

**FUNDAÇÃO INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISAS EM
CONTABILIDADE, ECONOMIA E FINANÇAS – FUCAPE**

LEONARDO BUSTAMANTE DE OLIVEIRA

**PROJETOS DE MINERAÇÃO: avaliação por opções reais sob
incerteza de preço do minério e câmbio**

VITÓRIA

2015

**FUNDAÇÃO INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISAS EM
CONTABILIDADE, ECONOMIA E FINANÇAS – FUCAPE**

LEONARDO BUSTAMANTE DE OLIVEIRA

**PROJETOS DE MINERAÇÃO: avaliação por opções reais sob
incerteza de preço do minério e câmbio**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Administração da Fundação Instituto Capixaba de Pesquisas em Contabilidade, Economia e Finanças (FUCAPE), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Administração de Empresas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Graziela Fortunato

**VITÓRIA
2015**

LEONARDO BUSTAMANTE DE OLIVEIRA

**PROJETOS DE MINERAÇÃO: AVALIAÇÃO POR OPÇÕES REAIS
SOB INCERTEZA DE PREÇO DO MINÉRIO E CÂMBIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Administração da Fundação Instituto Capixaba de Pesquisas em Contabilidade, Economia e Finanças (FUCAPE), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Administração de Empresas.

Aprovada em 01 de Outubro de 2015

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr.^a **Graziela Fortunato**
ORIENTADORA - FUCAPE

Prof. Dr. **Bruno Funchal**
FUCAPE

Prof. Dr. **Sérgio Bastos**
FUCAPE

Dedico este trabalho aos meus
filhos Luiz e Ivan pelos
momentos em que estive
ausente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Ivanna pelo irrestrito incentivo. Ela foi uma abnegada para que eu pudesse concluir esta difícil jornada acadêmica.

Meu agradecimento especial a prof.^a Dr.^a Graziela Fortunato por ter acreditado em mim e, sobretudo, por sua paciência.

Agradeço aos meus colegas de trabalho que não mediram esforços para que eu estivesse dedicado a este curso.

“É muito melhor prever mesmo sem certeza, a nada prever.”

Henri Poincaré

RESUMO

Projetos de mineração de ferro demandam um considerável montante de capital e são permeados por um nível elevado de incerteza. As principais incertezas são as que dizem respeito ao preço do minério e a taxa de câmbio praticada durante o projeto. Este estudo avalia a exploração de uma reserva de minério de ferro sob a ótica das Opções Reais e realiza uma análise de sensibilidade da volatilidade do preço do minério e do câmbio para entender o impacto no valor do projeto. O modelo desenvolvido considera duas opções europeias: abandono e expansão. Para análise do processo estocástico mais adequado foi realizado o teste de raiz unitária de *Dickey-Fuller* e o teste de razão da variância onde se indicou apropriado o tratamento da incerteza considerando a modelagem do preço do minério de ferro como um Movimento de Reversão à Média - MRM. Para obter a volatilidade, utilizou-se a simulação de Monte Carlo – SMC. A análise revelou que, tanto o preço do minério de ferro, como a taxa de câmbio podem determinar a viabilidade econômica de um projeto. Na análise de sensibilidade foi apurado que o câmbio influenciou em 53,8% o VPL do projeto e o preço 46,2%.

Palavras-chave: Opções reais. Simulação de Monte Carlo. Processo estocástico.

ABSTRACT

Iron mining project requires a considerable amount of capital and are permeated by a high level of uncertainty. The main uncertainties are those related to the price of ore and the exchange rate used during the project. This study evaluates the operation of an iron ore reserve from the perspective of real options and performs a sensitivity analysis of the volatility of the iron ore price and exchange rate to understand the impact on the project's value. The model considers two European options: abandonment and expansion. For analysis of the most appropriate stochastic process was performed unit root test of Dickey-Fuller and variance ratio test where indicated appropriate treatment of uncertainty considering modeling the price of iron ore as a Mean Reversion Movement - MRM. The numerical method is the Monte Carlo Simulation – MCS. The analysis revealed that both the price of iron ore, as the exchange rate might determine the economic viability of a project. In the sensitivity analysis, it was found that the influence of the exchange rate was 53.8% of the NPV of the project and the price of 46.2%.

Keywords: Real Options. Monte Carlo Simulation. Stochastic process.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	16
3.1. COLETA DOS DADOS	17
3.2. TRATAMENTO DOS DADOS.....	18
3.3. PREMISSAS.....	18
3.4. PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO	21
3.5. TAXA DE CÂMBIO	26
3.6. PREÇO DO MINÉRIO E TAXA DE CÂMBIO CONJUGADAS.....	28
4. RESULTADOS E ANÁLISES	31
4.1. EXEMPLO NUMÉRICO	33
4.2. OPÇÃO DE EXPANDIR.....	37
4.3. OPÇÃO DE ABANDONAR	40
4.4. DECISÃO POR MEIO DE ÁRVORES BINOMIAIS.....	42
4.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	43
5. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Preço do minério de ferro em dólares americanos	21
Gráfico 2 - Comportamento da série do minério de ferro	24
Gráfico 3 - Valor do Real frente ao Dólar	26
Gráfico 4 - Correlação entre preço do minério e taxa de câmbio	27
Gráfico 5 - Comportamento da série da taxa de câmbio	28
Gráfico 6 - Preço do minério de ferro em US\$ e BR\$.	29
Gráfico 7 - Teste da razão da variância do minério de ferro (R\$).....	30
Gráfico 8 - Avaliações pela Simulação de Monte Carlo	34
Gráfico 9 - Avaliações pela Simulação de Monte Carlo com Pressupostos Correlacionados	34
Gráfico 10 - Análise de sensibilidade das variáveis de incerteza	45

1. INTRODUÇÃO

Há 12 anos era baixo o interesse das empresas mineradoras em investir em projetos de mineração, pois a perspectiva de retorno do investimento era questionável. Neste mesmo período, a China emergia como grande demandante de minério de ferro (SUKAGAWA, 2010). De 2003 a 2014 o preço do minério aumentou mais de 1000%, chegando a US\$ 187 a tonelada em fevereiro de 2011 (PLATTS, 2015)¹.

Os preços elevados tornaram o mercado de minério de ferro atraente para entrantes que aumentaram a oferta para preencher o *gap* de demanda, obtendo, assim, sólidos lucros. No entanto, para justificar os investimentos de capital em novos projetos, há necessidade de que o preço da tonelada do minério corresponda ao montante investido posto que projetos de mineração de ferro possuem longa duração por natureza, com complexos trabalhos de engenharia e construção, podendo levar mais de 10 anos para entrarem em operação (CORREA e GRIMALDI, 2012).

Tradicionalmente, obtêm-se as informações acerca da viabilidade do projeto através das técnicas de avaliação conhecidas que fazem uso do fluxo de caixa descontado (FCD) onde são providos indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback*, que apoiam a decisão de investimento.

¹ PLATTS é uma divisão da McGraw-Hill Financial (NYSE: MHFI), líder em avaliações de crédito, referência em análises para os mercados de capitais e de *commodities* globais (www.platts.com). A McGraw-Hill Financial detém marcas conhecidas como Standard & Poor's Ratings Services, S&P Capital IQ, S&P Dow Jones Indices, CRISIL, e J.D. Power.

No entanto, a teoria clássica do fluxo de caixa descontado empregada na avaliação de projetos como o de mineração de ferro permeados por mudanças e incertezas já não é o mais adequado. À medida que novas informações são obtidas sobre as condições do mercado, o futuro fluxo de caixa é gradualmente compreendido. Sendo assim, a gestão possui flexibilidade para alterar sua estratégia operacional com o intuito de capitalizar oportunidades futuras favoráveis ou, até mesmo, diminuir perdas (TRIGEORGIS, 1996 ; HAQUE, 2014).

É neste contexto que está inserida a Avaliação por Opções Reais - AOR empregada em projetos de investimento em mineração de ferro. Apenas a análise pelo fluxo de caixa descontado pode, muitas vezes, subestimar o valor de um projeto pelo fato de não capturar apropriadamente os benefícios da flexibilidade gerencial (COPELAND e ANTIKAROV, 2001). O Valor Presente Líquido isolado deve ser considerado apenas quando não existam flexibilidades gerenciais. Portanto, há necessidade de que o modelo considere o valor das flexibilidades do projeto somando-se ao valor da VPL tradicional o valor da flexibilidade gerencial (TRIGEORGIS, 1996).

Como consequência, pesquisadores e profissionais utilizam a Teoria de Opções Reais (TOR) para avaliações de projetos de várias naturezas sob a incerteza de preço das *commodities*, considerando seu movimento estocástico (HAQUE, 2014).

Um projeto de mineração de ferro parte de pesquisas geológicas acompanhadas por um trabalho de engenharia e construção imediatamente anteriores ao início da extração, beneficiamento e transporte do minério. No período de pesquisa e implantação do projeto, este fica exposto à oscilação do valor do investimento, às incertezas do preço da *commodity* e da taxa de câmbio. Essa

situação resulta em um longo período entre o investimento e a geração de caixa, o que pode levar a gestões a conclusões equivocadas na avaliação da viabilidade econômica do projeto utilizando apenas o FCD. Isso pode impossibilitar a captação dos recursos financeiros necessários à implantação do projeto.

Independente ao negócio, a volatilidade na taxa de câmbio impacta um projeto caso este possua, apenas, custos na moeda local do projeto. Em mineração, isso ocorre pelo fato da depreciação da moeda local gerar efeitos positivos no fluxo de caixa do projeto onde as receitas são denominadas em dólares, enquanto o Custo dos Produtos Vendidos (CPV) é denominado na moeda local. Por outro lado, uma moeda doméstica valorizada faz com que os custos pressionem o caixa.

Há uma necessidade deste tipo de estudo empírico em países em desenvolvimento como o Brasil, com as taxas de câmbio variando no tempo, a fim de contrariar esta ambiguidade prevalente na literatura e preencher o vácuo de pesquisa nos países menos desenvolvidos.

Várias pesquisas têm considerado a incerteza de preços das *commodities* (Brennan e Schwartz (1985); Trigeorgis (1993); Moyen et al. (1996); Kelly (1998); Moel e Tufano (2002); Monkhouse e Yeates (2005); Abdel Sabour e Poulin (2006); Samis et al. (2006); Shafiee et al.(2009), Haque et al. (2014)). Na literatura recente apenas alguns poucos estudos incluindo Berman et al. (2012), Chatterjee et al. (2013), Amity et al. (2014) e, Burstein e Gopinath (2014) fornecem uma pesquisa mais atualizada acerca do relacionamento entre preços internacionais e taxas de câmbio.

Neste sentido, a TOR vislumbra o valor das flexibilidades no decurso do projeto como, por exemplo, alterar a escala operacional ou abandonar o projeto

conforme as condições e perspectivas do mercado no momento em que for exercida a opção (COPELAND e ANTIKAROV, 2001).

Considerando a flexibilidade gerencial de expansão, adiamento ou abandono, por meio da análise por opções reais de um projeto de mineração, qual será o valor da opção levando em conta as incertezas inerentes ao preço do minério e as incertezas sobre a variação da taxa de câmbio?

Não se encontrou uma pesquisa que estudasse as incertezas do preço do minério de ferro e da taxa de câmbio conjuntamente. Portanto, o objetivo deste trabalho é utilizar a metodologia de opções reais para avaliar as flexibilidades de expansão e abandono em um projeto de exploração de uma mina de ferro, considerando as incertezas inerentes ao preço do minério e a taxa de câmbio além de demonstrar, por meio da análise de sensibilidade, o impacto do preço do minério e da taxa câmbio sobre o valor do projeto.

