavoráveis. Esse tipo de opção é bastante comum em indústrias de P&D e projetos de longo prazo que envolvem um grande montante de capital, como, por exemplo, usinas de geração de energia. Consiste em uma opção composta, sendo cada estágio correspondente a uma opção de compra dos estágios seguintes. O ativo da opção consiste no valor presente dos fluxos de caixa previstos para os projetos seguintes, enquanto o preço de exercício trata-se do investimento no estágio em análise (MELIN, 2008).

5.5 PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES

Com o intuito de se quantificar o valor das opções, podem ser utilizados diferentes métodos. Esses métodos podem tanto ser analíticos, como o modelo de Black &

Scholes, quanto obtidos via árvore binomial, conforme apresentado nos subitens abaixo.

5.5.1 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS

Um processo estocástico pode ser definido como o modelo matemático de um evento probabilístico que se desenvolve ao longo do tempo, gerando valores aleatórios (BERTSEKAS & TSITSIKLIS, 2000). Dessa forma, na maioria dos estudos envolvendo avaliação de opções reais, considera-se que as variáveis de incerteza seguem um processo estocástico, uma vez que elas se comportam, ao longo do tempo, de forma aleatória, assumindo valores imprevisíveis (SOUSA NETO, 2008).

Dentre os principais tipos de processos estocásticos comumente empregados em opções reais, destacam-se:

- **Processo de Wiener:** processo estocástico contínuo, utilizado para explicar a evolução dos preços dos ativos, sendo também chamado de movimento Browniano. Esse tipo de processo, que considera que para se prever o valor futuro depende-se apenas do valor atual (cadeia de markov), é bastante empregado para o estudo do comportamento de ações e commodities em geral (VIDAL; 2008; BRANDAO, 2011);
- **Movimento Geométrico Browniano:** trata-se de um tipo de processo de Wiener no qual o retorno e a volatilidade proporcional do ativo em estudo são constantes, o que resulta em uma distribuição lognormal. Esse tipo de movimento é composto pela combinação entre um crescimento proporcional e um crescimento proporcional aleatório. Trata-se do processo estocástico mais comumente utilizado na modelagem de processos estocásticos e,

conseqüentemente, na abordagem via opções reais, uma vez que permite crescimento exponencial (como em juros compostos) e possui poucos parâmetros a serem estimados, incorrendo comumente em resultados assertivos (DIAS, 2006; VIDAL, 2008; BRANDAO, 2011).

No Movimento Geométrico Browniano, para um tempo contínuo, a variável preço pode ser definida pela Equação 5.2.

$$dP = \alpha P dt + P \sigma_p dz ,$$

(equação 5.2)

Sendo:

- dP = variação incremental do preço no intervalo dt ;
- α = taxa de crescimento do preço no intervalo dt ;
- σ_p = volatilidade;
- dz = processo de wiener padrão = $\varepsilon \sqrt{dt}$, com ε pertencente à normal reduzida.

Já para tempo discreto, sendo o tempo contado em anos, o preço do minério de ferro em cada ano depende apenas do ano anterior, caracterizando um processo de Markov, conforme Equação 5.3 (VIDAL, 2008).

$$P_{t+1} = P_t + \alpha_t P_t + P_t \sigma_p \varepsilon ,$$

(equação 5.3)

Sendo:

- P_t = preço do minério de ferro no tempo t ;

- α = taxa de crescimento do preço no intervalo dt ;
- σ_P = volatilidade do preço do minério;
- ε = pertencente à distribuição normal reduzida.

Deve-se destacar que, na análise neutra ao risco, a taxa de crescimento do preço é dada por $\alpha_t - \lambda \sigma_P$, ao invés de, apenas, α_t .

5.5.2 MODELO DE BLACK & SCHOLES

O modelo de Black & Scholes foi apresentado em 1973, por Fischer Black e Myron Scholes, sendo o primeiro de uma série de artigos que envolviam apreçamentos de diversos tipos de opções e testes empíricos das previsões (COPELAND, 2001). Embasado no conceito de portfólio equivalente, esse modelo pode ser utilizado para precificar opções europeias que apresentem uma distribuição probabilística lognormal, de acordo com um Movimento Geométrico Browniano (VIDAL, 2008).

Esse modelo possui as seguintes premissas (DAMODARAN, 2004; PESSOA, 2006):

- Opção só pode ser exercida no vencimento (opção europeia);
- Só existe uma única fonte de incerteza (supõem-se taxas de juros constantes);
- Existe apenas um único ativo subjacente sujeito a risco (não incluindo opções compostas);
- Não há pagamento de dividendos pelo ativo subjacente;
- O preço de mercado corrente e o processo estocástico seguido pelo ativo são conhecidos;

- A variância do retorno sobre o ativo subjacente é constante ao longo do tempo;
- O preço de exercício é conhecido e constante.

Adicionalmente, o modelo é bastante utilizado para precificação de opções européias, apresentando como principal hipótese a distribuição lognormal, seguida pelos preços do ativo. Assim, a distribuição probabilística dos retornos do ativo, calculados de forma contínua e composta a partir dos preços, é normal (FERREIRA, 2003 *apud* PESSOA, 2006).

A equação de Black e Scholes se baseia em um portfólio que garante ao investidor retorno igual à taxa livre de risco, sendo dada pela Equação 5.4.

$$C_0 = S_0 N(d_1) - X e^{-rt} N(d_2)$$

(equação 5.4)

Sendo:

- S_0 = preço do ativo subjacente
- $N(d_1)$ = probabilidade normal padronizada cumulativa da variável d_1
- $N(d_2)$ = probabilidade normal padronizada cumulativa da variável d_2
- X = preço do exercício da opção
- T = prazo do vencimento da opção
- r = taxa livre de risco
- e = base dos logaritmos naturais

- $d_1 = \frac{\ln\frac{S_0}{X} + rfT}{\tau\sqrt{T}} + \frac{1}{2}\tau\sqrt{T}$
- $d_2 = d_1 - \tau\sqrt{T}$

O processo de avaliação de opções reais a partir do modelo de Black & Scholes engloba os seguintes passos (PESSOA, 2006):

- Utilização dos dados de entrada do modelo para estimar os valores de d_1 e d_2 ;
- A partir dos valores estimados de d_1 e d_2 , estimam-se os valores das funções cumulativas de distribuição normal $N(d_1)$ e $N(d_2)$;
- Estimar o valor presente do preço de exercício, a partir da versão de tempo contínuo da fórmula de valor presente $K e^{-rt}$;
- Estimar o valor da opção de compra utilizando o modelo.

O modelo de Black & Scholes é geralmente empregado como uma abordagem preliminar na avaliação de opções reais, uma vez que apresenta as seguintes limitações (PESSOA, 2006):

- Os projetos geralmente geram dividendos;
- Os projetos geralmente apresentam mais de uma fonte de incerteza;
- Os projetos possuem múltiplas opções combinadas;
- As opções geralmente associadas a projetos são do tipo americana.

5.5.3 MODELO BINOMIAL

Em 1979, Cox, Ross e Rubinstein desenvolveram um modelo que substitui o modelo contínuo de Black & Scholes por um modelo em tempo discreto, chamado de modelo binomial ou árvore binomial. Esse processo binomial multiplicativo, também chamado de caminho aleatório (*random walk*), tende a apresentar soluções similares à equação de Black & Scholes quando o número de intervalos tende ao infinito, apresentando a vantagem de também poder ser utilizado para calcular opções americanas, diferentemente com o que ocorre com o Modelo de Black & Scholes (MELIN, 2008; VIDAL, 2008; BREALEY, 2008).

Dessa forma, a distribuição de probabilidade lognormal contínua pode ser modelada por uma árvore binomial discreta, na qual, a cada passo, o preço S é multiplicado por uma variável aleatória que pode apresentar dois valores (u , o fator de subida, com probabilidade p , e d , o fator de descida, com probabilidade $1-p$) (DIAS, 2006).

Assim, para que a árvore binomial represente uma distribuição lognormal, os valores de u , d e p devem garantir que a média e a variância dos retornos S sejam iguais aos parâmetros do Movimento Geométrico Browniano, conforme representado na Figura 5.5 (BRANDÃO, 2002).

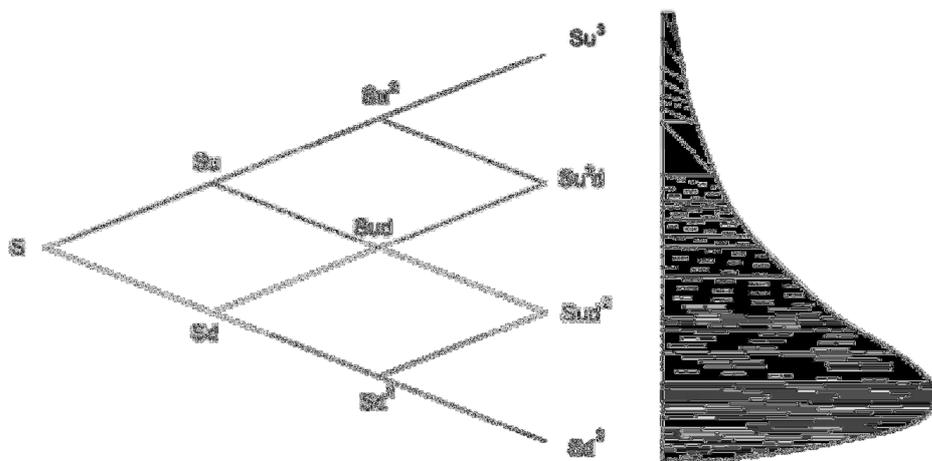


Figura 5.5 – Movimento Geométrico Browniano aproximado por uma Árvore Binomial – adaptado de DIAS (2006); BRANDÃO (2011)

Para isso, as fórmulas dos parâmetros do modelo binomial devem ser as seguintes:

- $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$
- $d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$
- $p = \frac{e^{u \cdot t} - d}{u - d}$,

sendo Δt o incremento de tempo e σ o desvio-padrão instantâneo, ou volatilidade, do retorno do ativo (PESSOA, 2006; DIAS 2006; BREALEY, 2008).

A probabilidade p de subida pode ser aproximada segundo modelo Cox, Ross e Rubinstein (CRR), gerando a Equação 5.5, na qual r é a taxa livre de juros:

$$p = \frac{(1 + r) - d}{u - d}$$

(equação 5.5)

Na Tabela 5.4, é apresentada uma comparação entre as abordagens de Black & Scholes e árvore binomial.

Tabela 5.4 – Comparação entre os Modelos de Black & Scholes e Binomial – adaptado de BRANDÃO (2011) *apud* PESSOA (2006)

Black & Scholes	Binomial
Opção Européia	Opção Européia e Americana
Apenas uma fonte de incerteza	Múltiplas incertezas
Apenas uma opção	Múltiplas opções
Sem dividendos	Com dividendos
Preço corrente da ação	Valor Presente do Projeto
Ativo segue MGB	Ativo segue MGB
Preço de Exercício	Custo de Investimento
Taxa livre de Risco	Taxa livre de Risco

5.6 LIMITAÇÕES DAS OPÇÕES REAIS

Apesar de consistir em um método eficaz, capaz de complementar a avaliação de investimentos via fluxo de caixa descontado, a Teoria das Opções Reais vem sendo pouco utilizada, sobretudo pelos seguintes motivos (PESSOA, 2006; BRANDÃO, 2011):

- Consiste em um conhecimento relativamente novo, sendo utilizado principalmente no setor acadêmico;
- Apresenta relativa complexidade matemática;
- Requer que a fonte de incerteza seja uma commodity negociada no mercado, como, por exemplo, petróleo e ouro.

No entanto, essas limitações vêm sendo resolvidas, a partir de uma maior difusão das técnicas de opções reais, pelo desenvolvimento de softwares simuladores de interface amigável e pela possibilidade de uso da teoria de opções reais para produtos que não sejam commodities, desde que possuam uma elevada volatilidade de preços (PESSOA, 2006; BRANDÃO, 2011).