Para simular a volatilidade do projeto usam-se técnicas de simulação, tal como a técnica de simulação de Monte Carlo cujo tema foi introduzido por Boyle (1977) a fim de modelar as incertezas. A abordagem pela simulação de Monte Carlo obtém a volatilidade de um projeto considerando as propriedades estocásticas e de correlação entre as variáveis que afetam o resultado. O resultado é uma estimativa de volatilidade do projeto, gerada a partir das incertezas individuais das variáveis insumo que compõem um projeto de investimento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Com consideráveis pesquisas neste campo, a abordagem da teoria das opções reais foi apresentada por Myers e Turnbull (1977) e Ross (1978), sendo aceita como um método adequado para ajudar a tomar decisões em projetos de recursos minerais sob condições de incerteza. Brennan e Schwartz (1985) aplicaram a teoria das opções reais no desenvolvimento de um projeto de mineração de cobre, Smith e Nau (1995) e Smith e McCardle (1998) analisaram projetos de desenvolvimento de recursos de hidrocarbonetos usando programação dinâmica e opção de preços. Ultimamente, pesquisadores investigaram a relação entre a tomada de decisões de investimento e fatores de incerteza como a incerteza de custo de operação (LIMA et al., 2006), incerteza de produção (EVATT et al., 2012), incerteza do custo total (DEHGHANI e ATAEE-POUR, 2012) e incerteza cambial (ABDEL SABOUR e POULIN, 2011) e (AHMED et al., 2012).

O conceito do uso de opções reais no setor de mineração surgiu primeiramente através de Brennan e Schwartz (1985). Nesse estudo, os autores introduziram um modelo estocástico de tempo contínuo e desenvolveram trabalhos teóricos para investimentos em recursos naturais.

Para resolver o problema de tempo contínuo, vários estudos fazem uso da equação de Black e Scholes (1973) para construção de novos modelos na tentativa de solucionar suas limitações e desenvolver adaptações para diferentes situações.

Uma alternativa conhecida é o modelo binomial desenvolvido por Cox, Ross e Rubinstein (1979) que usa árvores binomiais por meio de uma estrutura que permite mapear, por exemplo, as trajetórias possíveis do preço do minério, da taxa de câmbio e do valor do projeto.

Posteriormente foram realizados trabalhos sobre a teoria de opções reais na tomada de decisão de investimentos de recursos naturais Brennan e Trigeorgis

(2000), Copeland e Antikarov (2001), Dixit e Pindyck (1994), Trigeorgis (2000, 1996, 1993) e Topal (2008). Portanto, a literatura em torno das opções reais na arena de investimento de um projeto de mineração não é nova (HAQUE et al., 2014).

No mercado futuro² de *commodities*, a gerência tem a flexibilidade de alterar sua decisão de investimento em um projeto de mineração como, por exemplo, diferir, ou seja, esperar até que os preços justifiquem a construção da infraestrutura (BRENNAN e SCHWARTZ, 1985; BELLALAH, 2001; COLWELL et al., 2003; CORTAZAR e SCHWARTZ, 1997; DIXIT e PINDYCK, 1994). De acordo com Bellalah (2001), Cortazar e Schwartz (1997), uma empresa de mineração ao decidir investir em um projeto deve obter uma taxa de juros livre de risco igual a, pelo menos, o retorno mais o prêmio de risco do país onde está situado o projeto de mineração.

Para que se possa avaliar investimentos em reservas minerais como opções, torna-se necessária uma série de variáveis envolvidas às incertezas como: total da reserva disponível, custo estimado de desenvolvimento e exploração do projeto, tempo a decorrer até o vencimento da opção e variância do valor do ativo (DAMODARAN, 1999).

A incerteza da taxa de câmbio também é uma importante condição ambiental para os comportamentos de cobertura operacionais das empresas multinacionais (BELDERBOS e ZOU, 2009; CHUNG et al., 2010). Kogut e Kulatilaka (1994, pág. 129) argumentam que "quanto mais baixa for a correlação, maior será a contribuição para a volatilidade global e para aumentar o valor das opções subjacentes". Neste sentido, as correlações importam e a volatilidade contribui diretamente para

² Um mercado em que os participantes compram e vendem *commodities* por meio de contratos para entrega em uma data futura.

aumentar os valores do projeto. Isso implica que, mesmo sob o mesmo nível de incerteza global, os movimentos da taxa de câmbio entre os países podem ser heterogêneos, portanto, afetam o nível de flexibilidade operacional (CHEN et al., 2010; YING e ZHU, 2010; HENRIQUES e SADORSKY, 2011; BODART et al., 2012).

Normalmente, as incertezas presentes nos projetos são modeladas com o Movimento Geométrico Browniano (MGB), no entanto, em alguns casos, essas incertezas não podem ser modeladas pelo MGB. Este é o caso quando as variáveis modeladas dependem de um nível de equilíbrio, como é o de mercadorias não financeiras (BRENNAN e SCHWARTZ, 1985; PINDYCK, 1999, 2001). No caso dos preços de *commodities* assume-se que esses preços sigam um modelo de reversão à média - MRM (SCHWARTZ, 1997; SCHWARTZ e SMITH, 2000). No entanto, não há consenso sobre qual processo estocástico seja o mais adequado. Como Dixit e Pindyck (1994) sugerem, a definição do processo depende tanto de estatística como de considerações teóricas.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para atingir o objetivo deste trabalho, a metodologia aplicada é a de opções reais em um projeto de mineração onde é avaliada a flexibilidade de expansão e abandono do projeto levando em consideração o comportamento do preço do minério de ferro e da taxa de câmbio.

Na condição de tomador de decisão, o gestor avaliará o valor da opção de acordo com o preço da *commodity* e a taxa de câmbio praticada em determinado marco do projeto considerando a taxonomia das opções reais.

A partir dos dados do fluxo de caixa são empregados os parâmetros de entrada como: custos de operação, custo de logística, *royalties*, custos de encerramento, impostos dentre outros parâmetros que influenciem no valor total do projeto.

No presente trabalho são estudadas as duas incertezas não gerenciáveis do projeto que é o preço do minério e a taxa de câmbio. Uma vez que o comportamento do preço do minério de ferro está associado à taxa de crescimento de países como a China, a projeção do preço pode sofrer variações. Mesmo existindo uma operação de *hedge* para o preço minério de ferro no mercado financeiro, o retorno do projeto ainda será suscetível à variação do preço do minério.

3.1. Coleta dos dados

As séries do preço do minério de ferro foram obtidas de Platts (2015) por meio das séries históricas em bases mensais do preço do minério de ferro comercializado no mercado de 1995 a 2015. Considerando a série histórica dos preços do minério de ferro cabe ressaltar que, a partir de 2008, o modelo de negociação se deu pelo mercado à vista. Anteriormente a 2008, o modelo de negociação tinha como base a definição de um preço que valeria por um ano, ou seja, de dezembro a dezembro para países do ocidente e de abril a abril para países do oriente.

Os dados de câmbio (US\$ x R\$) foram obtidos do Banco Central do Brasil de 1995 a 2015 também em bases mensais. Optou-se por restringir ao período de 2008 a 2015 para acompanhar o mesmo período coletado para o preço do minério de ferro.

3.2. Tratamento dos dados

As ferramentas analíticas de simulação de Monte Carlo podem fornecer um entendimento da quantificação dos riscos inerentes em uma decisão de negócios, pois são utilizados números aleatórios para atribuir valores às variáveis de entrada (preço e câmbio) do qual se deseja investigar baseada no comportamento de sua distribuição. Sendo assim, são gerados, randomicamente, diversos valores para estas variáveis de entrada dentro da faixa que considera sua volatilidade. Conforme as combinações realizadas, retorna-se a variável de saída cujo foco deste estudo é o valor do projeto.

O processo de avaliação a ser utilizado se baseará na avaliação em quatro etapas desenvolvido por Copeland e Antikarov (2001) onde na primeira etapa se estima o valor presente por meio do fluxo de caixa livre, em seguida modelam-se as variáveis de incerteza, permitindo usar a simulação de Monte Carlo para gerar a distribuição de valores presentes. Isso permite identificar, por exemplo, que a volatilidade das variáveis do modelo não é igual a volatilidade do projeto.

3.3. Premissas

O preço do minério de ferro e a taxa de câmbio foram definidos como variáveis aleatórias.

A mina possui a capacidade de produzir 10 milhões toneladas de minério de ferro por ano (mtpa) e suas reservas totais, conforme estudos recentes estão estimadas em 200 milhões de toneladas. Portanto, de acordo com a produção anual planejada inicialmente, a mina poderá ter uma vida útil de até 20 anos.

Por questões legais e ambientais a extração nos primeiros 10 anos está limitada a 100 milhões de toneladas. Nos 10 anos seguintes, poderá extrair e

transportar outras 100 milhões de toneladas até que se esgotem definitivamente os recursos da mina.

Os investimentos iniciais contemplam apenas a capacidade de extração e escoamento da produção para um total de 10 milhões de toneladas por ano (mtpa) considerando os próximos 10 anos sendo que toda a infraestrutura logística está plenamente adequada ao escoamento da produção não existindo gargalos.

Os custos de produção são constantes ao longo de toda vida útil da mina, qual seja, 20 anos. Há variação nos custos dos produtos vendidos e influência da taxa cambial por se tratar de um produto em que a maior parte é exportada. Além destes fatores, existem outras variáveis características deste tipo de negócio que podem influenciar em sua volatilidade.

Todos os custos operacionais são referentes às atividades de mineração, tratamento e beneficiamento do minério, expedição, estocagem, transporte e embarque. Tais atividades de apoio operacional estão orçadas em R\$ 75,00 por tonelada.

Os investimentos serão realizados no primeiro ano do projeto da mina, da ferrovia e do porto, sendo R\$ 2 bilhões em custos de extração e operação e R\$ 500 milhões em logística, totalizando R\$ 2,5 bilhões.

As demais variáveis de entrada, relacionadas a aspectos técnicos e de custos do projeto foram consideradas determinísticas devido ao maior grau de certeza.

As premissas permitem a construção de um fluxo de caixa do projeto para utilização da Teoria das Opções Reais. Abaixo os dados necessários à elaboração do fluxo de caixa (Fase 1):

Tabela 1 – Dados do fluxo de caixa e dados complementares

Item	Definição
Reserva total	200 milhões de toneladas
Taxa média de produção de minério	10 milhões de toneladas por ano (aprox.)
Teor médio de ferro	62%
Volatilidade média do preço do minério de ferro	19,23%
Taxa de juros livre de risco	10%
Taxa de Câmbio	Valor do real (R\$) no momento t
(=) Receita Bruta	Preço de venda x Produção anual
(-) Impostos sobre venda	Não incide (exportação)
(-) Despesas logísticas	R\$ 45,00 / tonelada x Venda anual
(=) Receita Líquida	Receita Bruta – Despesas logísticas
(-) Royalties	2% sobre a receita líquida
(-) Despesas de custeio	R\$ 75,00 por tonelada
(-) Despesas administrativas	R\$ 5,00 por tonelada
(-) Depreciação e amortização	R\$ 15,00 por tonelada
(=) LAJIR	Base de cálculo do imposto de renda
(-) Imposto de renda	34%
(+) Depreciação	R\$ 15,00 por tonelada
(-) Investimentos correntes	1% sobre o faturamento bruto
(=) Fluxo de caixa	Resultado do fluxo de caixa

Fonte: Elaboração do autor com dados obtidos dos relatórios anuais do ano de 2014 das empresas BHP Billiton Fortescue, Glencore, Rio Tinto e Vale por meio de seus respectivos sites.

O fluxo de caixa descontado (FCD) está em valores reais, ou seja, não considera a inflação nas receitas e despesas.

Ao se utilizar o método tradicional do fluxo de caixa com uma taxa de desconto de 10% a.a.³ é possível chegar ao resultado do VPL de R\$ 156,75 milhões negativos.

³ Por não ser o enfoque principal deste estudo foi determinada, arbitrariamente, a taxa de desconto que pode ser considerada como a taxa mínima de atratividade de um projeto de mineração de ferro. O valor de 10% foi o resultado arredondado da média anual no Brasil de índices como: SELIC, poupança, CDB, títulos, IBOVESPA e inflação.

Os cálculos que determinaram os preços do minério são determinados pelos parâmetros utilizados na modelagem do MRM.

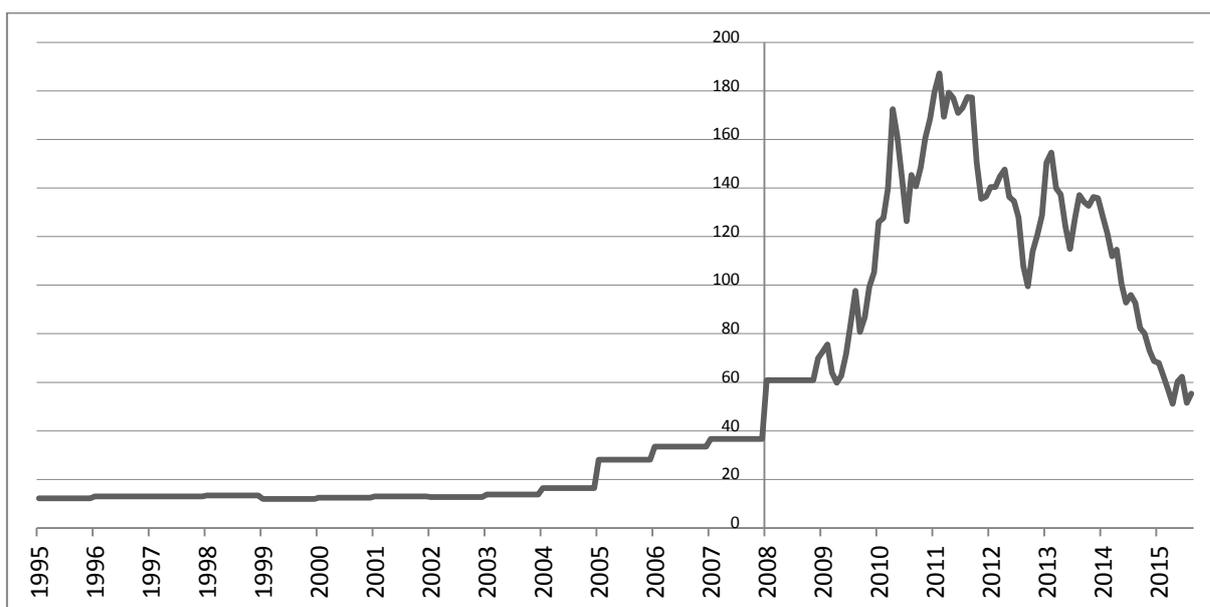
Tabela 2 - Parâmetros para projeção do preço do minério

Variável	Símbolo	Valor
Preço inicial	P_t	R\$ 68,00
Volatilidade	σ_{pt}	0,19
Velocidade de reversão à média	η	0,25
Preço médio de equilíbrio	\bar{P}	R\$ 52,00

3.4. Preço do minério de ferro

A partir do histórico de preços do minério de ferro é possível realizar uma simulação com os preços a serem praticados durante a vida útil da mina seguindo uma distribuição *lognormal*.

Gráfico 1 - Preço do minério de ferro em dólares americanos



Fonte: Platts.com. Elaboração do autor.

A necessidade de utilizar o logaritmo natural dos preços é que, geralmente, assume-se que *commodities* possuem uma distribuição *lognormal* de preços e estes não poderão ser negativos. Será adotado o processo estocástico de tempo contínuo posto que as mudanças de preços podem ocorrer a qualquer momento.

Na tentativa de determinar o processo de difusão estocástico seguido pelo preço do minério de ferro (PM) analisa-se a hipótese nula da existência de raiz unitária das séries de variação de preços pelo teste *Dickey-Fuller* (Wooldridge, 2003).

RESULTADO DO TESTE DE RAIZ UNITÁRIA PARA A SÉRIE DE PREÇOS DO MINÉRIO DE FERRO			
Hipótese Nula: O preço do minério possui raiz unitária			
Exógeno: Constante			
Defasagem: 0 (automático, baseado em SIC, MAXLAG = 11)			
		Estatística t	Prob.*
Teste de <i>Dickey-Fuller</i> estendido	Preço (PM)	-7.750717	0.0000
Valores críticos do teste	Nível de 1%	-3.512290	
	Nível de 5%	-2.897223	
	Nível de 10%	-2.585861	

* Estatística *p unicaudal* (MacKinnon, 1996)

Fonte: Elaborada pelo autor com dados executados no Eviews 8.

Quando o teste da raiz unitária é efetuado sobre o preço de ativos financeiros, a hipótese nula da raiz unitária dificilmente é rejeitada, ou seja, a série segue o MGB. Para *commodities*, Dixit e Pindyck (1994) e Pindyck (1999) só conseguem comprovar que os preços do petróleo não seguem o MGB para uma série de dados de 120 anos. Em séries menores de dados, em torno de 30 e 40 anos, os autores não conseguem rejeitar a hipótese nula. No entanto, Bastian-Pinto, Brandão e Alves (2008) e Dias (2008) defendem que, mesmo não sendo rejeitada a hipótese nula,

quando obtido $0 < b < 1$, há indícios de reversão à média. Além disso, fatores estilizados⁴ também devem ser considerados na escolha do modelo.

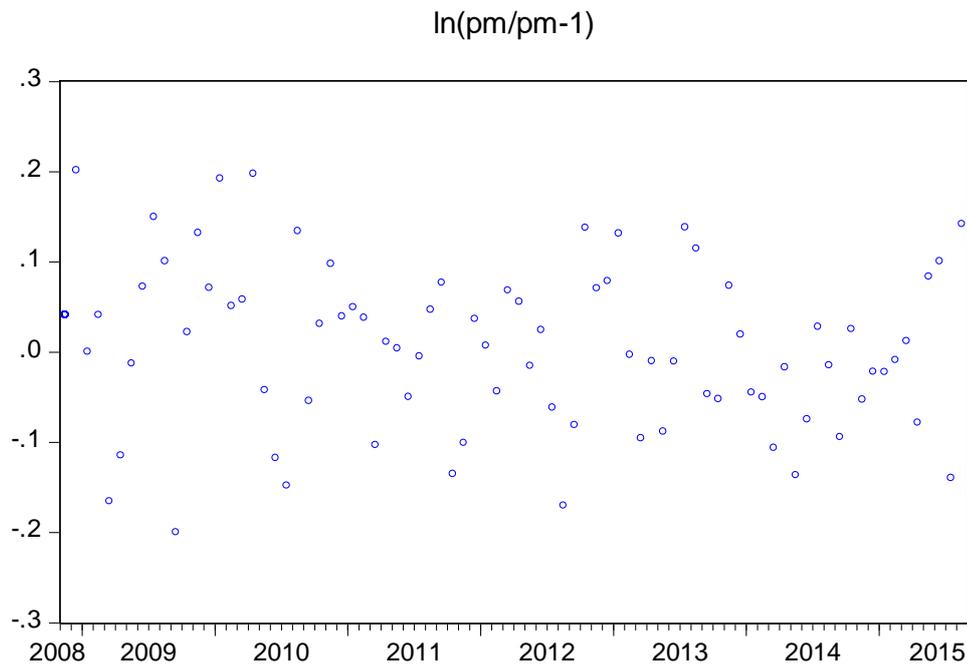
Aplicando o teste de raiz unitária a um nível de significância de 5% (valor crítico de -2,902), surgem evidências de que a série de variação dos preços do minério de ferro não possui raiz unitária. O comportamento das séries está ilustrado no Gráfico 2. Desta forma, a série de variação de preços do minério de ferro pode ser modelada pelo Movimento de Reversão à Média (MRM).

A lógica do MRM vem da microeconomia: quando os preços estão deprimidos, a demanda da *commodity* tende a aumentar sendo que a produção tende a diminuir. Isso se deve ao fato que o consumo de uma *commodity* com preço baixo aumenta enquanto os baixos retornos para as empresas produtoras as levam a postergar os investimentos ou fechar unidades menos eficientes reduzindo, assim, a disponibilidade do produto. O oposto ocorre se os preços estiverem altos ou acima da média em longo prazo (BASTIAN-PINTO, 2009).

Neste caso o MRM é, portanto, o movimento mais adequado para descrever o comportamento de preços de *commodities*, que, no longo prazo, acabam retornando ao nível médio de preço. Neste trabalho, a série de tempo é curta referindo-se à variação de preços do minério de ferro.

⁴ Um fator estilizado é uma aproximação teórica de um fenômeno observado empiricamente.

Gráfico 2 - Comportamento da série do minério de ferro



A forma mais simples de um MRM é o processo de fator único Ornstein-Uhlenbeck (OU), também conhecido por MRM Aritmético e é definido:

$$dP_t = \eta (\bar{P} - P_t)dt + \sigma dz_t \quad (2)$$

em que:

P_t = variável estocástica do preço do minério de ferro no período de tempo dt , dado por $\ln(PM)$;

\bar{P} = média de longo prazo da variável estocástica do preço do minério dada por

$$\frac{\ln(\overline{PM}) - \sigma_{PM}^2}{2\eta}$$

η = velocidade de reversão à média da variável estocástica;

σ_{pt} = volatilidade do processo;

$dz_t = \varepsilon\sqrt{dt}$; processo de Wiener em que $\varepsilon_t \approx N(0,1)$;

dt = incremento de tempo do processo.

Os parâmetros da média e da variância do processo MRM Aritmético (Ornstein-Uhlenbeck) são respectivamente (Dixit & Pindyck, 1994):

$$E [P_t] = \bar{P} + (P_0 - \bar{P}) e^{-\eta t} \quad (3)$$

$$\sigma_{pt}^2 = \frac{\sigma^2}{2\eta} (1 - e^{-2\eta t}) \quad (4)$$

Discretizando o parâmetro da média da Equação 3:

$$P_t = \bar{P} + (P_{t-1} - \bar{P})e^{-nt} \text{ e adicionando } (-P_{t-1}) \quad (5)$$

$$P_t - P_{t-1} = \bar{P}(I - e^{-nt}) + P_{t-1}(e^{-nt} - 1) \quad (6)$$

Se $P_t = \ln(pm)$ e $\bar{P} = \ln(\overline{pm}) - \frac{\sigma_{\overline{pm}}^2}{2\eta}$ então:

$$\ln\left(\frac{pm_t}{pm_{t-1}}\right) = \left(\ln\left(\overline{pm} - \frac{\sigma_{\overline{pm}}^2}{2\eta_{pm}}\right) + \ln(pm_{t-1})\right) x (1 - e^{-npm\Delta t}) + \ln(pm_{t-1}) x e^{-npm\Delta t} \quad (7)$$

A equação 7 tem a mesma estrutura da equação utilizada para testar a raiz unitária dos preços, escrita da seguinte forma:

$$\ln\left(\frac{pm_t}{pm_{t-1}}\right) = a + (b - I) \ln(pm_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (8)$$

Como os parâmetros a e $(b - I)$ da equação 8 já foram estimados, é possível, então, definir η , \overline{PM} ao igualar tais parâmetros à equação 7, ressaltando que a velocidade de reversão à média (η) é igual a $\eta = \frac{\ln b}{\Delta t}$. Portanto, o processo estocástico das séries do preço do minério (PM) é obtido pela parcela determinística da média (3), discretizada como na equação 5 e pela parcela estocástica da equação 4, obtendo-se (9), aplicando-se em seguida a simulação de Monte Carlo.

$$pm_t = \exp\left(\ln(pm_{t-1}) x e^{-npm\Delta t} + \left(\ln\left(\overline{pm} - \frac{\sigma_{\overline{pm}}^2}{2\eta_{pm}}\right) + \ln(pm_{t-1})\right) x (1 - e^{-npm\Delta t})\right) + \sigma_{pm} \sqrt{\frac{1 - e^{-npm\Delta t}}{2\eta_{pm}}} \varepsilon_{pm} \quad (9)$$