Adicionalmente, do ponto de vista técnico, a analogia entre opções reais e financeiras apresenta as seguintes limitações (MILLER & PARK, 2002; MELIN, 2008; COPELAND, 2001):

- Elevada dificuldade de modelagem dos retornos dos ativos reais, que apresentam comportamentos mais complexos que as opções, incorrendo no uso de processos estocásticos alternativos;
- Elevada volatilidade dos ativos reais, com falta de informações detalhadas sobre o histórico das variáveis. Isso gera a necessidade de estimativa desses parâmetros via simulação de Monte Carlo, aumentando tanto a complexidade da análise quanto a incerteza envolvida nessa;
- As receitas a serem obtidas com a execução do projeto, que correspondem aos dividendos da opção, são desconhecidas e fonte de elevada incerteza, diferentemente do que ocorre com as opções financeiras, nas quais o dividendo costuma ser pago com antecedência ou pode ser mais facilmente modelado.

Entretanto, apesar das limitações previamente citadas, a Teoria das Opções Reais, pelos motivos já expostos, consiste em uma das mais modernas técnicas de avaliação de investimentos atualmente empregadas, merecendo assim ser objeto de estudos.

CAPÍTULO 6: ESTUDO DE CASO

O estudo de caso desenvolvido no presente trabalho consiste na avaliação técnico-econômica de um projeto de eficiência energética aplicado ao sistema de geração e distribuição de ar comprimido de uma indústria de mineração de ferro.

Inicialmente, é apresentada a motivação para a realização do projeto. Em seguida, é feita uma análise técnica do projeto, englobando definições, ganhos potenciais e outras informações pertinentes para o entendimento do estudo.

Posteriormente, é realizada a avaliação econômica do projeto, seguindo a metodologia descrita por COPELAND (2001), a qual apresenta quatro passos:

- 1º Passo: cálculo do valor presente líquido e demais variáveis de engenharia econômica, usando o método do fluxo de caixa descontado, sem flexibilidade. Em seguida, são realizadas análises de sensibilidade e de cenários com o intuito de encontrar as variáveis-chave da análise, as quais passarão por um estudo mais aprofundado;
- 2º Passo: modelagem das incertezas do projeto, utilizando simulação de Monte Carlo;
- 3º Passo: identificação e incorporação da flexibilidade gerencial na tomada de decisão, a partir da criação de uma árvore de decisões;
- 4º Passo: proceder à análise via Teoria das Opções Reais, visando avaliar a viabilidade do projeto quando sujeito a diferentes flexibilidades gerenciais, como adiamento e expansão.

6.1 MOTIVAÇÃO

Conforme discutido no item 3.4.9, o ar comprimido é amplamente utilizado nas indústrias de mineração, sendo empregado, por exemplo, no acionamento de válvulas pneumáticas, canhões de desobstrução de desviadores de fluxo e em filtros de disco. Apesar da enorme importância para o processo mineral, os sistemas de ar comprimido, muitas vezes, não recebem a devida atenção e manutenção, o que gera, além de um ar comprimido de baixa qualidade, um elevado consumo energético.

O sistema de ar comprimido da empresa relativa a este estudo de caso apresentava várias evidências de descaso para com as boas normas de funcionamento, podendo-se destacar:

- Ar comprimido com excesso de umidade;
- Ar comprimido com grande quantidade de óleo e outros contaminantes;
- Elevada quantidade de vazamentos;
- Falta de padronização na sinalização das tubulações;
- Ausência de documentação do sistema, tais como isométricos, plantas, fluxogramas e consumo de clientes;
- Excesso de curvas e reduções de diâmetros;
- Ausência de purgadores nos pontos mais baixos da tubulação;
- Falta de manutenção nos principais equipamentos do sistema;
- Admissão de ar dentro da própria sala do compressor;

- Não utilização do secador, sendo utilizado o by-pass (contorno) desse;
- Não divisão de ar de instrumento com ar de processo;
- Não adequação da configuração do sistema e da qualidade do ar de instrumento à norma ISA Standard S7.0.01 - Quality Standard for Instrument Air;
- Pressão inferior à requerida em alguns clientes, dificultando o funcionamento;
- Pressão superior à requerida em alguns clientes, diminuindo a vida útil desses.

Diante do cenário acima descrito, nota-se a necessidade de um estudo do sistema de ar comprimido do cliente, visando otimizá-lo e reduzir o consumo energético. Adicionalmente, além dos critérios técnicos, o projeto também objetiva obter retornos econômicos que compensem os esforços gastos em seu desenvolvimento.

6.2 AVALIAÇÃO TÉCNICA DO PROJETO

Buscando resolver os problemas acima elencados e visando melhorar a qualidade do ar comprimido existente na planta, foi realizado um projeto completo de engenharia multidisciplinar, envolvendo conceitos de Processo, Tubulação, Máquinas, Instrumentação, Elétrica e Civil. Durante o desenvolvimento do Projeto, foi realizada uma série de levantamentos de campo e de entrevistas com operadores, além do levantamento de dados historiados, buscando um maior conhecimento dos problemas enfrentados pelo cliente.

Desse modo, o projeto de melhoria do sistema de ar comprimido envolveu as seguintes etapas:

- Elaboração e revisão de a toda documentação de engenharia do sistema, englobando isométricos, plantas, fluxogramas, dentre outros;
- Manutenção nas tubulações para eliminação dos vazamentos, seguindo a ordem de criticidade determinada pelos responsáveis da área;
- Manutenção geral no sistema de geração de ar comprimido;
- Reforma da sala que abriga o compressor de ar, visando proteção contra poeira fina e jatos de água;
- Canalização do ar para admissão oriundo de fora da sala;
- Aquisição de um novo secador, uma vez que o existente não estava em condições de ser reformado;
- Adequação da distribuição de ar, retirando linhas não utilizadas e adequando materiais, diâmetros e trajetos da tubulação;
- Adequação da purga dos reservatórios de ar e nos pontos mais baixos da tubulação;
- Levantamento dos clientes de ar comprimido e seus respectivos consumos;
- Estudo e dimensionamento adequado das pressões das linhas de ar comprimido, buscando garantir pressões da linha próximas às exigidas pelos clientes de ar;
- Padronização da sinalização da tubulação de ar comprimido, utilizando a cor azul, conforme definido na norma NR 26 – Sinalização de Segurança;
- Inclusão de instrumentos para garantir a qualidade do ar de acordo com norma ISO – 8573 – Ar Comprimido para Uso Geral – Parte 1: Contaminantes e

Classes de Qualidade, tais como filtro coalescente e medidor de ponto de orvalho na saída do secador;

- Separação entre o ar de instrumentação e o ar de processo, conforme requisitado pela norma ISA Standard S7.0.01. Essa medida deve ser efetuada, uma vez que o ar de instrumento necessita de uma melhor qualidade para não danificar os instrumentos e o custo para isso é relativamente elevado, não sendo viável tratar, de forma desnecessária, o ar de processo;
- Estudo do tipo e dimensionamento do conjunto de compressores adequados para o sistema;
- Realização de treinamento junto à operação e à manutenção, explicitando a importância da utilização correta do sistema.

Posteriormente, após a finalização das etapas de Engenharia, foi efetuada a montagem do projeto, seguindo todas as recomendações de Saúde e Segurança do cliente, assim como a Operação Assistida e o *As-Built*. É importante ressaltar que para garantir o funcionamento adequado do sistema de ar comprimido, foram previstas manutenções regulares e periódicas do sistema, buscando garantir a sustentabilidade da operação.

6.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA TRADICIONAL DO PROJETO

Para proceder à avaliação econômica do projeto, utilizando a abordagem convencional, foram, inicialmente, estimados o investimento e os ganhos a serem obtidos. Em seguida, a partir da montagem do fluxo de caixa, foram calculadas as variáveis de engenharia econômica e, posteriormente, elaboradas análises de sensibilidade e de cenário.

6.3.1 ESTIMATIVA DO INVESTIMENTO

Os dados para a estimativa do investimento foram obtidos a partir de cotações com fornecedores de produtos e serviços, além de projetos de engenharia previamente realizados. Como os projetos elaborados apresentam grau de confidencialidade limitado, foram apresentadas apenas as estimativas de forma macro, separadas por materiais e serviços, conforme apresentado na Tabela 6.1. No item materiais, estão contidos todos os equipamentos, instrumentos, tubulações, dentro outros produtos necessários para a montagem do projeto. Já dentro de serviços estão incluídas todas as etapas de engenharia e execução, assim como de planejamento. O investimento em materiais será todo efetuado no segundo ano do projeto, enquanto o investimento em serviços será dividido entre o primeiro e o segundo ano em uma proporção de 3:1.

Tabela 6.1 – Estimativa do Investimento para o Projeto

Descrição	Investimento (R\$)
Materiais	375.000,00
Serviços	450.000,00
TOTAL	825.000,00

6.3.2 ESTIMATIVA DOS GANHOS

Além da estimativa do investimento a ser despendido para a montagem do fluxo de caixa do projeto, também é necessário estimar os ganhos obtidos. Para o projeto em questão, é realizada a análise baseada em eventos discretos, que consiste na avaliação da redução de ocorrência de eventos operacionais indesejáveis durante o processo de produção. A ocorrência desses eventos pode ser visualizada pelo PIMS (*Plant Information Management System*) ou a partir de informações dos operadores. Considerou-se uma margem de lucro igual a R\$50,00/tonelada de minério de ferro

produzido, valor obtido pela média das margens entre os anos de 2006 e 2009, conforme solicitado pela empresa cliente do presente estudo de caso. Assim, a melhoria do sistema de ar comprimido apresenta os seguintes ganhos tangíveis:

- Redução do tempo de parada devido ao travamento de válvulas;
- Redução do tempo de parada devido à desativação de filtros a disco;
- Redução do tempo de parada devido ao mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo;
- Redução do consumo energético do sistema.

A perda de produção devido ao travamento de válvulas pode ser calculada a partir do tempo de atraso que a falha de cada válvula acarreta no bombeamento da polpa de minério. Multiplicando-se esse tempo de atraso pela taxa mássica de polpa que circula nas bombas críticas para o processo, pode-se obter a perda de produção por hora, que é transformada para base anual, considerando-se 250 dias de trabalho por ano. A partir dos dados coletados, estimou-se, com a ajuda de especialistas e dos técnicos da planta, que apenas 5% dos eventos selecionados poderiam ser solucionados e que a execução do projeto seria capaz de reduzir essas paradas em 50%. Dessa forma, multiplicando-se esses valores, encontra-se o ganho anual estimado devido à redução do travamento de válvulas. Essas informações estão compiladas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Ganho estimado devido ao não travamento de válvulas

TAG da Bomba	Tempo de parada de produção (h/dia)	Vazão na respectiva bomba (t/ano)	Ganho estimado (t/ano)	Ganho estimado (R\$/ano)
B-001	0,5	120	375,00	18.750,00
B-002	0,75	120	562,50	28.125,00
B-003	0,5	250	781,25	39.062,50
TOTAL			1.718,75	85.937,50

Já a perda de produção relativa à redução do tempo de parada dos filtros a disco existentes no processo pode ser calculada a partir do tempo no qual os filtros ficaram desativados. A partir desses dados, encontrados no PIMS, considerou-se que 20% dessas paradas foram ocasionadas devido à baixa pressão do ar comprimido e que o projeto seria capaz de reduzir essas paradas em 80%. Assim, conhecendo-se o tempo de parada, a porcentagem de falhas devido à baixa pressão de ar e a taxa de sucesso prevista para o projeto, estima-se o aumento de produção proporcionado pela redução nas paradas, conforme apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Ganho estimado devido à redução de paradas de filtros a disco

TAG do Filtro	Horas paradas, com baixa pressão na linha de ar (h/ano)	Produção no filtro (t/h)	Ganho estimado (t/ano)	Ganho estimado (R\$/ano)
F-001	35	180	1.008,00	50.400,00
F-002	40	100	640,00	25.600,00
TOTAL			1.648,00	82.400,00

Adicionalmente, deve também ser calculado o ganho de produção devido à redução do tempo de parada devido ao mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo. Para isso, deve-se partir dos dados históricos do tempo de parada dos equipamentos devido a entupimentos e limpeza dos canhões de ar e da produtividade média dos circuitos. Assim, considerando-se que 10% dos entupimentos ocorrem devido a uma má qualidade do ar de instrumento e que, com a realização do projeto, 50% desses eventos deixarão de ocorrer, obtém-se o ganho de produção por meio da redução do mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo, conforme apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Ganho estimado devido à redução do mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo

TAG do Circuito	Produtividade Média dos Circuitos (t/h)	Tempo Médio de Parada (h/ano)	Ganho estimado (t/ano)	Ganho estimado (R\$/ano)
Circuito A	1000	10	500,00	25.000,00
Circuito B	500	20	500,00	25.000,00
TOTAL			1.000,00	50.000,00

Finalmente, deve ser calculado o ganho relativo à redução do consumo de energia elétrica. Para isso, deve-se analisar o consumo elétrico do sistema de geração e os vazamentos existentes na distribuição de ar comprimido. A partir de testes na planta, encontrou-se a quantidade de ar comprimido perdido por vazamentos, que corresponde a 30% da capacidade do sistema. Com a implantação do projeto, objetiva-se reduzir esse percentual para 10%, valor de referência para sistemas de ar comprimido. Dessa forma, conhecendo-se a redução de consumo a ser obtida e o valor do kWh consumido (R\$0,13/kWh), pode-se calcular o montante anual economizado com a realização do projeto, conforme apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Ganho estimado devido à redução do consumo de energia elétrica

Consumo Energético (kWh/ano)	Redução no percentual de vazamento (%)	Ganho estimado (kWh/ano)	Ganho estimado (R\$/ano)
1.080.000	20	216.000,00	28.080,00
TOTAL		216.000,00	28.080,00

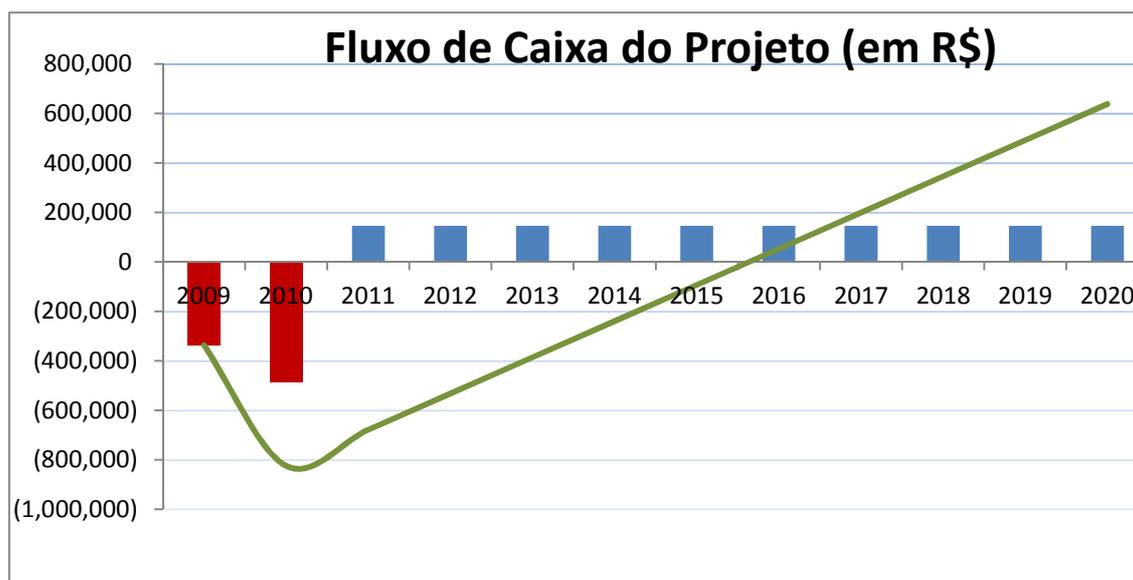
Portanto, o ganho foi estimado utilizando análise baseada em eventos discretos, contando com opiniões de especialistas e fatores empregados em outros projetos de engenharia. A compilação dos ganhos a serem obtidos com a realização do projeto está apresentada na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Estimativa dos Retornos para o Projeto

Descrição	Retorno (R\$/ano)
Redução do tempo de parada devido ao travamento de válvulas	85.937,50
Redução do tempo de parada devido à desativação de filtros a disco	82.400,00
Redução do tempo de parada devido ao mau funcionamento do sistema de desentupimento de desviadores de fluxo	50.000,00
Redução do consumo energético do sistema	28.080,00
TOTAL	246.417,50

6.3.3 MONTAGEM DO FLUXO DE CAIXA

O fluxo de caixa para o projeto em questão pode ser visualizado na Figura 6.1. Conforme será posteriormente detalhado, os valores negativos, relativos aos dois primeiros anos, correspondem aos investimentos necessários para a realização do projeto. Já os períodos subsequentes, começando em 2011 e terminando em 2012, representam os ganhos associados ao projeto. A reta, por sua vez, consiste no fluxo de caixa acumulado do projeto ao longo de sua vida útil.

**Figura 6.1 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Tradicional**

O fluxo de caixa para a análise tradicional do projeto é apresentado na Tabela 6.7, sendo o fluxo de caixa (FC_t), para cada período, definido pela Equação 6.1.

$$FC_t = (-Investimento + EBITDA - IRPJ - CSLL)_t \quad \text{(equação 6.1)}$$

Tabela 6.7 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Tradicional

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Período	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Investimentos (R\$)	-337.500	-487.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aumento de receita (R\$)	-	-	218.337,50	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5	218.337,5
Redução de custos (R\$)	-	-	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080
Aumento de custos (R\$)	-	-	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000
EBITDA (R\$)	-	-	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5	202.417,5
Depreciação (R\$)	-	-	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500
Base Tributável (R\$)	-	-	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5	164.917,5
Imposto de Renda (IRPJ) (R\$)	-	-	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38	-41.229,38
Contribuição Social (CSLL) (R\$)	-	-	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58	-14.842,58
Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	-337.500	-487.500	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55	146.345,55
Fluxo de Caixa Acumulado (R\$)	-337.500	-825.000	-678.654,45	532.308,90	-385.963,35	-239.617,80	-93.272,25	53.073,30	199.418,85	345.764,40	492.109,95	638.455,50

Para a montagem do fluxo de caixa deste estudo foram utilizados os parâmetros definidos nos subitens seguintes.

6.3.3.1 INVESTIMENTOS

O investimento a ser realizado para a execução do projeto foi previamente discutido no item 6.3.1, totalizando um montante de R\$ 825.000,00. Não serão necessários empréstimos e nem capital de giro para o desenvolvimento do projeto.

6.3.3.2 RECEITAS

As receitas a serem obtidas com a realização do projeto correspondem aos ganhos de produção e energéticos discutidos no item 6.3.2, totalizando o valor de R\$ 246.417,50 anuais.

6.3.3.3 GASTOS

Serão considerados como gastos os custos relativos ao aumento do gasto com a manutenção necessária para garantir os ganhos estimados no projeto. Estimou-se que um técnico, de salário mensal de R\$ 2.000,00 e cujos encargos trabalhistas sejam iguais ao valor do salário, ficará parcialmente responsável pela manutenção do sistema de ar comprimido da planta. Adicionalmente, considerou-se que serão gastos R\$ 20.000,00/ano para fornecimento de peças e acessórios para o sistema. Os gastos anuais do projeto encontram-se resumidas na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Gasto necessário para manutenção do sistema de ar comprimido

Descrição	Custo anual (R\$/ano)
Mão-de-Obra	24.000,00
Materiais	20.000,00
TOTAL	44.000,00

O resultado obtido pela diferença entre receitas e gastos é apresentado no fluxo de caixa sob a forma do EBITDA (*Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization*), ou seja, o lucro obtido antes que sejam descontados juros, impostos, depreciação e amortização.

6.3.3.4 TRIBUTOS

No estudo de caso apresentado, apenas foram aplicados sobre a base tributável o imposto de renda e a contribuição social sobre o lucro líquido, conforme Tabela 6.9. É importante ressaltar que outros impostos, tais como Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), já estão incluídos na estimativa dos investimentos.

Tabela 6.9 – Tributos incidentes sobre a Base Tributável

Tributo	Alíquota (%)
Imposto de Renda (IRPJ)	25
Contribuição Social (CSLL)	9

6.3.3.5 DEPRECIAÇÃO

Foi considerada uma depreciação linear para todos os equipamentos empregados no projeto ao longo do período de vida útil desses. Assim, a depreciação para cada ano é obtida dividindo-se o investimento em materiais pela vida útil do projeto. A soma da depreciação com o EBITDA gera a base tributável, sob a qual incidem os tributos previamente discutidos.

6.3.3.6 TEMPO DE VIDA ÚTIL

De acordo com a previsão de vida útil dos equipamentos e instrumentos pertencentes ao projeto, foi considerado um tempo de vida útil de 10 anos, ou seja,

os ganhos associados serão percebidos até uma década após a execução do projeto.

6.3.3.7 TAXA DE DESCONTO

Foi adotada uma taxa de desconto de 12%, correspondente ao custo médio ponderado do capital (WACC) da empresa em questão.

6.3.3.8 CONVERSÃO DE DÓLARES EM REAIS

Para a conversão de dólares para reais, foi considerado que um dólar equivale a dois reais. Esse valor consiste na taxa de conversão usualmente praticada pela empresa cliente do estudo de caso apresentado.

6.3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO PROJETO

Com o intuito de avaliar a viabilidade do projeto, são, inicialmente, destacados os direcionadores do negócio associados. Posteriormente, são calculados e analisados os indicadores de engenharia econômica, dentre eles o Payback, VPL e TIR.

6.3.4.1 DIRECIONADORES DO NEGÓCIO

Conforme discutido no item 4.4.1, os direcionadores de negócio consistem nas metas de uma organização, representando o planejamento estratégico dessa. Com o desenvolvimento do presente projeto, os seguintes direcionadores são impactados:

- Volume de produção: diminuição da perda de produção devido à redução de eventos indesejáveis, ocasionados pela ineficiência e baixa qualidade do sistema de ar comprimido, tais como travamento de válvulas, desativação de filtros e

entupimento de desviadores de fluxo. O aumento de produção estimado foi de 4.366,75 toneladas por ano;

- Custo operacional: redução de custos de manutenção corretiva e reposição de peças em instrumentos pneumáticos, como, por exemplo, o desgaste prematuro de válvulas. Em contrapartida, os custos de manutenção preditiva devem ser aumentados;
- Meio-ambiente: a diminuição do consumo energético incorre em uma diminuição da quantidade de CO₂ produzido na proporção de 0,1404 tonelada de CO₂ para 1 MWh (MCT, 2011). Como foram economizados 216.000 kWh/ano, o que equivale a 216 MWh/ano, deixaram de ser produzidas 30,33 toneladas de CO₂ por ano;
- Segurança e saúde ocupacional: com a melhoria do sistema de ar comprimido, os equipamentos e instrumentos pneumáticos passam a ter uma maior confiabilidade, o que aumenta a segurança da planta. Adicionalmente, diminui a necessidade de se desemperrar válvulas à base de força bruta, aumentando a saúde ocupacional dos trabalhadores;
- Consumo energético específico: a redução do consumo energético devido à melhoria do sistema de ar comprimido, juntamente com o aumento de produção da planta, resulta em uma redução do consumo energético específico. Como a produção total da planta e o consumo total de energia elétrica não são conhecidos, não é possível quantificar a redução no consumo energético específico.

É importante ressaltar que alguns dos direcionadores destacados não foram incluídos no subitem de estimativa de ganhos por serem intangíveis, não podendo

assim ser expressos em dinheiro, como, por exemplo, a melhoria nas condições de saúde e segurança dos trabalhadores.

6.3.4.2 PERÍODO DE *PAYBACK*

A partir das informações do fluxo de caixa, pode-se calcular o período de *payback*, ou seja, o tempo que será necessário para se recuperar o capital investido. A partir das Equações 4.1 e 4.2, novamente apresentadas, foram calculados, respectivamente, os valores de *payback* simples e descontado.

$$\sum_{t=0}^T (Rt - Ct) = I$$

(equação 4.1)

$$\sum_{t=1}^T \frac{(Rt - Ct)}{(1 + i)^t} = I$$

(equação 4.2)

Sendo:

T = Período de recuperação (*payback*)

t = tempo, período do fluxo de caixa

Rt = Receitas no tempo t

Ct = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 6.10. Posteriormente, esses valores foram comparados com o tempo definido pela organização para a recuperação do investimento, que, para o presente projeto, foi de 10 anos, de forma que se pode concluir que o projeto em questão é viável.