Como os processos foram modelados com neutralidade ao risco, foi utilizada a taxa de juros de longo prazo como taxa livre de risco (r) de 10% a.a. para a obtenção do valor presente dos benefícios da incorporação da flexibilidade de expansão, da seguinte forma:

$$VP_{\pi} = \sum_{t=1}^n \frac{\max(0; \pi)}{(1+r)^t} \quad (10)$$

Em que:

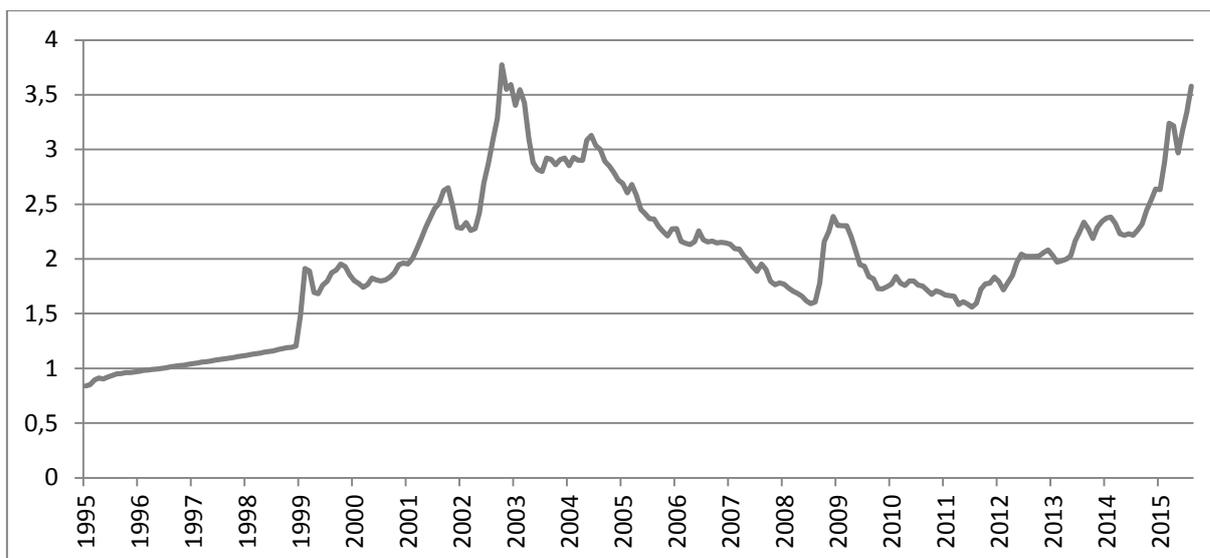
VP_{π} = valor presente;

r = taxa livre de risco.

3.5. Taxa de câmbio

O câmbio possui uma incerteza a ser considerada em um projeto de mineração, principalmente para empresas exportadoras cujos custos de produção, administrativos e de logística são diferentes da moeda de comercialização. Neste caso, não serão considerados *hedges* ou seguros, portanto, o câmbio pode ter grande influência no valor do projeto. Sendo assim, uma correta modelagem permite ao gestor observar esta incerteza na tentativa de mitigar o risco.

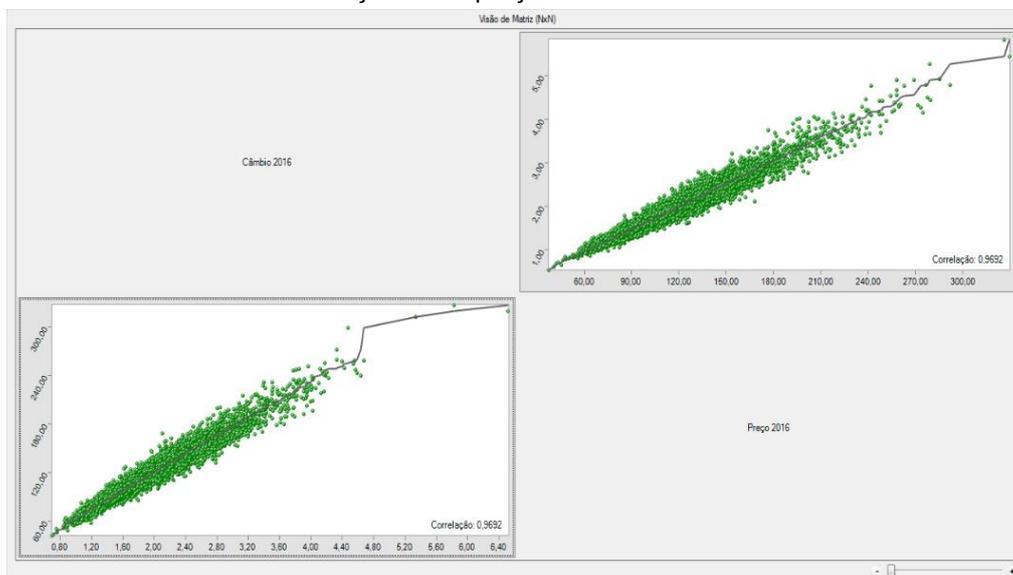
Gráfico 3 - Valor do Real frente ao Dólar



Fonte: Banco Central do Brasil. Elaboração do autor.

Embora observada a correlação (0,9692) entre o preço do minério e a taxa de câmbio cujas séries são apresentadas no Gráfico 4, foi realizado o teste de raiz unitária para determinar se o movimento estocástico do câmbio pode ser considerado, também, como de reversão à média.

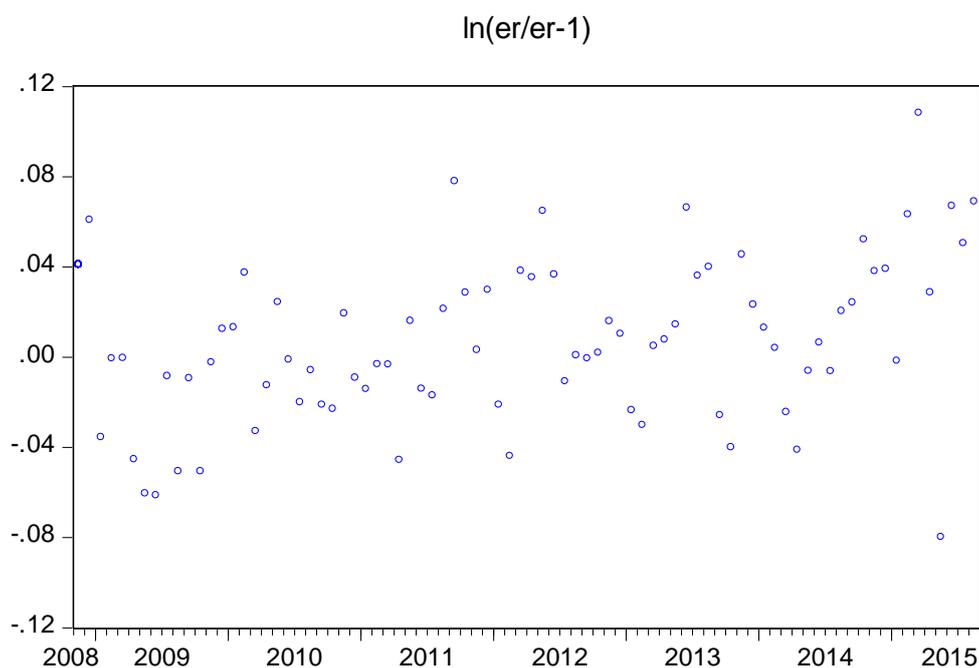
Gráfico 4 - Correlação entre preço do minério e taxa de câmbio



Para determinar o processo de difusão estocástico seguido pela taxa de câmbio (ER) analisa-se a hipótese nula da existência de raiz unitária das séries de variação da taxa pelo teste *Dickey-Fuller* (Wooldridge, 2003).

RESULTADO DO TESTE DE RAIZ UNITÁRIA PARA A SÉRIE DA TAXA DE CÂMBIO			
Hipótese Nula: A taxa de câmbio possui raiz unitária			
Exógeno: Constante			
Defasagem: 0 (automático, baseado em SIC, MAXLAG = 11)			
		Estatística t	Prob.*
Teste de <i>Dickey-Fuller</i> estendido	Câmbio (ER)	-7.592809	0.0000
Valores críticos do teste	Nível de 1%	-3.512290	
	Nível de 5%	-2.897223	
	Nível de 10%	-2.585861	

Gráfico 5 - Comportamento da série da taxa de câmbio

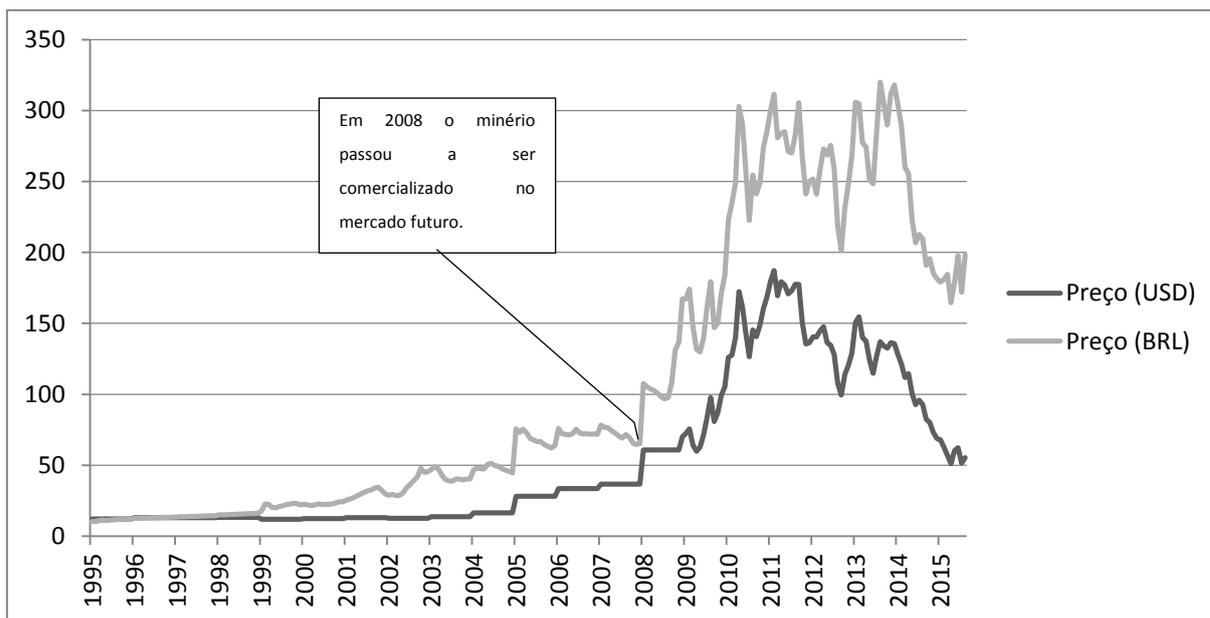


Conforme os testes efetuados há evidências que a taxa de câmbio segue um movimento de reversão à média.

3.6. Preço do minério e taxa de câmbio conjugadas

Segundo Dixit e Pindyck (1994), em períodos curtos de tempo, processos como os de preços são controlados por choques estocásticos, ou seja, desvios de curto prazo. Portanto, neste projeto, foi identificado como processo estocástico mais adequado ao comportamento de preços e câmbio o MRM dada a correlação entre as séries. Resta identificar se o MRM se confirma no uso conjugado de preço e câmbio, ou seja, o preço do minério de ferro dado em reais (R\$).

Gráfico 6 - Preço do minério de ferro em US\$ e BR\$.



Fonte: Platts.com e BCB (Banco Central do Brasil). Elaboração do autor.