Tabela 6.10 – Compilação da Análise via período de *Payback*

Tipo de Payback	Tempo de Payback (anos)	Projeto viável?
Simple	3,82	Sim
Descontado	5,41	Sim

6.3.4.3 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

De forma análoga ao cálculo do período de *payback*, para o cálculo de VPL utilizou-se o fluxo de caixa feito no item 6.3.3. Assim, a partir da equação 4.3, novamente apresentada, calcula-se o valor presente líquido do projeto.

$$VPL = I + \sum_{t=1}^T \frac{(Rt - Ct)}{(1 + i)^t}$$

(equação 4.3)

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

T = Período de vida útil

t = tempo, período do fluxo de caixa

Rt = Receitas no tempo t

Ct = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

Caso esse valor seja maior ou menor que zero, o projeto é, respectivamente, atrativo ou não-atrativo. Logo, a partir das informações relativas à análise pelo VPL, apresentadas na Tabela 6.11, conclui-se que o projeto é inviável.

Tabela 6.11 – Análise Econômica do Projeto por meio do Valor Presente Líquido (VPL)

VPL (R\$)	Projeto viável?
-34.477,68	Não

6.3.4.4 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Adicionalmente, para avaliar a viabilidade econômica do projeto, foi utilizado o método da taxa interna de retorno. Para isso, utilizando-se a equação 4.4, novamente apresentada, calcula-se a TIR do projeto.

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^T \frac{(R_t - C_t)}{(1 + TIR)^t}$$

(equação 4.4)

Sendo:

TIR = Taxa Interna de Retorno

VPL = Valor Presente Líquido

T = Período de vida útil

t = tempo, período do fluxo de caixa

R_t = Receitas no tempo t

C_t = Custos no tempo t

I = Investimento inicial

i = Taxa de juros

Esse valor é então comparado com a taxa mínima de atratividade (TMA), a partir da qual a organização está disposta a investir na realização do projeto. Para o presente projeto, foi considerada uma TMA de 12,0%, de modo que o projeto não foi considerado viável. As informações relativas à análise pela taxa interna de retorno estão apresentadas na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Compilação da Análise via Taxa Interna de Retorno

TIR (%)	Projeto viável?
10,99	Não

6.3.4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após se calcular a variável de engenharia econômica é necessário proceder a uma análise de sensibilidade visando identificar as variáveis críticas na construção do fluxo de caixa, ou seja, aquelas que apresentam maior influência na viabilidade do projeto. Para isso, mantendo as demais variáveis constantes, variaram-se, hipoteticamente, alguns parâmetros sobre três condições (esperada, 10% superior e 10% inferior) e avaliou-se o resultado dessa alteração no VPL do projeto e, conseqüentemente, na decisão do investimento, conforme apresentado na Tabela 6.13 e na Figura 6.2. Conforme se pode observar, de modo geral, o VPL do projeto é negativo, sendo positivo apenas para cenários otimistas da margem de lucro e do custo de serviços.

Tabela 6.13 – Análise de Sensibilidade do VPL (em R\$) do Projeto

Variável	Pessimista	Esperado	Otimista
Margem de lucro	-107.175,24	-34.477,68	38.219,88
Investimento - Materiais	-78.272,32	-34.477,68	9.316,96
Investimento - Serviços	-67.959,82	-34.477,68	-995,54

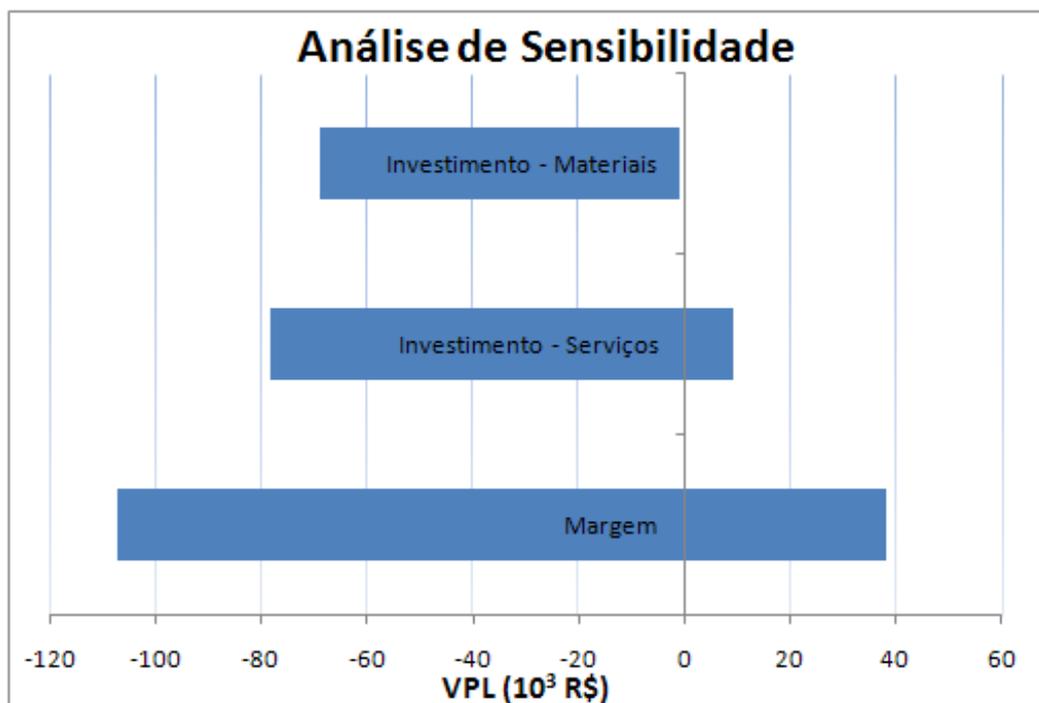


Figura 6.2 - Análise de Sensibilidade da Viabilidade do Projeto

Conforme se pode notar na Figura 6.2, a variável mais crítica para a análise da viabilidade do projeto consiste na margem de lucro. Para cenários pessimistas dessa variável, o projeto torna-se bastante inviável, enquanto que, em perspectivas otimistas, tem-se um projeto viável, com VPL igual a R\$ 38.219,88. Já para a variável relativa ao investimento de materiais, verifica-se na análise de sensibilidade que o projeto é, de maneira geral, inviável tanto para cenários otimistas quanto para otimistas. Por último, na análise de sensibilidade relativa ao custo dos serviços, conclui-se que o projeto se torna viável apenas em cenários muito otimistas, ou seja, para um baixo preço de investimento em serviços.

É importante ressaltar que a taxa de conversão de dólares em reais, que foi assumida como uma premissa no item 6.3.3.8, poderia ter sido incluída na análise de sensibilidade, sendo, conseqüentemente, mais analisada no presente estudo de caso. Entretanto, essa incorporação incorreria em um aumento da complexidade do

modelo, implicando na necessidade de estudos mais aprofundados. Dessa forma, optou-se por empregar o valor comumente utilizado pela empresa cliente.

6.3.4.6 ANÁLISE DE CENÁRIOS

Na análise de cenários deve-se avaliar o comportamento das variáveis de engenharia econômica em relação à variação de um conjunto de parâmetros críticos para a viabilidade do projeto. Os resultados obtidos a partir da análise de cenários estão apresentados na Tabela 6.14 e na Figura 6.3.

Tabela 6.14 – Análise de Cenários do VPL (em R\$) do Projeto

Cenário	Descrição	VPL (R\$)
A	Margem de lucro, Materiais e Serviços - Otimista	115.496,66
B	Margem de lucro - Otimista Materiais e Serviços - Pessimista	-39.056,91
C	Margem de lucro - Pessimista Materiais e Serviços - Otimista	-29.898,46
D	Margem de lucro, Materiais e Serviços - Pessimista	-184.452,03

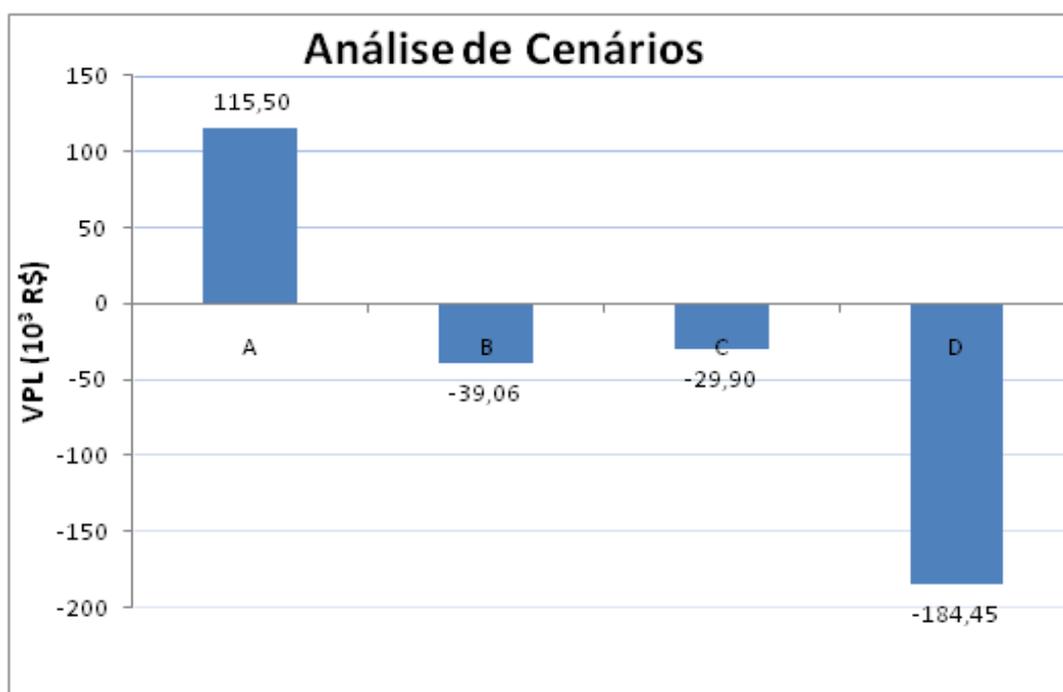


Figura 6.3 - Análise de Cenários da Viabilidade do Projeto

Conforme se pode verificar na Figura 6.2 e na Figura 6.3, apesar de os custos de materiais e serviços serem importantes para a análise da viabilidade do projeto, a variável crítica consiste na margem de lucro. Portanto, apenas essa variável foi considerada em uma análise mais complexa, via Teoria das Opções Reais.

6.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA VIA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS

Devido à sensibilidade do VPL em relação às variáveis críticas e ao fato de o VPL tradicional do projeto estar bastante próximo de zero, torna-se necessário realizar uma análise mais completa da viabilidade do projeto. Dessa forma, visando complementar a abordagem tradicional de avaliação de investimentos, foi realizada uma análise via Teoria das Opções Reais. Para isso, nos subitens subseqüentes, serão estudados com mais detalhes o preço do minério de ferro e as flexibilidades existentes, etapas fundamentais para a avaliação completa do projeto.

6.4.1 PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO

Para proceder à avaliação via Teoria das Opções Reais, deve-se, inicialmente, refinar a análise da variável crítica - margem do minério de ferro. Foi definido no item 6.3.2 que a margem líquida a ser considerada para a avaliação tradicional da viabilidade do projeto seria de R\$ 50,00/tonelada. No entanto, esse valor, considerado estático nas análises econômicas convencionais, é função do preço de venda do minério e do custo de produção desse. Para o estudo em questão, considerou-se que o custo de produção por tonelada de minério de ferro independe da capacidade produzida e da realização do projeto, sendo considerado constante. Assim, o custo de produção foi fixado em R\$ 50,00/tonelada de minério produzida.

Já o preço do minério, conforme previamente discutido, é bastante variável, podendo impactar significativamente no processo de decisão.