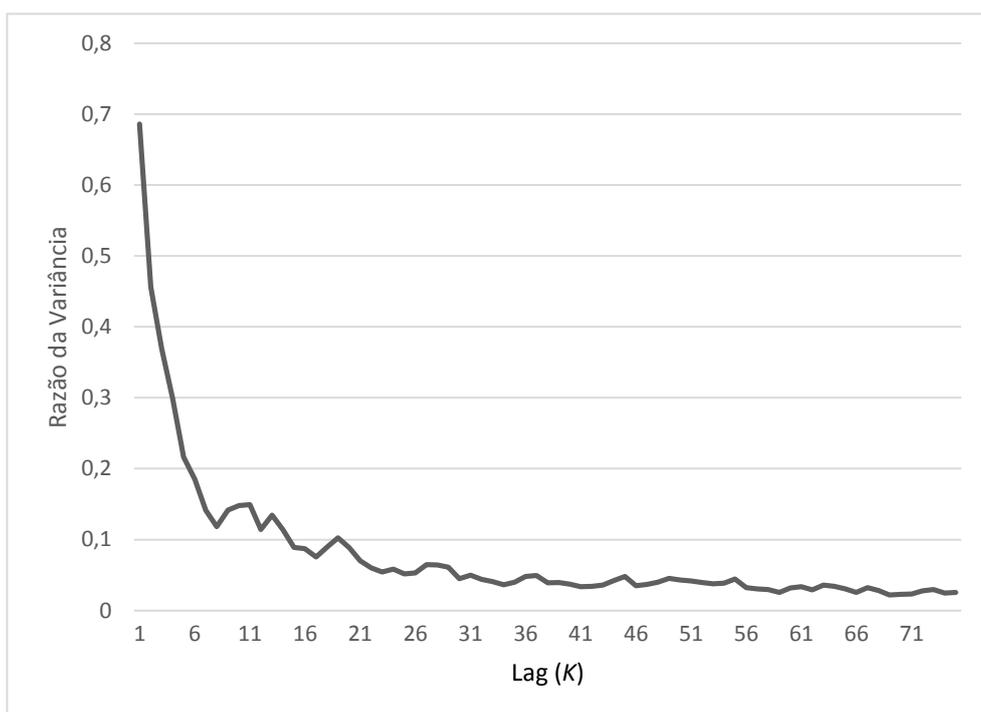
Neste procedimento o preço do minério foi deflacionado usando o IGP-M para obter valores considerando a inflação do período. No intuito de complementar a análise efetua-se, adicionalmente, o teste da razão da variância (Equação 11) para verificar se o choque entre preços é temporário ou permanente. Como mencionado por Pindyck (1999) esse teste é mais informativo que o teste de raiz unitária.

Os autores Vats e Kamaiah (2011) explicam que, se uma série temporal de retornos segue um passeio aleatório, em seguida, em uma amostra finita os incrementos na variância são lineares no intervalo de observação, ou seja, a variação de retorno deve ser proporcional ao intervalo de amostragem. Isso quer dizer que o teste implica que os incrementos de uma série passeio aleatório é linear no intervalo de amostragem. Especificamente, a variância estimada a partir dos q -período de retorno deve ser q vezes tão grande como a variância estimada a partir de um período de retorno. Assim, a variância dos retornos anuais deve ser de 12 vezes a variância dos retornos mensais.

Para testar o passeio aleatório na série do preço do minério deflacionado que considera a influência da taxa de câmbio, é adotado o procedimento utilizado por Lo e MacKinlay (1988), onde estes autores costumavam obter os retornos do mercado de ações. Isto envolve o uso de testes de especificação com base em estimativas de variância. Em particular, o método explora o fato de que a variância dos incrementos em um passeio aleatório é linear no intervalo de amostragem.

$$R_k = \frac{1}{k} \frac{\text{Var}(P_{t+k} - P_t)}{\text{Var}(P_{t+1} - P_t)} \quad (11)$$

Gráfico 7 - Teste da razão da variância do minério de ferro (R\$)



O termo $\text{Var}(\cdot)$ é representado pela variância das séries entre o logaritmo natural (\ln) de preços (P_t), com atraso (lag) de k períodos. Em um Movimento Geométrico Browniano, quando a variância cresce linearmente com k , a razão R_k tende a 1 quando k aumenta. Em se tratando de um Movimento de Reversão a Média, a variância se define com o crescimento de k . Para as séries de preços

considerando o câmbio neste trabalho (preço do minério multiplicado pela taxa de câmbio no tempo t), os valores altos do atraso k , ou *lag*, a razão da variância R_k caiu, indicando que os choques de preços não são constantes e que os preços reverterem para algum nível de equilíbrio reforçando, assim, a hipótese da presença de um MRM. O teste de razão da variância demonstra uma queda na razão da variância com o aumento do *lag*, o que é consistente com o modelo no qual o preço da *commodity* é revertido a média.

Sendo assim, assume-se que a série de preços das *commodities* tem uma tendência natural de reverter ao seu preço médio de longo prazo, ou seja, a média de equilíbrio de mercado, por mais que esse processo de reversão seja lento. Portanto, é possível afirmar que o movimento de reversão à média (sem tendência ou *drift*) é o mais adequado para se modelar o preço do minério em reais (R\$).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Projetos de investimento em mineração de ferro demandam um alto capital para serem desenvolvidos e exigem um longo prazo para produzir retorno aos investidores. Assim como em outras indústrias de capital intensivo, na mineração de ferro é possível que contratos de longo prazo de fornecimento de minério sejam negociados para viabilizar novos projetos, porém os reajustes de preços estarão sujeitos à variação do mercado e a pressão dos custos.

Na ocasião de uma elevação dos preços das *commodities*, reservas que antes eram consideradas inviáveis devido à pequena escala ou ao custo elevado de exploração podem se tornar atrativas. Entretanto, os empreendedores, cientes da

volatilidade dos preços, tendem a esperar que estes subam a tal ponto que o risco de haver uma inversão de cenário seja menor.

Neste projeto, são exploradas duas possibilidades: expansão da capacidade da mina e abandono do projeto. Ambas as opções podem ser planejadas pela empresa.

Tendo em vista a especificidade da indústria de mineração de ferro, os gastos associados aos projetos são irreversíveis. Esta irreversibilidade significa que o detentor de uma opção real sobre um projeto possui o direito, mas não necessariamente o comprometimento de realizar os gastos necessários para o desenvolvimento do projeto. Como existe contingência para o investimento, há uma probabilidade de que este investimento resulte em uma perda. Portanto, a oportunidade de adiar a decisão possui valor.

Reconhecendo que uma oportunidade de investimento e uma opção financeira são análogas, isso permite ao investidor entender a função precípua da incerteza no processo das decisões sobre os investimentos em capital. Do mesmo modo que na avaliação das opções financeiras onde quanto maior for a volatilidade do ativo objeto, maior será o valor da opção e maiores serão os incentivos para se esperar e manter a opção disponível, a mesma lógica vale para o investimento em capital: quanto maior for a incerteza sobre a lucratividade ou perda em um projeto, maior será o incentivo para se esperar, mantendo a oportunidade disponível, ao invés de exercê-la de uma vez.

O gestor do projeto poderá optar por uma expansão de capacidade de um complexo de mineração de ferro composto de mina, usinas, transporte rodoviário e ferroviário e operações portuárias. Para viabilizar esta análise será proposto um projeto de uma mina hipotética considerando a capacidade inicial de extração e

transporte de 10 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, sendo que o capital necessário para este investimento será próprio.

O projeto apresenta flexibilidade gerencial de aumento da capacidade de produção (opção de expansão) caso o ambiente futuro seja favorável e de abandono caso se mostre desfavorável.

Serão utilizadas duas técnicas de valoração do projeto. A técnica de FCD gerará um resultado que corresponderá ao projeto sem flexibilidade, para o qual não há ações alternativas a serem seguidas em função das mudanças das variáveis de entrada. A TOR gerará o resultado do projeto com flexibilidade e, de acordo com a modelagem da incerteza com as duas técnicas de valoração de projetos, são obtidos resultados distintos. A partir desses resultados, é realizada uma análise do impacto da técnica de precificação e da estratégia de modelagem de incerteza adotadas sobre o valor do projeto e sobre a decisão a ser tomada.

4.1. Exemplo numérico

Com a modelagem estocástica das incertezas (preço e câmbio) do projeto já definidas, é preciso conhecer a volatilidade do valor do projeto. Sob incerteza, as variáveis futuras não podem ser determinadas por um único valor, mas por uma distribuição de probabilidade de seus possíveis valores (TRIGEORGIS, 1996).

Realizando a simulação de Monte Carlo utilizando MRM do preço do minério já convertido para reais (R\$), foi obtida a seguinte distribuição do valor presente do projeto após 10 mil iterações:

Gráfico 8 - Avaliações pela Simulação de Monte Carlo

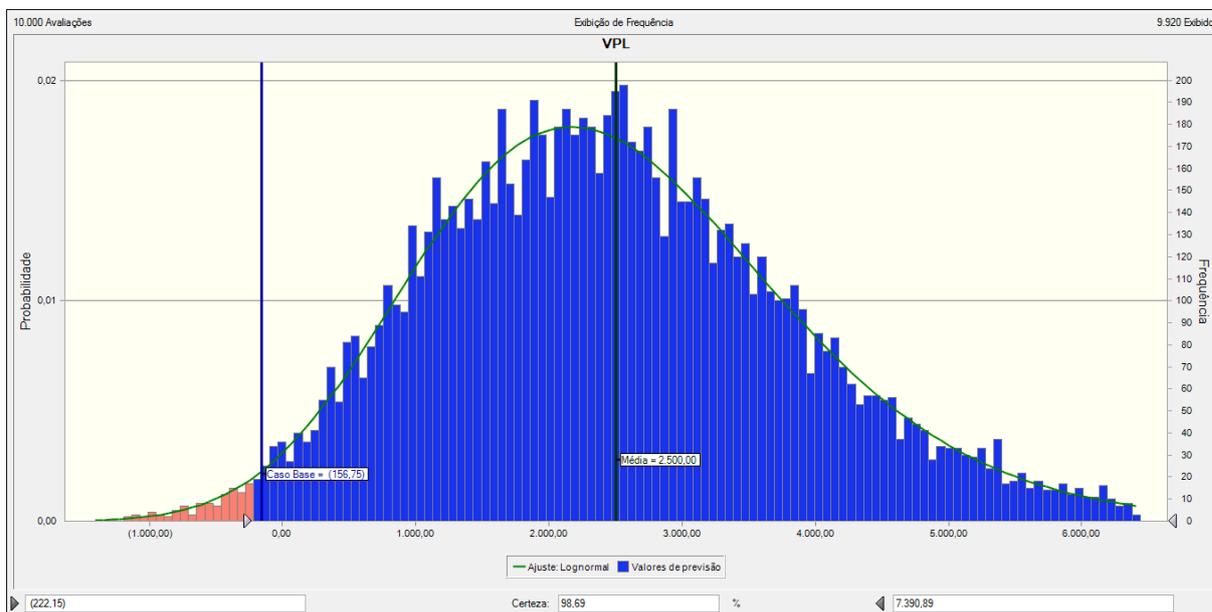
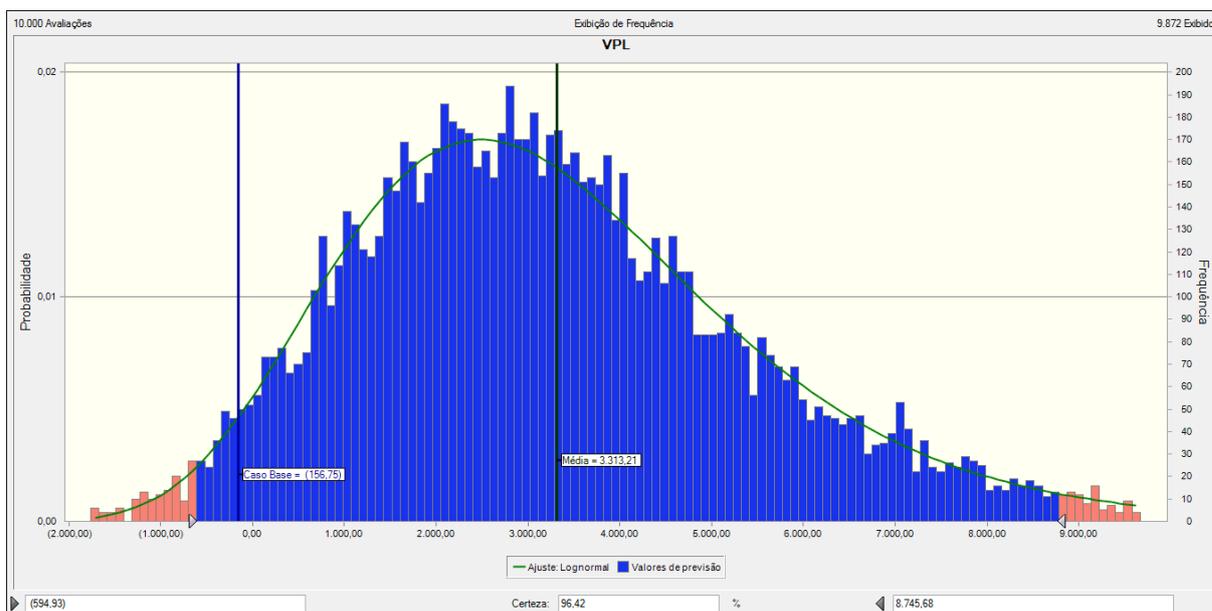