O preço do minério de ferro no mercado não pode ser tecnicamente definido como uma commodity, uma vez que não é comercializado em bolsa de valores, mas sim, negociado anualmente entre mineradoras e consumidores. No entanto, tem apresentado significativas variações nos últimos anos, como se pode observar na Figura 6.4, obtida a partir da Tabela 2.8.



Figura 6.4 – Variação anual do Preço do Minério de Ferro

6.4.2 DETERMINAÇÃO DA VOLATILIDADE

Tendo conhecimento das variações do preço nominal do minério de ferro, é importante quantificar a volatilidade desse bem, com o intuito de identificar os riscos que essa grandeza pode causar à viabilidade do projeto. Assim, com base nos valores presentes na Tabela 2.8, calculou-se o desvio padrão, utilizando a respectiva função no Excel®, para os preços do minério de ferro de 1981 a 2010, obtendo-se

25,36%. Caso se considere apenas o período de menor volatilidade, desconsiderando-se o ano de 2010, obtém-se uma volatilidade de 16,99%. Dessa forma, optou-se por retirar do cálculo da volatilidade o valor de 2010, trabalhando-se assim com uma volatilidade de 16,99%.

Adicionalmente, é importante destacar que caso a taxa de conversão de dólares em reais fosse incorporada ao modelo como uma incerteza, ocorreria o consequente aumento da volatilidade, o que aumenta a complexidade do modelo, implicando em uma distribuição do preço do minério de ferro ainda mais difícil de ser prevista. Desse modo, como previamente discutido, optou-se por utilizar a taxa de conversão padrão adotada pela empresa cliente.

6.4.3 PREVISÃO DE VARIAÇÃO DO PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO

Devido à significativa volatilidade do preço do minério de ferro nos últimos anos, é de se esperar que sua taxa de crescimento varie de ano a ano. A expectativa para o crescimento do preço do minério de ferro, feita com base em previsões do mercado, está apresentada na Tabela 6.15. Como o preço do minério de ferro, nos anos anteriores à elaboração do projeto, havia aumentado bastante, a perspectiva para os próximos anos é de redução do preço.

Tabela 6.15 – Previsão para Preço do Minério de Ferro – adaptada de UBS (2011)

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Período	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa de Crescimento (α)	-	-14%	-8%	-18%	-6%	-35%	-2%	-4%	-4%	-4%	0%
Preço (R\$/t)	92,56	65,05	151,29	123,79	116,91	75,65	74,27	71,52	68,77	66,02	66,02

6.4.4 FLUXO DE CAIXA DETERMINÍSTICO

Conhecendo-se a taxa de variação prevista para o preço do minério, procedeu-se a uma revisão do fluxo de caixa do projeto, conforme apresentado na Figura 6.5. A montagem detalhada do fluxo de caixa está presente na Tabela 6.16.

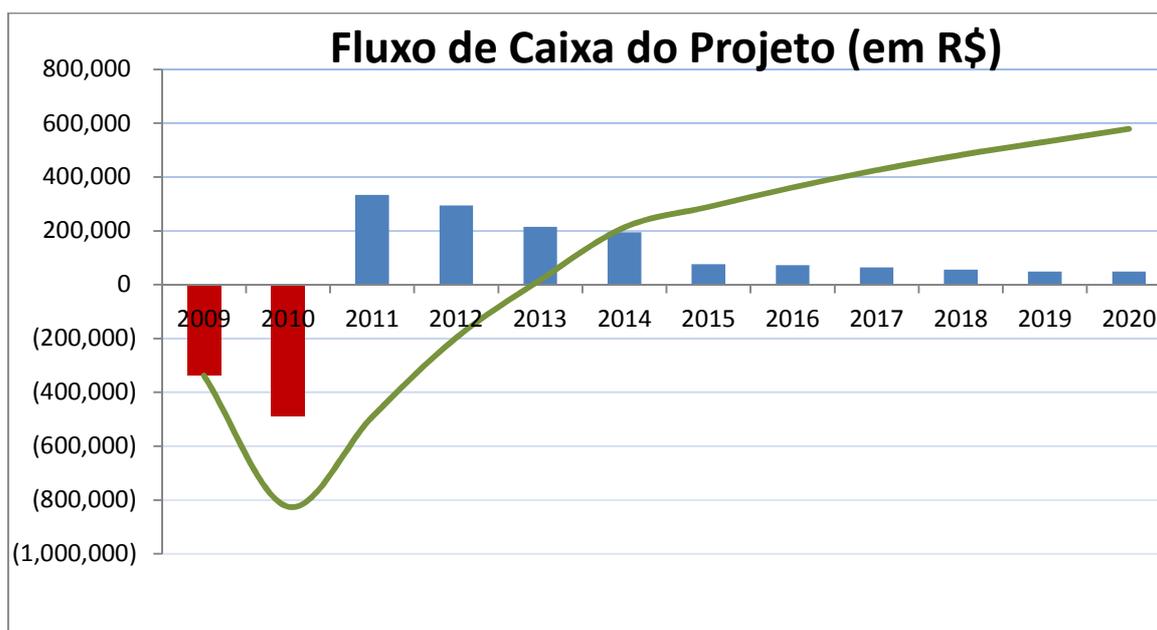


Figura 6.5 – Fluxo de Caixa Determinístico do Projeto

Tabela 6.16 – Fluxo de Caixa do Projeto – Análise Determinística

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Período	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Investimentos (R\$)	-337.500	-487.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aumento de receita (R\$)	-	-	502.385,85	442.325,57	322.205,02	292.174,88	111.994,04	105.988,01	93.975,95	81.963,90	69.951,84	69.951,84
Redução de custos (R\$)	-	-	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080	28.080
Aumento de custos (R\$)	-	-	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000	-44.000
EBITDA (R\$)	-	-	486.465,85	426.405,57	306.285,02	276.254,88	96.074,04	90.068,01	78.055,95	66.043,90	54.031,84	54.031,84
Depreciação (R\$)	-	-	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500	-37.500
Base Tributável (R\$)	-	-	448.965,85	388.905,57	268.785,02	238.754,88	58.574,04	52.568,01	40.555,95	28.543,90	16.531,84	16.531,84
Imposto de Renda (IRPJ) (R\$)	-	-	-112.241,46	-97.226,39	-67.196,25	-59.688,72	-14.643,51	-13.142,00	-10.138,99	-7.135,97	-4.132,96	-4.132,96
Contribuição Social (CSLL) (R\$)	-	-	-40.406,93	-35.001,50	-24.190,65	-21.487,94	-5.271,66	-4.731,12	-3.650,04	-2.568,95	-1.487,87	-1.487,87
Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	-337.500	-487.500	333.817,46	294.177,68	214.898,11	195.078,22	76.158,86	72.194,89	64.266,93	56.338,97	48.411,02	48.411,02
Fluxo de Caixa Acumulado (R\$)	-337.500	-825.000	-491.182,54	197.004,86	17.893,25	212.971,47	289.130,34	361.325,22	425.592,15	481.931,12	530.342,14	578.753,15

Nota-se que o aprofundamento da análise da variável crítica levou a um fluxo de caixa diferente do obtido via análise tradicional. Devido ao maior preço de venda nos períodos iniciais do fluxo de caixa (de 2011 a 2014), as receitas obtidas são substancialmente superiores às receitas dos períodos subsequentes. Naturalmente, ocorreram também variações nas variáveis de engenharia econômica, conforme representado na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Compilação das Variáveis de Engenharia Econômica

Variável	Análise Determinística	Análise Tradicional
VPL	R\$ 97.022,04	-R\$ 34.477,68
TIR	16,09%	10,99%

Como se pode observar a partir dos valores de VPL e TIR calculados, o projeto, quando analisado sob a forma determinística, torna-se economicamente viável. Isso ocorreu pelo fato de o valor de margem padrão da empresa cliente deste estudo de caso, utilizado na análise tradicional, estar subdimensionado em relação aos preços atualmente praticados para o minério de ferro. Esse fluxo de caixa é denominado determinístico, uma vez que não leva em consideração o comportamento probabilístico da variável preço do minério de ferro.

6.4.5 COMPORTAMENTO DO PROCESSO ESTOCÁSTICO

Após a análise determinística, procede-se à modelagem do comportamento da variável preço, utilizando-se o processo estocástico de Wiener, também conhecido como movimento geométrico Browniano. Esse processo foi utilizado pelo fato de o retorno e a volatilidade do ativo serem constantes (COPELAND, 2001).

Conforme visto no item 5.5.1, para tempo discreto, sendo o tempo contado em anos, o preço do minério de ferro em cada ano depende apenas do ano anterior. Dessa forma, a partir da Equação 5.3, novamente apresentada, obteve-se o Movimento Geométrico Browniano para o preço do minério de ferro ao longo do tempo.

$$P_{t+1} = P_t + \alpha_t P_t + P_t \sigma_p \varepsilon,$$

(equação 5.3)

Sendo:

- P_t = preço do minério de ferro no tempo t ;
- α = taxa de crescimento do preço no intervalo dt ;
- σ_p = volatilidade do preço do minério;
- ε = pertencente à distribuição normal reduzida.

O MGB é apresentado na Figura 6.6, na qual cada linha representa um comportamento previsto para o preço do minério de ferro. Conforme se pode observar, o preço do minério de ferro pode atingir uma ampla faixa de valores, variando desde US\$12/dmtu até US\$270/dmtu.

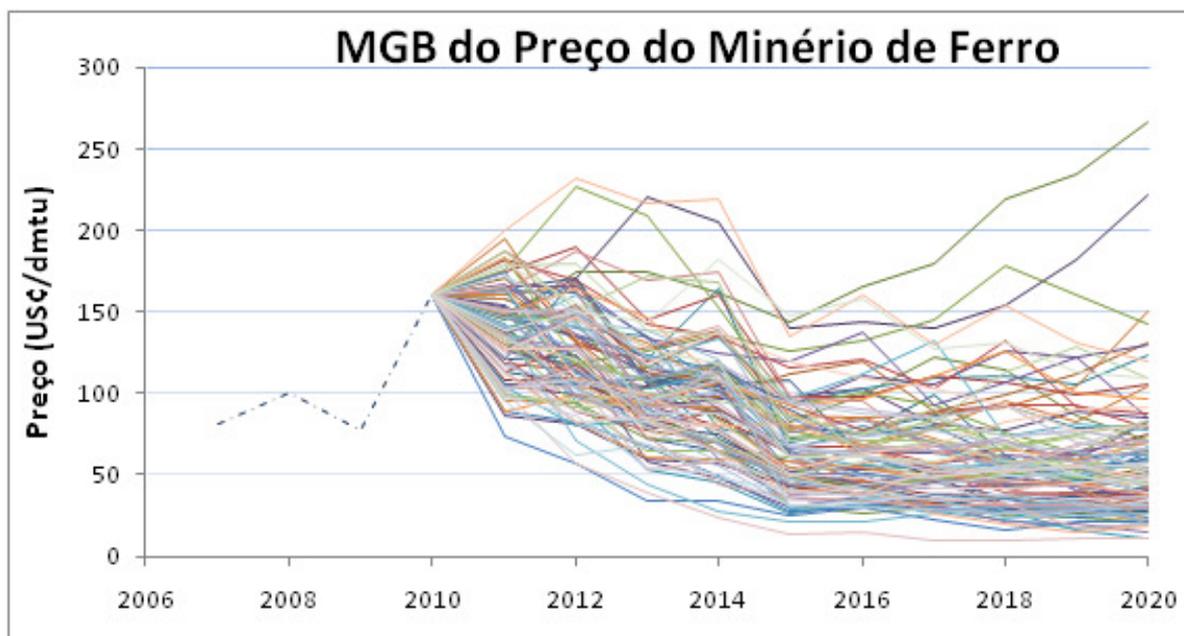


Figura 6.6 – MGB do Preço do Minério de Ferro

A partir da modelagem estocástica da variável crítica do projeto, ou seja, o preço do minério de ferro, procedeu-se a uma simulação de Monte Carlo na análise de viabilidade do projeto, com 100 simulações, obtendo-se a distribuição do VPL, conforme apresentado na Figura 6.7.

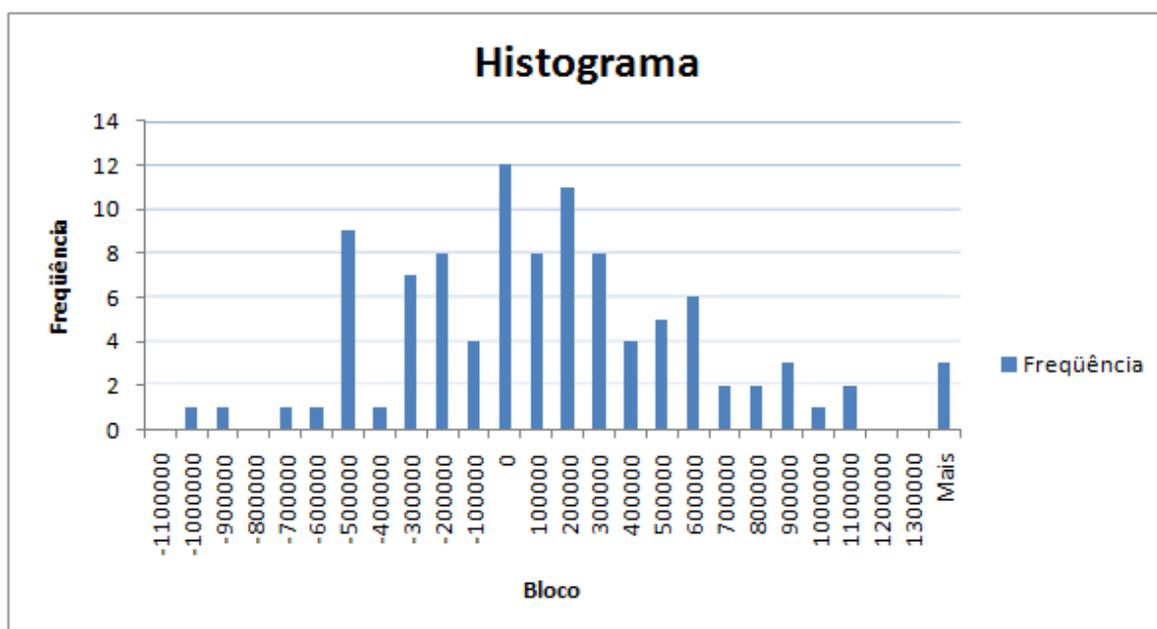


Figura 6.7 – Distribuição de Probabilidade do VPL do Projeto

A distribuição do VPL consiste em uma distribuição normal com média R\$ 97.161,90 e desvio padrão igual a R\$ 504.548,77, o que representa um valor de VPL, como esperado, próximo ao calculado via Fluxo de Caixa Determinístico. Adicionalmente, o valor encontrado para o desvio padrão evidencia a grande volatilidade do projeto, ocasionada pela elevada volatilidade do preço do minério de ferro.

6.4.6 MODELO BINOMIAL

Com o objetivo de montar a árvore decisão do projeto e, conseqüentemente, precificar as opções envolvidas, deve-se proceder a aproximação do Movimento Geométrico Browniano a partir de uma modelagem binomial do valor presente líquido do projeto.

A probabilidade de subida em um modelo binomial foi definida a partir do modelo de COX, ROSS e RUBINSTEIN (COX *et al.*, 1979 *apud* MELIN, 2008), conforme Equação 5.5, novamente apresentada.

$$p = \frac{(1 + r) - d}{u - d}$$

(equação 5.5)

Sendo:

- r = taxa livre de juros;
- u = parâmetro de subida do modelo binomial = $e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$;
- d = parâmetro de descida do modelo binomial = $e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$;
- Δt = incremento de tempo;
- σ = volatilidade do retorno do ativo.

Dessa forma, obteve-se uma probabilidade de subida (p) igual a 0,6041 e uma probabilidade de descida (1-p) igual a 0,3959, o que demonstra que, no modelo binomial, o preço do minério de ferro apresenta uma maior tendência a subir do que a descer. Já os parâmetros de subida (u) e de descida (d) valem, respectivamente, 1,1852 e 0,8438.

6.4.7 AVALIAÇÃO À TAXA LIVRE DE RISCO

Para proceder à montagem da árvore de decisão e à posterior análise via Teoria das Opções Reais, deve-se calcular o prêmio de risco do preço do minério de ferro. Para encontrá-lo deve-se partir da premissa de que o VPL da avaliação neutra ao risco é igual ao VPL tradicional.

Conforme visto no item 5.5.1, na análise neutra ao risco, a taxa de crescimento do preço do minério é dada por $\alpha_t - \lambda \sigma_p$, ao invés de, apenas, α_t . Dessa forma, sabendo-se que a taxa livre de risco praticada pelo cliente do projeto em questão é de 5% ao ano e utilizando-se a função “Atingir Meta”, do Excel[®], obtém-se o seguinte valor para o prêmio de risco: $\lambda \sigma_p = 2,405\%$.

6.4.8 ÁRVORE DE DECISÃO

Utilizando-se os parâmetros do Modelo Binomial, calculados no item 6.4.6, e os valores do preço do minério de ferro, à taxa livre de risco, pode-se montar a árvore binomial do preço do minério de ferro, livre de risco. A árvore de eventos representa o processo estocástico do preço do minério de ferro, gerando 2^{10} , ou seja, 1024 ramificações, representada na Figura 6.8.

	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
											1
Quantidade de vezes que o binomial valor aparece na árvore										1	274,54
Preço do Minério (R\$/t)								1	213,98	9	195,45
						1	173,07	7	152,34	36	139,15
				1	206,49	5	123,21	21	108,45	84	99,06
		1	189,30	4	108,54	15	97,61	56	85,65	210	
	1	201,13	3	147,01	10	87,72	35	77,21	126	70,53	
1	190,12	2	134,77	6	77,28	20	69,49	70	60,97	252	
192,56	1	143,19	3	104,66	10	62,45	35	54,97	126	50,21	
	135,35	1	95,94	4	55,02	15	49,47	56	43,41	210	
		101,94	1	74,51	5	44,46	21	39,13	84	35,75	
			68,31	1	39,17	6	35,22	28	30,90	120	
				53,05	1	31,65	7	27,86	36	25,45	
					27,88	1	25,07	8	22,00	45	
						22,53	1	19,83	9	18,12	
							17,85	1	15,66	10	
								14,12	1	12,90	
									11,15	1	
											9,18

Figura 6.8 – Representação da Árvore Binomial do Preço do Minério de Ferro

Com o intuito de efetuar a análise via teoria das Opções Reais, deve-se partir da árvore de decisão, sendo cada nó correspondente a um valor de incerteza do fluxo de caixa do projeto, oriundo da incerteza referente ao preço do minério de ferro. Desse modo, deve-se modelar o fluxo de caixa do projeto em função apenas da variável incerta. Assim, partindo-se da Equação 6.2 e efetuando-se as devidas manipulações algébricas, obtém-se a Equação 6.3.

$$FC_t = \left(-Investimento \times (1 + \%trib./vida\ útil) \right)_t + (EBITDA \times (1 - \%trib.))_t$$

(equação 6.2)

$$EBITDA = Aumento\ Prod._t \times Margem_t + Red.\ Custos_t - Aumento\ Custos_t$$

(equação 6.3)

Sendo:

- FC_t = Fluxo de Caixa no tempo t ;
- % trib. = alíquota relativa a tributos;
- Vida útil = período de vida útil, em anos;
- Aumento $Prod._t$ = Aumento de Produção no período t ;
- Red. Custos $_t$ = Redução de Custos no período t ;
- Aumento Custos $_t$ = Aumento de Custos no período t ;
- Margem $_t$ = Margem de venda do minério de ferro no período t ;

Assim, colocando o EBITDA em função apenas do preço do minério de ferro (P_t), chega-se na Equação 6.4.

$$FC_t = - \left(Investimento_t \times \left(1 + \frac{34\%}{10} \right) \right) + \left((4.366,75 \times (P_t - 50) + Red.\ Custos_t - 44.000) \times (1 - 34\%) \right)$$

(equação 6.4)

A Equação 6.4 depende apenas dos valores de preço do minério de ferro. Somente as variáveis Investimento e Redução de custos não foram substituídas na equação, uma vez que essas variáveis apresentam diferentes valores para diferentes períodos do fluxo de caixa, podendo variar, inclusive, com as opções existentes no projeto.

Dessa forma, a partir da árvore binomial, calculou-se, novamente, o VPL do projeto, para cada uma das 1024 ramificações, obtendo-se uma média de R\$ 96.949,55, valor bastante próximo ao obtido a partir da modelagem via MGB.

6.4.9 FLEXIBILIDADES EXISTENTES NO PROJETO

Conforme previamente discutido, as etapas de engenharia conceitual, básica e detalhada foram realizadas no primeiro ano do investimento, enquanto as etapas posteriores, tais como aquisições, implantação e operação assistida, realizadas no ano seguinte. Dessa forma, no nó de decisão existente entre essas duas macro-etapas, o gestor apresenta a flexibilidade de exercer a opção de adiar e de expandir o investimento. Adicionalmente, entre os períodos 4 e 5, existe a opção de expansão do projeto, caso as condições externas a justifiquem.

6.4.9.1 OPÇÃO DE ADIAMENTO DO INVESTIMENTO

Caso esteja-se prevendo para variável incerta do modelo, no caso, o preço do minério, um comportamento pessimista, mas com perspectivas de melhora, pode-se optar por adiar o investimento até que o cenário externo apresente condições que viabilizem o projeto. Dessa forma, entre os anos de 2009 e 2010, após já ter sido desenvolvido o projeto de engenharia, existe a opção de adiar o investimento na implantação até que o mercado esteja em condições mais favoráveis.

6.4.9.2 OPÇÃO DE EXPANSÃO DO INVESTIMENTO

Quando se prevê um cenário otimista, pode-se optar por expandir o projeto, implantando-o em outras instalações do cliente. É importante ressaltar que os custos

com materiais e serviços de execução deverão ser novamente desembolsados, enquanto os custos de engenharia serão reduzidos, devido ao aproveitamento de grande parte dos documentos e aprendizado obtidos com o projeto anterior. De qualquer modo, como cada projeto apresenta caráter único, ainda deverão ser previstos esforços para a adequação do projeto anterior à realidade do novo local de implantação do projeto. Adicionalmente, devido às diferentes condições de processo da planta, o cálculo dos ganhos a serem obtidos com o projeto também deve ser revisado.

As principais alterações que a opção de expansão acarreta no projeto são apresentadas na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Compilação das Informações da Opção de Expansão

Descrição	Valor
Investimento – Materiais	R\$ 275.000,00
Investimento - Serviços	R\$ 200.000,00
Ganho Energético	R\$ 20.000,00
Ganho de Produção	3.500,00 t/ano
Aumento de Custos	R\$ 30.000,00

6.4.10 ANÁLISE VIA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS

Após a avaliação determinística do projeto e a identificação das flexibilidades existentes, deve-se proceder à análise via teoria das Opções Reais. Na Figura 6.9, está representado um esquema com as opções de adiamento e expansão, inerentes ao estudo de caso. A discussão sobre essas opções do projeto são discutidas nos próximos subitens.