Gráfico 9 - Avaliações pela Simulação de Monte Carlo com Pressupostos Correlacionados



Na distribuição de probabilidade do valor do projeto, considerando os valores históricos do preço do minério e do câmbio, através do modelo estocástico empregado, obtêm-se um valor do projeto médio de R\$ 2,5 bilhões. Correlacionando os pressupostos preço do minério e câmbio a volatilidade aumenta fazendo o valor do projeto médio subir para R\$ 3,313 bilhões.

O projeto sem flexibilidade corresponde à exploração de uma reserva, totalizando 10 anos de exploração, mantendo sua capacidade constante. Foram criadas 2 opções europeias, cujas datas de maturidade são o início do 10º ano conforme a seguir:

- Opção de Expandir: investir mais R\$ 1,5 bilhão para expandir a capacidade de extração e transporte dos minérios, aumentando a geração de fluxo de caixa e reduzindo pela metade a vida útil da mina.
- Opção de Abandonar: interromper a exploração quando a 1ª reserva se esgotar, não desembolsar o investimento de R\$ 1,5 bilhão necessários à exploração da 2ª reserva e vender o negócio;

O valor da opção em $t = 10$, em cada rodada de simulação foi obtido por meio do seguinte *payoff*:

$$\max (S2-X2, X1-S1, 0)$$

Quadro 1 - *Payoff* das opções

	Expandir	Abandonar
Descrição	Exploração da 2ª reserva com aumento de capacidade de extração	Interrupção do projeto ao término da exploração da 1ª reserva
Analogia com as opções financeiras	Opção de Compra Europeia	Opção de Venda Europeia
Ativo-objeto	S2 (VP da diferença do fluxo de caixa com aumento da capacidade de extração em $t = 10$)	S1 (VP dos fluxos de caixa da 2ª etapa em $t = 10$)
Preço do exercício	X2 Investimento adicional para expansão da capacidade de beneficiamento em $t = 10$)	X1 (Investimento necessário para a implantação da 2ª etapa em $t = 10$)
Equação	$\max (S2 - X2, 0)$	$\max (X1 - S1, 0)$

O valor da opção em $t = 0$ é obtido descontando-se o *payoff* à taxa livre de risco pois a opção será exercida no futuro (TRIGEORGIS, 1996):

$$VP_{opção} = \frac{\max(X_1 - S_1, S_2 - X_2, 0)}{(1+rf)^t}$$

O VPL do projeto com flexibilidade em cada rodada é dado pelo VPL do projeto sem flexibilidade (VPL_1) mais o valor da opção em $t=0$.

$$VPL_{expandido} = VPL_1 + \frac{\max(X_1 - S_1, S_2 - X_2, 0)}{(1+rf)^t}$$

O valor do projeto com flexibilidade e o valor da opção são obtidos pela média aritmética das 10.000 rodadas de simulação.

A simulação de Monte Carlo dos fluxos de caixa mensais do projeto foi realizada por meio do *software* Crystall Ball®. Em cada rodada de simulação, gera-se um número aleatório - considerando a média e desvio padrão a partir dos dados históricos - para cada uma das variáveis de entrada (preço e câmbio) do modelo em cada um dos 10 anos do período de exploração da 1ª reserva.

Utilizando o número aleatório gerado, extrai-se o valor de uma distribuição normal padronizada, esse valor é utilizado para simular o incremento de Wiener $dz = \varepsilon \sqrt{dt}$.

O incremento de Wiener simulado em cada ano é utilizado na equação do processo estocástico de cada uma das variáveis de entrada, para gerar o valor de cada variável em cada ano. A partir dos valores de entrada, obtém-se o fluxo de caixa de cada um dos 10 anos da etapa inicial, por meio das relações matemáticas da planilha de fluxo de caixa.

Para estimar os fluxos de caixa da fase seguinte do projeto, foi adotada a seguinte lógica em relação às variáveis de entrada: o valor obtido na simulação de cada variável em $t = 10$ foi adotado como o preço inicial para a fase seguinte. Em seguida, foram calculados os valores esperados dos processos estocásticos para $t = 11$ a $t = 20$ (período de exploração da fase 2), partindo do preço inicial definido em US\$ 68,00. O fluxo de caixa de cada período foi, então, obtido, utilizando a mesma lógica de cálculo da planilha de fluxo de caixa da fase anterior. Os fluxos de caixa gerados foram trazidos para o valor presente em $t = 10$.

Foram realizadas 10.000 simulações do fluxo de caixa do projeto. Em cada simulação foram geradas as seguintes variáveis de saída:

- VPL da 1ª alternativa sem flexibilidade – exploração das 2 reservas;
- VPL da 2ª alternativa com flexibilidade – exploração das 2 reservas com expansão de capacidade;

A partir desses dados, é possível estimar o *payoff* de cada opção e selecionar a alternativa de maior VPL em cada rodada de simulação considerando o projeto sem flexibilidade e a opção de expansão de capacidade. O VPL expandido do projeto e o valor da opção são obtidos pela média aritmética das 10.000 rodadas de simulação.

4.2. Opção de expandir

A exploração de minerais depende de concessões do governo, de licenças ambientais e de direito de acesso às áreas de exploração. Sendo assim, faz-se necessário vários estudos prévios para identificação de recursos minerais que viabilizem sua exploração econômica.

A possibilidade de expansão da produção estará sujeita a diversas outras restrições como a capacidade de escoamento do produto até o cliente final, que envolve a disponibilidade de toda uma infraestrutura logística.

Considerando que a empresa tem a capacidade de obter todos os direitos para o início das atividades de extração incluindo as licenças ambientais para desenvolver o projeto, assim como o poder de investimento para prover o acesso logístico visando o escoamento de seus produtos, a decisão de expandir a capacidade de produção passa a estar limitada, apenas, aos gestores do projeto.

Para minimizar os principais riscos relacionados ao projeto analisado, a empresa pode lançar mão de diversas opções como utilizar contratos de *hedge* tanto para o preço quanto para o câmbio, incluir cláusulas contratuais que garantam a compra do produto e que fixem limites mínimos e máximos para os preços.

Neste estudo, o projeto de mineração possui opção de ter sua capacidade expandida até o quinto ano do projeto. A decisão de expandir precisa ser tomada um ano antes do efetivo aumento de capacidade, para que a empresa possa adquirir todos os equipamentos e preparar a infraestrutura necessária para o início da operação e transporte do minério. Esta opção de expansão poderia ter um vencimento indeterminado, porém foi considerado que os direitos minerários estarão disponíveis num prazo máximo de dois anos e que depois poderão ser oferecidos a outras empresas. A empresa detém uma preferência de compra destes direitos e, caso opte pela aquisição, o pagamento será feito ao longo da extração dos recursos, através de royalties sobre os direitos minerários, calculado na mesma base da CFEM⁵. Esta condição foi planejada para que a mineradora não precise modelar a

⁵ Compensação Financeira pela Exploração de recursos Minerários.

incerteza sobre as reservas de minério, podendo avaliar a opção de expansão em função apenas do preço do minério de ferro e da taxa de câmbio.

A escolha ótima de expandir ou não a capacidade da mina será dada pelo VPL deste novo investimento. Caso o novo fluxo de caixa da capacidade de produção adicional, trazido a valor presente, for maior do que o investimento necessário para aumentar a capacidade, a decisão ótima será de expandir, caso contrário não deverá ser feita a expansão. O VPL deste novo investimento dependerá do comportamento do preço do minério de ferro e da taxa de câmbio para os próximos anos.

Para determinar o valor da flexibilidade do projeto de mineração é necessário avaliar as condições atuais do projeto no FCD para depois ser identificado o valor adicionado com a opção real, seguindo o modelo de Copeland e Antikarov (2001).

No caso apresentado supõe-se que o investimento de expansão do projeto seja de R\$ 1,5 bilhão. O valor presente atual para a exploração da mina é de R\$ 156,75 milhões negativos cuja volatilidade do projeto se mantém em 32,54% a.a. e a taxa livre de risco em 10% a.a. A expansão será feita no ano 10. O valor presente líquido do projeto após a expansão será de R\$ 2 bilhões (para um investimento no ano $t=10$ de R\$ 1,5 bilhão).

Considerando a possibilidade de expandir a mina caso o preço do minério se eleve, espera-se manter a produção atual não incorrendo em aumento dos custos. Os fluxos de caixa da etapa inicial e da etapa de expansão são perfeitamente correlacionados.

A opção de expansão é análoga a uma opção de compra do valor presente do projeto (S2), em que o preço de exercício é igual ao investimento adicional (X2). O *payoff* da opção de expansão é igual a $\max(S2-X2,0)$.

$$\text{Opção de expansão} = 2e^{-0,1} N(-d2) - 1,5N(-d1)$$

$$d1 = \frac{\ln\left(\frac{2}{1,5}\right) + \left(0,1 + \frac{0,3254^2}{2}\right)}{0,3254} = 1,7658$$

$$d2 = \frac{\ln\left(\frac{2}{1,5}\right) + \left(0,1 - \frac{0,3254^2}{2}\right)}{0,3254} = 0,7368$$

$$2e N(1,7658) - 1,5N(0,7368)$$

$$\text{Opção de expansão} = \$ 1,498 \text{ bilhão}$$

$$\text{Valor presente líquido expandido} = \$ 2 \text{ bilhões} + \$ 1,498 \text{ bilhão} = \$ 3,498 \text{ bilhões}$$

4.3. Opção de abandonar

Antes de optar em abandonar o projeto pode-se reduzir ou interromper temporariamente a produção em virtude dos preços depreciados no intuito de prolongar a vida útil da mina e, tão logo o preço do minério se valorize, retoma-se a produção. Quando o valor máximo do projeto não compensar os custos de produção a gerência pode novamente interromper o projeto temporariamente ou, ainda, abandoná-lo.

Uma opção de diferimento fornece uma oportunidade a gerência em esperar até que as circunstâncias se tornem mais vantajosas. No entanto, caso seja observado que o fluxo de caixa do projeto continuará negativo pode-se adotar a opção de abandono.

Uma aceleração ou desaceleração da taxa de produção de uma mina impacta no valor do projeto. Se o preço da *commodity* aumentar significativamente (e/ou se o real depreciar frente ao dólar) a gerência pode acelerar a taxa de produção o que fará com que o projeto tenha um valor maior assim como uma maior taxa de retorno.