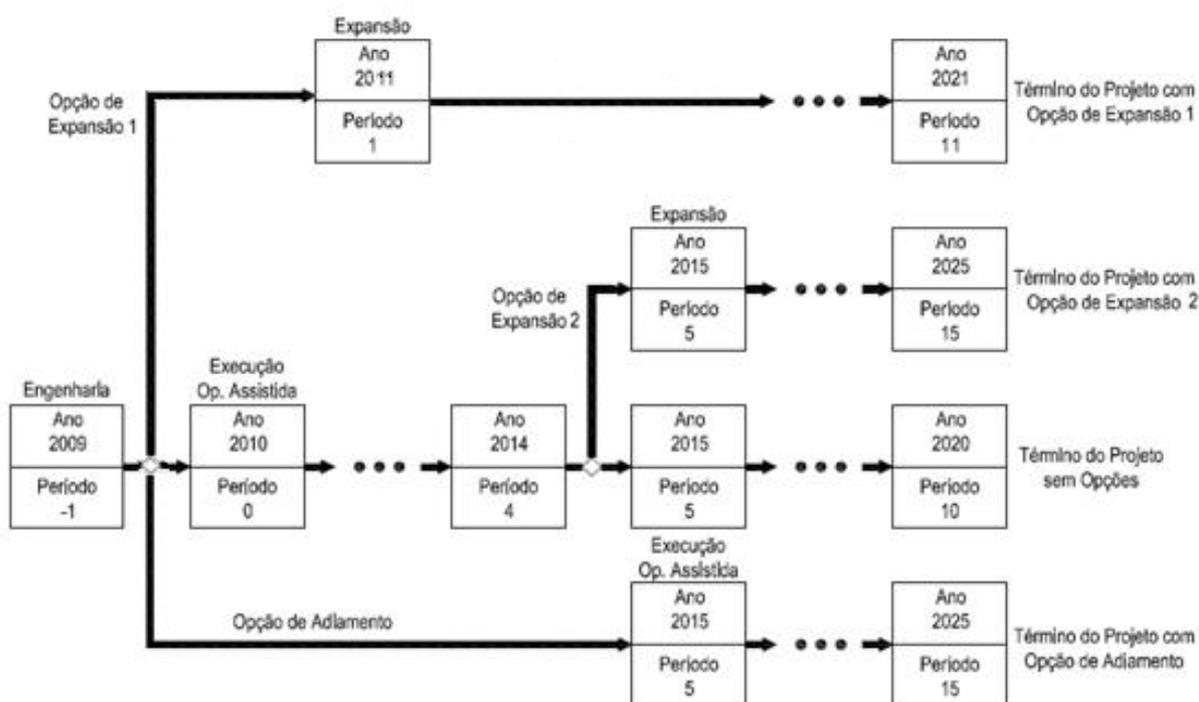


Figura 6.9 – Representação Esquemática das Opções do Projeto

6.4.10.1 ANÁLISE DA OPÇÃO DE ADIAR O INVESTIMENTO

Conforme previamente discutido, a opção de adiar o investimento pode ocorrer ao final do primeiro período do fluxo de caixa. Dessa forma, conforme se pode observar na Figura 6.9, a árvore de decisão apresenta um nó de decisão no tempo zero, podendo o gestor, nesse momento, decidir se adia ou não o investimento restante do projeto.

De acordo com a Tabela 6.15, a previsão de comportamento para o preço do minério de ferro indica que esse tende a reduzir, até se estabilizar R\$ 66,02/tonelada. Apesar de esse preço ser bastante inferior ao preço atual, ele ainda é suficiente para garantir uma margem de receita positiva na venda do minério de ferro. Dessa forma, de acordo com a previsão atual, mesmo nas piores condições de preço do minério de ferro, o projeto contribui positivamente para o VPL. Portanto, não há necessidade

de se quantificar a opção de adiamento do projeto, uma vez que essa apresenta valor negativo, não devendo ser exercida.

É importante ressaltar que caso haja alterações significativas no preço do minério de ferro, esse tipo de opção deve ser analisado e quantificado.

6.4.10.2 ANÁLISE DA OPÇÃO DE EXPANSÃO DO INVESTIMENTO

A opção de expansão do projeto pode ser exercida em dois momentos distintos, representada pelos nós existentes entre os períodos -1 e 0; 4 e 5, como mostrado na Figura 6.9. É importante destacar que as expansões são excludentes, ou seja, apenas uma, ou nenhuma, pode ser executada.

Assim, utilizando-se as informações relativas à expansão, presentes na Tabela 6.18, calcula-se o VPL do projeto, caso a opção de expansão seja exercida. Para a expansão 2, de forma análoga ao observado na opção de adiamento, a estabilização do preço do minério de ferro em R\$ 66,02 / tonelada, preço relativamente baixo, faz com que a opção de expansão não deva ser exercida. Devido à pequena margem do preço do minério de ferro entre os períodos 5 e 15, o VPL relativo ao projeto é negativo, apresentando o valor de -R\$ 11.891,05. Portanto, essa opção de expansão apresenta um valor de -R\$ 108.840,60, não devendo ser exercida.

Assim, conforme mencionado na opção de adiamento, deve-se destacar que essa opção deve ser novamente analisada caso existam mudanças na previsão do preço do minério de ferro.

Já para a expansão 1, como ela ocorre em períodos de elevado preço do minério de ferro, obtém-se um VPL de R\$ 219.427,62, de modo que a opção pode ser precificada em R\$ 122.478,07. Portanto, a primeira opção de expansão deve ser exercida, uma vez que agrega valor à tomada de decisão, o que é evidenciado pelo aumento do VPL.

6.5 COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta dissertação, foi realizada uma avaliação técnico-econômica de um projeto de eficiência energética aplicado ao sistema de geração e distribuição de ar comprimido de uma indústria de mineração de ferro. Inicialmente, foi discutida a solução técnica para o projeto, envolvendo motivação e ganhos envolvidos; e, posteriormente, realizou-se a avaliação econômica, partindo-se de análise tradicional e culminando na aplicação da Teoria das Opções Reais.

O projeto foi motivado devido à péssima qualidade do ar comprimido existente na planta, devido à falta de um projeto de engenharia e de manutenção adequados, o que acarreta perda de produção e aumento do consumo energético. Assim, com a elaboração do projeto apresentado, realizado de acordo com a metodologia FEL e seguindo as boas práticas preconizadas pelo PMI, foi possível adequar o sistema de ar comprimido, obtendo ganhos associados ao aumento de produção e à diminuição do consumo energético específico do sistema, que consistem em dois importantes direcionadores do negócio. Logo, uma vez que está em consonância com as diretrizes de eficiência energética e sustentabilidade da empresa, adequando-se ao plano estratégico, o projeto deve sim ser realizado do ponto de vista técnico.

Posteriormente, foi realizada a avaliação econômica do projeto. O primeiro passo consistiu na avaliação econômica tradicional do empreendimento. Para isso, montou-se o fluxo caixa e foram calculadas as variáveis de engenharia econômica, obtendo-se um VPL de -R\$ 34.477,68 e uma TIR de 10,99%, o que torna o projeto economicamente inviável. Foram também efetuadas análises de sensibilidade e de cenários, que apenas apresentaram VPL positivo para valores otimistas de margem e de investimento.

Feito isso, como o VPL do projeto estava próximo de zero, procedeu-se a uma análise mais complexa, aprimorando o estudo da variável mais sensível, ou seja, o preço do minério. Para isso, foi elaborado um estudo do comportamento previsto para o preço do minério de ferro, a partir de previsões existentes na literatura. Assim, montou-se um fluxo de caixa determinístico, obtendo-se um VPL de R\$ 97.022,04 e uma TIR de 16,09%, o que caracteriza o projeto como economicamente viável, sob as condições analisadas.

Entretanto, uma vez que o preço do minério de ferro está sujeito a um comportamento probabilístico, a análise econômica pode ser refinada a partir da modelagem da variável incerta via Movimento Geométrico Browniano. Desse modo, obteve-se um histograma com a distribuição probabilística do VPL, que apresentava média de R\$ 97.161,90, valor bastante próximo ao calculado pela análise determinística.

Em seguida, para efetuar a análise por opções reais, montou-se a árvore binomial de decisão do projeto e estudaram-se as flexibilidades existentes no projeto: opção de adiamento e opção de expansão. Verificou-se, então, que a opção de adiar o projeto, assim como a opção de expandi-lo apenas no período 5, não é benéfica,

não devendo ser praticada. Já a opção de expansão no período 1, por sua vez, agregou valor à decisão ao captar a flexibilidade gerencial, tendo um valor de R\$ 122.478,07, o que fez com que o VPL do projeto aumentasse para R\$ 219.427,62.

Em suma, ao longo deste trabalho, diversos fluxos de caixa foram montados, buscando-se sempre refinar a análise de engenharia econômica efetuada. A síntese das diferentes avaliações é apresentada na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – Síntese das Diversas Análises Efetuadas

Descrição do Fluxo de Caixa	VPL (R\$)
Tradicional	-34.477,68
Determinístico	97.022,04
Modelagem via MGB	97.161,90
Opção de Abandono	Prejudicial ao projeto - Não quantificada
Opção de Expansão 1	219.427,62
Opção de Expansão 2	-11.891,05

Portanto, diante do exposto, foi possível aplicar a Teoria das Opções Reais, empregando simulação de monte Carlo e árvores de decisão, para avaliar um projeto de eficiência energética em mineração, com o objetivo de complementar os métodos tradicionais de avaliação de investimentos comumente empregados.

Adicionalmente, é importante destacar que, mesmo o minério de ferro não consistindo, formalmente, em uma commodity, foi possível aplicar a Teoria das Opções Reais, uma vez que tem se observado um aumento na volatilidade dos preços desse minério.

Por fim, o crescimento da economia mundial, as rápidas mudanças tecnológicas e o aumento da demanda por minério têm impulsionado a realização de projetos em

indústrias minerais. Assim, com caixa suficiente para financiar vários projetos, é importante que as empresas desenvolvam ainda mais seus métodos de análise de investimentos, com o intuito de potencializar os projetos lucrativos e minimizar os empreendimentos deficitários. Por isso, torna-se crucial o estudo da Teoria das Opções Reais, aprimorando-se os estudo das incertezas e o conhecimento da flexibilidade gerencial envolvida nos projetos. Portanto, essa técnica deve ser incorporada ao processo de gestão de portfólio, visando reduzir os riscos associados ao investimento e promover projetos que, via análise tradicional, poderiam ser considerados inviáveis.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

Com a execução desta dissertação, puderam ser obtidas as seguintes conclusões:

- Comprovação da viabilidade técnica da realização de um projeto de engenharia, visando aumento da qualidade do ar comprimido de uma indústria de mineração de ferro;
- Avaliação econômica do projeto, a partir de variáveis econômicas tradicionais, como *payback*, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno, obtendo-se um VPL igual a - R\$ 34.477,68, demonstrando a inviabilidade econômica do projeto, sob as condições analisadas;
- Aprofundamento do estudo da variável de maior incerteza do modelo, o preço do minério de ferro, obtendo-se um VPL determinístico de R\$ 97.022,04, o que caracteriza o projeto como economicamente viável, sob as condições analisadas;
- Complementação da análise tradicional, utilizando modelagem da variável incerta, via Movimento Geométrico Browniano, resultando em um VPL de R\$ 97.161,90, valor bastante próximo ao calculado pela análise determinística;
- Mensuração das flexibilidades gerenciais de adiamento e expansão, utilizando a Teoria das Opções Reais, resultando, para o caso benéfico para o projeto (expansão no período 1), em um VPL de R\$ 219.427,62;
- Comprovação da agregação de valor ao processo de decisão devido ao uso da Teoria das Opções Reais, quantificado em R\$ 122.478,07, servindo como um complemento da análise de viabilidade tradicional.

CAPÍTULO 8: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente, é importante destacar que a Teoria das Opções Reais consiste em uma técnica moderna de avaliação de investimentos, não sendo, assim, bastante empregada no mundo corporativo. Dessa forma, como uma sugestão geral, mais trabalhos envolvendo esse tipo de análise devem ser realizados, visando disseminar ainda mais essa técnica e, conseqüentemente, criar uma visão benéfica sobre as incertezas.

Quanto ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, os seguintes pontos podem ser utilizados para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Utilização de softwares, como o DPL[®], para modelar as opções reais, e o Crystal Ball[®] ou @Risk[®], para o estudo das incertezas;
- Modelagem das incertezas por processos estocásticos diferentes do MGB, como, por exemplo, a reversão à média;
- Estudo das demais opções passíveis de existirem em um projeto de mineração, como abandono e contração;
- Estudo de outros tipos de projetos, mais complexos, e com maior número de variáveis incertas;
- Utilização da metodologia de opções reais na análise de projetos em outras indústrias de mineração, como de cobre, nas quais os produtos realmente consistem em commodities;
- Desenvolvimento de uma metodologia de gestão de portfólio que contemple a análise via Teoria das Opções Reais.

CAPÍTULO 9: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (ABEE). Disponível em: <www.abee.org.br>. Acesso em: 15/04/2011.

BALTAR, C. A. M. Flotação no Tratamento de Minério. Recife, 2008.

BASTOS JÚNIOR, G. M. Processos Mineraiis – Operações Auxiliares, Apresentação Interna – Chemtech, 2010a.