Para aumentar a taxa de produção é necessário um investimento de capital adicional para criar a capacidade de entregar mais minério de ferro. No entanto, os custos gerais de produção aumentam em virtude da redução do tempo de vida útil da mina. Portanto, na medida em que a reserva vai se esgotando os custos de extração aumentam e como consequência em acelerar a produção o tempo de vida útil da mina diminui e é necessário refazer toda a análise do valor do projeto.

No caso apresentado supõe-se que o investimento no projeto seja de R\$ 2,5 bilhões. O valor presente atual para se explorar a mina é de R\$ 156,75 milhões negativos cuja volatilidade do projeto é de 32,54% a.a. Caso não existam opções reais significativas, o valor presente líquido do projeto é - \$ 2,65 bilhões (-R\$ 156,75 milhões do VPL - R\$ 2,5 bilhões do investimento).

Considerando a possibilidade de abandonar definitivamente a mina por um valor residual de R\$ 2 bilhões (venda do negócio) caso o preço do minério se torne muito baixo, a flexibilidade gerencial de abandono cria uma assimetria na distribuição de probabilidade do VPL do projeto.

A opção de abandono é análoga a uma opção de venda do valor presente do projeto (S_1), em que o preço de exercício é igual ao valor residual (X_1). O *payoff* da opção de abandono é igual a $\max(X_1 - S_1, 0)$.

Sabendo-se que a taxa do ativo livre de risco é 10% a.a. e aplicando-se a equação de Black-Scholes para opção de venda, obtemos:

$$\text{Opção de abandono} = 2e^{-0,1} N(-d2) - 2,5N(-d1)$$

$$d1 = \frac{\ln\left(\frac{2,5}{2}\right) + \left(0,1 + \frac{0,3254^2}{2}\right)}{0,3254} = 1,1557$$

$$d2 = \frac{\ln\left(\frac{2,5}{2}\right) + \left(0,1 - \frac{0,3254^2}{2}\right)}{0,3254} = 0,8303$$

$$2e N(-0,8303) - 2,5N(-1,1557)$$

$$\text{Opção de abandono} = \$ 168,19 \text{ milhões}$$

$$\text{Valor presente líquido expandido} = -\$ 156 \text{ milhões} + \$ 168,19 \text{ milhões} = \$ 12,19 \text{ milhões}$$

4.4. Decisão por meio de árvores binomiais

Árvores binomiais são ferramentas intuitivas para avaliação de opções e, conforme a abordagem de Cox, Ross e Rubinstein (1979), fazem com que os nós das ramificações se recombinem tendo em vista que o movimento ascendente (u) é, exatamente, o inverso do movimento descendente (d) onde sua implementação torna-se prática. Para modelar as árvores binomiais obtêm-se os parâmetros de entrada conforme a seguir:

$$u = e^{\sigma \sqrt{\Delta t}} \quad (12)$$

$$d = e^{-\sigma \sqrt{\Delta t}} = \frac{1}{u} \quad (13)$$

$$p_r = \frac{(1+rf)-d}{u-d} \quad (14)$$

Os valores básicos de entrada são a volatilidade do ativo (σ), a taxa livre de risco (rf) e o intervalo de tempo (Δt).

Entrada	Volatilidade (σ)	Movimento Ascendente (u)	Movimento Descendente (d)	Taxa livre de risco (rf)	Probabilidade (Pr)
VPL	0,3254	1,39	0,72	0,1	0,57

Ano 1	Ano 5	Ano 10
		3.864,20
	2.780,00	
2.000,00		2.000,00
	1.438,85	
		1.035,14

$$u = \max[0; (S.u) - X] \text{ e } d = \max[0; (S.d) - X]$$

Valor da opção de expansão = R\$ 1,497 bilhão

Valor da opção de abandono = R\$ 165 milhões

4.5. Análise de sensibilidade

Uma opção real, por exemplo, de abrir e fechar uma mina pode acrescentar de 30% a 40% a seu valor presente com base no fluxo de caixa previsto (COPELAND E ANTIKAROV, 2001).

Há de se avaliar as condições em que o projeto será implantado. A volatilidade histórica é um importante indicador dos riscos inerentes ao projeto. Incertezas criam oportunidades. Quando uma decisão futura depende da origem das incertezas, a gerência tem que analisar como estas incertezas influenciam o projeto. (AMRAM e KULATILAKA, 1999).

Portanto, a exposição de uma matriz onde os preços do minério de ferro e do câmbio são dispostos de forma a demonstrar como cada variável em conjunto determina o valor do projeto, é possível avaliar em que condições a gerência toma

uma decisão. Por exemplo, se o real (R\$) estivesse equiparado ao dólar (US\$) teria um grande impacto sobre o caixa do projeto.

Ademais, as duas incertezas somadas geram um impacto ainda maior. Portanto, diante do estudo apresentado, dos parâmetros determinísticos adotados como custos, produção, custo de capital, etc., e considerando as premissas apresentadas, pode-se inferir que, para o projeto ser viável economicamente, o preço comercializado do minério de ferro deva estar na faixa de US\$ 75 e, pelo menos cada R\$ 2,5 corresponder a US\$ 1.

Assim, no intuito de ilustrar de forma simples e intuitiva os cenários a serem vislumbrados para o projeto, os dados são apresentados em seguida.

Tabela 3 - Projeção do VPL do projeto

Preço do Minério x Câmbio	R\$ 1	R\$ 2	R\$ 3	R\$ 4
US\$ 175	(307)	6.541	13.388	20.236
US\$ 150	(1.285)	4.584	10.453	16.323
US\$ 125	(2.263)	2.627	7.518	12.410
US\$ 100	(3.241)	671	4.684	8.497
US\$ 75	(4.220)	(1.285)	1.649	4.584
US\$ 50	(5.198)	(3.241)	(1.285)	671
US\$ 25	(6.176)	(5.198)	(4.219)	(3.242)

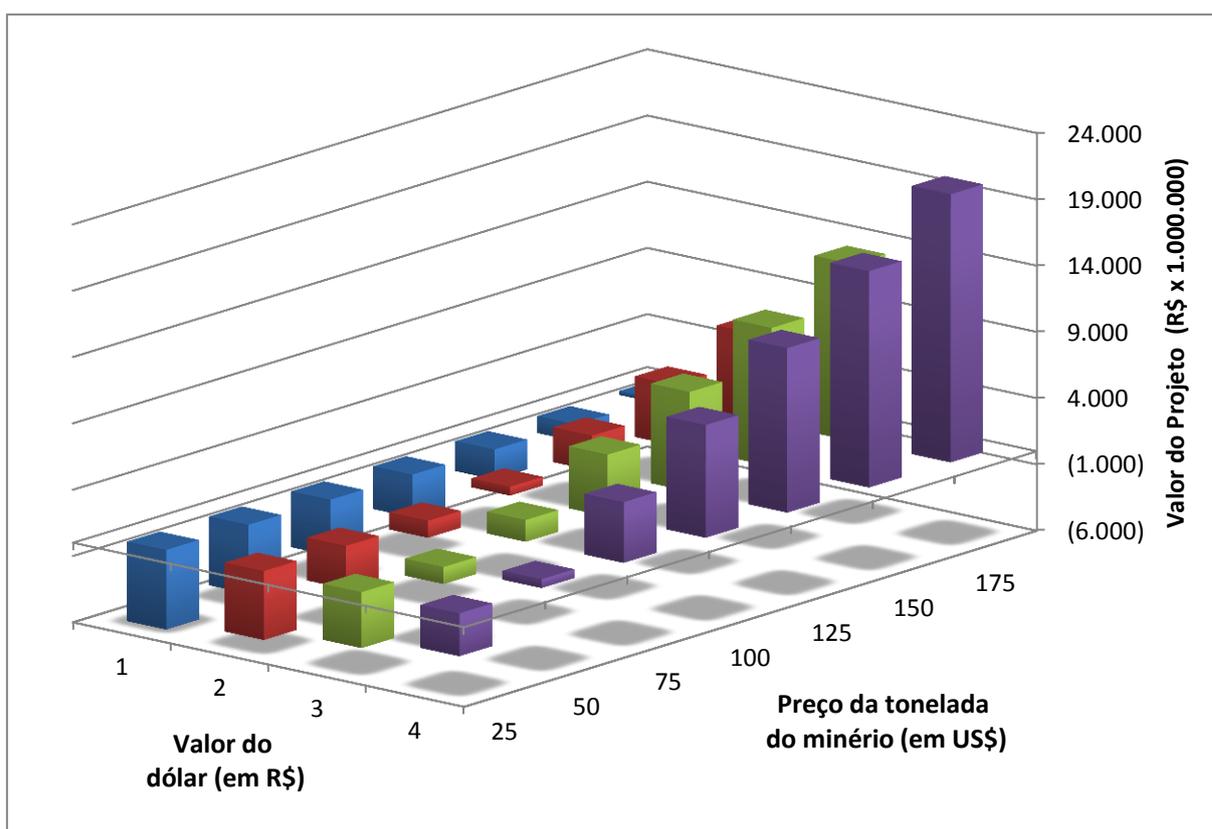
Fonte: Dados do projeto em estudo. Valores arredondados. Valores em reais (R\$)

Os resultados apresentados encontram paralelos com outros estudos como o de Cunha e Weiss (2011) que apontam que a desvalorização da moeda doméstica é benéfica para empresas exportadoras de *commodities*. A compreensão das relações entre os preços das *commodities* e taxas de câmbio têm implicações importantes na tomada de decisões financeiras (ZHANG et al., 2013).

No projeto de mineração apresentado e, conforme suas premissas, considerando a volatilidade do preço do minério e da taxa de câmbio, a análise de sensibilidade demonstrou que o câmbio teve uma influência maior que o preço no VPL do projeto. O câmbio influenciou em 53,8% e o preço em 46,2% o VPL do projeto.

Portanto, o gestor do projeto tem uma importante ferramenta a sua disposição para avaliar cenários e ajustar o orçamento do projeto a eventuais intercorrências como uma variação súbita na taxa de câmbio, por exemplo.

Gráfico 10 - Análise de sensibilidade das variáveis de incerteza



5. CONCLUSÃO

Um modelo de avaliação que contemple incertezas relevantes em um projeto de mineração, como a volatilidade do preço do produto e da taxa de câmbio, permite ao gestor melhor analisar as opções do projeto.

O entendimento da Teoria das Opções Reais faz com que o gestor vislumbre os benefícios que podem ser capturados na análise de investimentos. A incorporação das flexibilidades e das incertezas ao valor do projeto permite uma melhor avaliação quanto ao real valor do projeto.

As opções definidas para este estudo foram: expansão e abandono. Procurou-se calcular o valor das opções, somando-o ao VPL do fluxo de caixa determinístico. O objetivo foi identificar um novo valor, considerando as opções, que contribuísse para a decisão de expandir, manter a produção ou abandonar o projeto.

Como contribuição deste estudo, conforme o objetivo proposto, a análise da série histórica do preço do minério de ferro e a influência da taxa de câmbio mostra o impacto no valor do projeto. Através do teste de *Dickey-Fuller*, foi possível verificar a adequação ao movimento de reversão à média considerando tanto o preço do minério, quanto o preço deflacionado. De forma semelhante a abordagem deste estudo, Dixit e Pindyck (1994) utilizaram este mesmo teste para investigar o comportamento do preço do petróleo e de outras *commodities*.

Adicionalmente foi empregado o teste de razão da variância para os preços do minério deflacionados multiplicados pela taxa de câmbio para se confirmar que o movimento mais adequado a ser empregado é o MRM.

Os valores presentes, com e sem flexibilidade, foram calculados por meio da simulação dos fluxos de caixa, obtidos pelo método da Simulação de Monte Carlo dos processos estocásticos que representam as duas incertezas presentes nos fluxos de caixa. A utilização da simulação de Monte Carlo se mostrou um método eficaz para modelar a valoração do projeto. No exemplo apresentado, obtiveram-se valores bem superiores ao cálculo de um VPL tradicional. Foi observada a possibilidade de obter valores expandidos superiores aos valores mensurados por VPL. A análise de sensibilidade mostra que o valor da opção real é fortemente influenciado pela volatilidade das variáveis estocásticas.