BASTOS JÚNIOR, G. M. Uso de Analisadores Químicos Online na Concentração de Minérios de Ferro. Monografia (Especialização), Departamento de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2010b.

BERTSEKAS, D. P.; TSITSIKLIS, J. N. *Introduction to Probability, Lecture Notes*, M.I.T., 2000.

BORTONI, E. C. SANTOS, A. H. M. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Capítulo 10 – Acionamentos com Motores de Indução Trifásicos. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

BRANDÃO, L. E. Introdução a Opções Reais – Notas de Aula. Disponível em: <<http://139.82.51.20/~brandao/MBA%20Op%C3%A7%C3%B5es%20Reais/Aulas/Aulas%20MBA%20OR.html>>. Acesso em: 10/06/2011.

BRANDÃO, L. E. T. Uma aplicação da teoria das opções reais em tempo discreto para valoração de uma concessão rodoviária. 2002. 132f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Industrial pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ), Rio de Janeiro, 2002.

BRASIL, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2009.pdf>. Acesso em: 29/04/2011.

BREALEY, R. A. Princípios de Finanças Corporativas / Richard A. Brealey, Stewart C. Myers, Franklin Allen; tradução Maria do Carmo Figueira, Nuno de Carvalho; revisão técnica Fabio Gallo Garcia, Luiz Alberto Bertucci. 8ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CARVALHO, F. B. Estimação de Ganhos Financeiros em Projetos de Automação e Controle - Uma Proposta Metodológica e Estudos de Caso. Dissertação (Mestrado), PPGEE - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2010.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CHAVES, A. P. & PERES, A. E. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios / Britagem, Peneiramento e Moagem, volume 3 - 2. ed. - São Paulo: Signus Editora, 2003.

CHAVES, A. P. (editor). Flotação: o Estado da Arte no Brasil - Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - São Paulo: Signus Editora, 2006.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios / Volume 2 - 2. ed. - São Paulo: Signus Editora, 2004.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 2. ed. - São Paulo: Signus Editora, 2002.

CHOMA, A. A. FEL e as Práticas de Gates para Projetos de Capital. Special Day Mundo PM – Projetos de Infraestrutura e Construção. Disponível em: <http://www.mundopm.com.br/eventos/infra/images/ppt/01a_AndreChomaSpecialDay_impressao.pdf>. Acesso em: 30/12/2010.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). Dicas de Eficiência Energética. Disponível em: <www.copel.com.br>. Acesso em: 25/04/2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Eficiência Energética na Indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília: 2009. Disponível em: <www.cni.org.br>. Acesso em: 27/04/2011.

COPELAND, T. E. Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos. / Tom Copeland, Vladimir Antikarov; tradução: Maria José Cyhlar. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

COX, J.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. *Option pricing: a simplified approach*. *Journal of Financial Economics*, v.7, 1979.

DAMODARAN, A. Finanças Corporativas: teoria e prática / Aswath Damodaran; trad. Jorge Ritter – 2ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – 4º Distrito – Pernambuco (DNPM-PE). Disponível em <<http://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>>. Acesso: 29/12/20.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. Economia Mineral do Brasil. Brasília, DF: DNPM, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. Sumário Mineral 2009. Volume 29. Junho, 2010.

DIAS, M. A. G. Análise de Investimentos com Opções Reais. Slides de Aula - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RJ. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/marco.ind/ind2072_2006.html>. Acesso em: 01/10/2011.

DOMINGOS, C. E. S. Estudo de Viabilidade Técnico-econômica para a Implementação de Unidades Produtoras de Propeno e Polipropileno, a partir do Gás Liquefeito de Petróleo produzido na Refinaria Gabriel Passos (Betim-MG), utilizando a Técnica de Opções Reais – Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, 2005.

ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY (EERE) - U.S. Department of Energy. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov/industry/mining/pdfs/iron.pdf>>. Acesso: 29/12/10.

ENGELESCO. O que é um projeto de Eficiência Energética? Disponível em: <<http://www.engelesco.com.br/index.php?q=node/9>>. Acesso em: 15/04/2011.

FERREIRA, J. C. G. Abordagem sobre o uso das opções reais na análise de projetos de investimentos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina). Florianópolis: UFSC, 2003.

FRIEDMANN, P. G. *Automation and control systems economics* - 2. ed. North Carolina: ISA, 2006.

FUERSTENAU, M. C. *Principles of Mineral Processing/* [edited by] Maurice C. Fuerstenau. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 2003.

FURNARI, F. Economia & Tecnologia da Energia – Conservação de Energia na Indústria. Rio de Janeiro: Marco Zero, 1985.

GRANT, E. L. *Principles of Engineering Economy*. 7th edition, 1982.

HESS, G.; MARQUES, J. L.; ROCHA PAES, L. C.; PUCCINI, A. Engenharia Econômica. 21ª Ed. – Editora Bertrand Brasil, 1992.

INDEPENDENT PROJECT ANALYSIS (IPA). *Individual Capital Project Services*. Disponível em: <<http://www.ipaglobal.com/Services/Individual-Capital-Project-Services>>. Acesso em: 19/02/2011.

LIMA, G. P. Requisitos para Definição de Projetos. Quarta PMI, 05/11/2008. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/gplima/palestra-sobre-fel-front-end-loading>>. Acesso em 19/03/2011.

LOBÃO, E. Proposta de Novo Marco Regulatório da Mineração. Comissão de Minas e Energia da Câmara dos Deputados. Ministério de Minas e Energia, 17/03/2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/noticias/Apresentaxo_Ministro_1903.pdf>. Acesso: 29/12/10.

LUECKE, R. Gerenciando Projetos Grandes e Pequenos / Richard Luecke; tradução Ryta Magalhães Vinagre – 2ª edição – Harvard Business Essentials. Rio de Janeiro: Record, 2010.

LUNA, N. A. Avaliação de Empresas utilizando a Teoria das Opções Reais: o caso de uma geradora de Energia Eólica. 2011. Dissertação (Mestrado em Economia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Porto Alegre: UFRGS, 2011.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; GUARDIA, E. C. (coordenação). Eficiência Energética: Teoria & Prática. 1a. ed - Itajubá, MG. FUPAI, 2007.

MARTINS, J. Curso de Introdução ao Beneficiamento de Minérios. Treinamento Interno - Chemtech, 2008.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia. Fatores de Emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. Disponível em:

<<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/327118.html#ancora>>. Acesso em: 19/11/2011.

MELIN, B. B. Análise das opções reais de um empreendimento de mineração utilizando simulação de monte carlo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia de Produção, 2008.

MILLER, L. T.; PARK, C. S. *Decision making under uncertainty – Real Options to the rescue? - The Engineering Economist*, v.47, n.2, 2002.

MINARDI, A. M. A. F. Teoria de opções aplicada a Projetos de investimento. São Paulo: Atlas, 2004.

MONGABAY. Tabela – Preço – Minério de Ferro. Disponível em: <http://pt.mongabay.com/commodities/iron_ore.html>. Acesso em: 20/11/2011.

MORAES, F. R. G. Contribuição ao estudo da concepção de projetos de capital em mega empreendimentos. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, 2010.

NOGUEIRA, F. H. F. M. Política de Ação: Eficiência Energética. Governo do Estado do Rio de Janeiro - Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Capítulo 3 – Auditoria Energética. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

PALISADE. *The Decision Tools Suite Industrial - Student Version*. Disponível em: <www.palisade.com/academic/students.asp>. Acesso em: 10/06/2011.

PAMPLONA, E. O. Opções Reais: uma alternativa para avaliação de investimentos em condições de risco - Apostila de Engenharia Econômica Avançada, UNIFEI:

2005. Disponível em: <<http://www.iepg.unifei.edu.br/edson/apostEE2.htm#ApostEEA>>. Acesso em: 05/05/2011.

PARK, C. S.; HERATH, H. S. B. *Exploiting uncertainty – investment opportunities as Real Options: a new way of thinking in engineering economics. The Engineering Economist*, v.45, n.1, 2000.

PATTERSON, M. G. *What is Energy Efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues. Energy Policy*, Vol. 24, No. 5, 1996.

PAULA, G. M. Consolidando Posições na Mineração. In: Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais. Minas Gerais do século XXI. v.5. Belo Horizonte: Rona Editora, 2002.

PAULA, T. N. Projetos de Indústrias Químicas – Notas de Aula. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, 1983.

PESSOA, G. A. Avaliação de Projetos de Mineração utilizando a Teoria das Opções Reais em Tempo Discreto: um estudo de caso em Mineração de Ferro. Rio de Janeiro: FGV/EBAPE, 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Fundação Getúlio Vargas, Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, 2006.

PETERS, M. S. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* / Max S. Peters. Klaus D. Timmerhaus – 4ª ed. – McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 1991.

PIRANI, M. J. VENTURINI, O. J. SIMOES, A. A. ALMEIDA, M. S. V. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Capítulo 8 – Refrigeração e Ar Condicionado. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

PROJECT MANAGMENT INSTITUTE (PMI). Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK). 4a ed. Pennsylvania: Autor, 2008.

RECEITA FEDERAL, IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados. Disponível em: <www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/legisassunto/impsobproindipi/impsobproindi pi.htm>. Acesso em: 02/06/2011.

SALUM, L. J. B. Energia Eficaz. Belo Horizonte: CEMIG, 2005.

SAMANEZ, C. P. Engenharia Econômica – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTIAGO, L. P. S. *et al.* Potencializando o planejamento de projetos: abordagem de uma metodologia de planejamento no contexto do padrão PMBOK. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 28. Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, E. M.; PAMPLONA, E. O. Teoria das Opções Reais: Aplicação em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). 2º Encontro Brasileiro de Finanças, Ibmec, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

SANTOS, J. F. C. Exploração da teoria das opções reais em aplicativos gerenciais computacionais no caso da opção swicht use. 1999. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ), Rio de Janeiro, 1999.

SANTOS FILHO, A. D. Teoria das Opções Reais aplicada a Projetos de Investimento em Prestação de Serviços de Tecnologia da Informação. 2003. Dissertação (Mestrado em Administração pela Fundação Getúlio Vargas). Rio de Janeiro: FGV, 2003.

SHUNTA, J. P. *Achieving world class manufacturing through process control*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

SILVA, A. T. Tratamento de Minérios. Volume I. Edições Engenharia. EEUFMG, Belo Horizonte, 1973.

SILVA, G. S. Metodologia de Projeto de Automação – CENTECH – Curso de Formação de Engenheiros da Chemtech, 2007.

SOUZA NETO, J. A. Opções Reais: introdução à teoria e à prática / José Antônio de Souza Neto, Luiz Carlos Bergamini Júnior, Virgínia Izabel de Oliveira. – Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

TAPIA, C. *Benchmarking* de Melhores Práticas para Projetos de Capital. Disponível em: <http://www.mundopm.com.br/eventos/infra/images/ppt/02c_Tapia_IPA-Infra_2010.pdf>. Acesso em: 31/12/2010.

TRIANANTIS, A.; BORISON, A. *Real options: state of the practice. Journal of Applied Corporate Finance*, v. 14, n. 2, 2001.

TRIGEORGIS, L.. *Real options: managerial flexibility and strategy in resource allocation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

UBS. *Investment Research - Global I/O: Iron Ore*. Disponível em: <www.wpgresources.com.au/pdf/Iron%20Ore%20Outlook%20UBS%2010%20Nov%202010.pdf>. Acesso em 19/11/2011.

UNCTAD - *United Nations Conference on Trade and Development. Commodities at a Glance* – March 2011. Disponível em: <http://www.unctad.org/en/docs/suc20112_en.pdf>. Acesso em: 20/11/2011.

VIANA, A. N. C. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. Capítulo 7 – Bombas de Fluxo e Ventiladores. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

VIDAL, A. P. Avaliação de Projeto de Mineração Aplicando a Teoria de Opções Reais - Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica - PUC-RIO, 2008.

WILLS, B. A. & NAPIER-MUNN, T. J. Mineral Processing Technology. 7ª Edição. Elsevier Science & Technology Books, 2006.

YAMACHITA, R. A. HADDAD, J. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Capítulo 6 – Iluminação. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.