Grande parte dos trabalhos acerca de opções reais considera apenas a incerteza associada ao preço. Neste trabalho foi proposto um modelo que contempla duas incertezas: preço e câmbio. Considerar o minério de ferro como uma *commodity* negociada em bolsa de futuros levando em conta a volatilidade da taxa de câmbio permite ao gestor uma maior visibilidade acerca dos riscos de um projeto de mineração.

A comercialização do minério de ferro depende de características físicas e químicas o que faz o mercado pagar um prêmio por um produto que contenha maior teor de ferro e baixo teor de contaminantes. Portanto, o uso de *hedge* para este produto torna-se restrito e os projetos de mineração são mais suscetíveis à variação do preço do minério.

Uma limitação do estudo diz respeito a série de dados utilizada. Espera-se que em estudos futuros tenha-se disponível uma maior abrangência da série de dados históricos para o preço do minério em tempo contínuo, ou seja, que retratem as mudanças no preço em qualquer tempo como o de mercadorias negociadas em bolsa de valores.

Para estudos futuros sugere-se que se utilizem outras formas de modelagem do Movimento de Reversão a Média (MRM) conforme indicado por Bastian-Pinto (2009) para o preço do minério abarcando um maior período de histórico de preços. Também sugere-se o uso de Equações Diferenciais Parciais (EDP) para avaliar o valor de um projeto de mineração.

Outras opções como diferir, converter e, ainda, opções compostas podem ser consideradas em estudos futuros assim como outras fontes de incertezas associadas a projetos de mineração como tamanho da reserva, custos de produção, capacidade de escoamento, entre outras.

REFERÊNCIAS

ABDEL SABOUR, S. ; POULIN, R. Valuing real capital investments using the least-squares Monte Carlo method. **The Engineering Economist**, v.51, p.141–160, 2006.

ABDEL SABOUR, S. ; DIMITRAKOPOULOS, R. Incorporating geological and market uncertainties and operational flexibility into open pit mine design. **Journal of Mining Science**, v.47, p.191–201, 2011.

AHMED, A.; ERKOC, M.; CHO, S. Capacity Investment, Pricing, And Production Allocation Across International Markets With Exchange Rate Uncertainty. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 29(1), 2012.

AMRAN, M., ; KULATILAKA, N. **Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World**. Boston, USA: Harvard Business School Press, 1999.

AMITI, M ; ITSKHOKI, O. ; KONINGS, J. Importers, exporters, and exchange rate disconnect. **American Economic Review**. v.104 (7), 1942–1978, 2014.

BASTIAN-PINTO, C. **Modelagem de opções reais com processos de reversão a média em tempo discreto**: Uma aplicação na indústria brasileira do etanol. Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

BASTIAN-PINTO, C. ; BRANDÃO, L.; ALVES, M. **The ethanol-gas flex fuel car**: What is the option value of choosing your own fuel? In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON REAL OPTIONS, 2008.

BELLALAH, M. On Irreversibility, Sunk Costs and Investment under Incomplete Information. **R&D Management Journal**, v.31, p.115–126, 2001.

BELDERBOS, R. ; ZOU, J. Real options and foreign affiliate divestments: A portfolio perspective. **Journal of International Business Studies**, v.40(4), p.600–620, 2009.

BERMAN, N. ; MARTIN, P. ; MAYER, T. How do different exporters react to exchange rate changes? **The Quarterly Journal of Economics**, v.127, 437–492, 2012.

BLACK, F. ; SCHOLES, M., The pricing of options and corporate liabilities. **Journal of Politics and Economy**, v. 81(3), p.637–654, 1973.

BODART, V. ; CANDELON, B. ; CARPANTIER, J. Real exchanges rates in commodity producing countries: A reappraisal. **Journal of International Money and Finance**, v.31, 1482–1502, 2012.

BOYLE, P. Options: A Monte Carlo Approach. **Journal of Financial Economics**, v.4, p. 323-338, 1977.

- BRANDÃO, L. **Uma aplicação da teoria das opções reais em tempo discreto para valoração de uma concessão rodoviária**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Industrial pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ), Rio de Janeiro, 2002.
- BRENNAN, M. ; TRIGEORGIS, L. **Project Flexibility, Agency and Competition: New Developments in the Theory and Application of Real Options**. In: Brennan, Trigeorgis (Eds.), Oxford University Press, New York, 2000.
- BRENNAN, M. ; SCHWARTZ, E. Evaluating natural resource investments. **Journal of Business**, v.58 (2), p.135–157, 1985.
- BURSTEIN, A.; GOPINATH, G. International prices and exchange rates. **Handbook of International Economics**, v. 4, 391–451, 2014.
- CHATTERJEE, A. ; DIX-CARNEIRO, R.; VICHYANOND, J. 2013. Multi-product firms and exchange rate fluctuations. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 5 (2), 77–110, 2013.
- CHEN, Y., ROGOFF, K. ; ROSSI, B. Can Exchange Rates Forecast Commodity Prices? **The Quarterly Journal of Economics**, v.125(3), 1145-1194, 2010.
- CHUNG, C. ; LEE, S. ; BEAMISH, P. ; ISOBE, T. Subsidiary expansion/contraction during times of economic crisis. **Journal of International Business Studies**, v.41, p.500–525, 2010.
- COLWELL, D. ; HENKER, T. ; HO, J. ; FONG, K., Real option valuation of Australian gold mines and mining companies. **Journal of Alternatives Investments**, p.23–38, 2003.
- COPELAND, T. ; ANTIKAROV, V. **Opções Reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos**. Tradução de Maria José Cyhlar. Rio de Janeiro: Campus, 2001.
- CORREA, L. ; GRIMALDI, P. China notes: iron ore—positive on the cycle and near-term pricing. **Barclays Capital Equity Research**, p. 3-4, 2012.
- CORTAZAR, G. ; SCHWARTZ, E. Implementing a real option model for valuing an undeveloped oil field. **International Journal of Operation Research**. v.4(2), p.125–137, 1997.
- COX, J. ; ROSS, S. ; RUBINSTEIN, M. Option pricing: a simplified approach. **Journal of Financial Economics**, v.7(3), p.229-263, 1979.
- CUNHA, M. ; WEISS, A. Uma contribuição empírica para a compreensão dos impactos da taxa real de câmbio nas exportações brasileiras. **Ensaio FEE**, v. 32(2), p. 435-464, 2011.
- DAMODARAN, A. **Avaliação de investimentos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.

DEHGHANI, H. ; ATAEE-POUR, M. Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation, **Resources Policy**, v. 37(1), p. 109–117, 2012.

DIAS, M. Stochastic processes with focus in petroleum applications. Disponível em: <<http://marcoagd.usuarios.rdc.puc-rio.br/stochast.html>>. Acesso em: 23 Abr. 2015.

DIXIT, A. ; PINDYCK, R. **Investment Under Uncertainty**. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994.

EVATT, G. ; SOLTAN, M. ; JOHNSON, P. Mineral reserves under price uncertainty, **Resources Policy**, v. 37(3), p. 340–345, 2012.

HAQUE, A. ; TOPAL, E. ; LILFORD, E. A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty. **Resources Policy**, v.39, p.115-123, 2014.

HENRIQUES, I. ; SADORSKY, P. The effect of oil price volatility on strategic investment. **Energy Economics**, v.33, p.79–87, 2011.

KELLY, S. A binomial lattice approach for valuing a mining property IPO. **Quarterly Review of Economics and Finance**, v.38, p.693–709, 1998.

KOGUT, B. ; KULATILAKA, N. Operating flexibility, global manufacturing, and the option value of a multinational network. **Management Science**, v.40, p. 123–139, 1994.

LIMA, C. ; GABRIEL, A., SUSLICK, B. Estimating the volatility of mining projects considering price and operating cost uncertainties, **Resources Policy**, v. 31(2), p. 86–94, 2006.

LO, A. ; MACKINLAY, C. Stock prices do not follow random walks: Evidence from a simple specification test, **Review of Financial Studies**, v.1, p. 41–66, 1988.

MACKINNON, J. Numerical distribution functions for unit root and cointegration tests, **Journal of Applied Econometrics**, v.11, p. 601–618, 1996.

MOEL, A. ; TUFANO, P. When are real options exercised? An empirical study of mine closings. **Review of Financial Studies**, v.15, p. 35–64, 2002.

MONKHOUSE, P. ; YEATES, G. Beyond naive optimisation. Ore body Modelling and Strategic Mine Planning, 14. In: R. Dimitrakopoulos (Ed.). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, p. 3–8, 2005.

MOYEN, N.; SLADE, M.; UPPAL, R., Valuing risk and flexibility — a comparison of methods. **Resources Policy**, v.22, p. 63–74, 1996.

MYERS, S.; TURNBULL, S. Capital budgeting and the capital asset pricing model: good news and bad news, **The Journal of Finance**, v. 32, p. 321–333, 1977.

PINDYCK, R. The long-run evolution of energy prices. **Energy Journal**, v.20(2), p.1–27, 1999.

PINDYCK, R. The dynamics of commodity spot and futures markets: A primer. **Energy Journal**, v.22(3), p.1–29, 2001.

PLATTS. Platts custom data & analysis. Disponível em: <<http://www.platts.com>>. Acesso em: 21 Jan. 2015.

ROSS, S. A simple approach to the valuation of risky income streams, **Journal of Business**, v. 51, p. 453–475, 1978.

SAMIS, M. ; DAVIS, G. ; LAUGHTON, D. ; POULIN, R. Valuing uncertain asset cash flows when there are no options — A real options approach. **Resources Policy**. v 30, p.285–298, 2006.

SCHWARTZ, E. The stochastic behavior of commodity prices: Implications for valuation and hedging. **The Journal of Finance**, v.52(3), p.923– 973, 1997.

SCHWARTZ, E. ; SMITH, J. Short-term variations and long-term dynamics in commodity prices. **Management Science**, v.7(46), p.893–911, 2000.

SHAFIEE, S. ; TOPAL,E. ; NEHRING, M. **Adjusted real option valuation to maximize mining project value** — a case study using century mine, In: Project Evaluation Conference, p.125–134, 2009.

SMITH, J. ; NAU, R. Valuing risky projects: option pricing theory and decision analysis, **Management Science**, v.41(5), p. 795–816, 1995.

SMITH, J. ; MCCARDLE, K. Valuing oil properties: integrating option pricing and decision analysis approaches, **Operations Research**, v. 46(2), p. 198–217, 1998.

SUKAGAWA, P. Is iron ore priced as a commodity? Past and current practices. **Resources Policy**, v.35, p.54–63, 2010.

TOPAL, E. Evaluation of a mining project using discounted cash flow analysis, decision tree analysis, Monte Carlo simulation and real options using an example. **International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing**, v.1(1), p.62–76, 2008.

TRIGEORGIS, L. The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options. **Journal of Financial and Quantitative Analysis**, v.28, p.1–20, 1993.

_____. Real options and interactions with financial flexibility. **Journal of Multinational Financial Management**, v.22(3), p.202–224, 1993.

_____. **Real options**: managerial flexibility and strategy in resource allocation. The MIT Press, Cambridge, 1996.

_____. _____. The MIT Press, Cambridge, 2000.

VATS, A. ; KAMAIAH, B. Is there a random walk in Indian foreign exchange market?, **International Journal of Economics and Finance**, v.3(6), p.157–165, 2011.

WOOLDRIDGE, J. **Introductory econometrics**: a modern approach. Michigan State: Thomson South Western, 2003.

YING, F. ; ZHU, L. A real options based model and its application to China's overseas oil investment decisions. **Energy Economics**, v.32, 627–637, 2010.

ZHANG, H. ; DUFOUR, J. ; GALBRAITH, J. Exchange Rates and Commodity Prices: Measuring Causality at Multiple Horizons. **CIRANO - Scientific Publications**, 2013.