4
Aplicação ao projeto de expansão de uma mina

4.1.
Introdução

O Brasil possui a quarta maior reserva de minério de ferro no mundo, mas a elevada qualidade do mineral encontrado no país permite que sua produção seja a maior entre todos os outros produtores. O aumento da demanda de aço, atrelado ao crescimento da economia mundial, tem acarretado no aumento no preço do minério de ferro nos últimos anos e com isso novos projetos de extração têm surgido em diversos países.

O incremento da produção para os próximos anos pode tanto ser constituído por exploração de reservas virgens, até então inexploradas, chamados também de projetos *greenfield*, como também pela expansão de minas existentes, chamados também de projetos *brownfield*.

Neste capítulo analisaremos o valor da flexibilidade que os investidores possuem em expandir a capacidade de suas minas de minério de ferro, tendo em vista o fato de que a decisãosó poderá ser feita daqui a três anos. Como os modelos de Fluxo de Caixa Descontado não conseguem identificar o valor desta flexibilidade de maneira eficiente, utilizaremos a Teoria das Opções Reais para a modelagem.

4.2.
Premissas

A mina de Carajás no Estado do Pará possui atualmente capacidade de produzir aproximadamente 140 milhões de toneladas de minério de ferro por ano (mtpa). As reservas de minério de ferro estão localizadas no norte do país no estado do Pará, interligadas por meio de aproximadamente 500 km ferrovia e com um porto de escoamento da produção no Maranhão, operando em capacidade máxima. Estudos geológicosindicam que a capacidade das reservas minerais das jazidas de Carajás se consumidas na taxa de 230 mtpa terá a vida útil de menos de 50 anos até a exaustão dos recursos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

A mineradora possui projeto para aumentar sua capacidade de produção em 90mtpa, no entanto como premissa este estudo a decisão de expansãosó poderá ocorrer em um prazo mínimo de 2 anos devido àscondições legais e técnicas. Assim, compõem os ativos da mineradora uma mina em operação e seu complexo logístico de ferrovia e porto, e uma opção de ampliar a capacidade de produçãoatravés de um projeto de expansão chamado S11D. O projeto recebeu esse nome em referência à sua localização (corpo S11, Bloco D).

As premissas aqui utilizadas seguem valores médios utilizados pelo mercado e divulgadas em relatórios de investimento de algumas mineradoras. O intuito da utilização destas premissas é construirmos o fluxo de caixa de um projeto de mineração para aplicarmos a Teoria das Opções Reais.

Consideramos também que os custos de produçãoserão mantidos constantes ao longo da vida útil do projeto, assim como a capacidade de produção da mina, assumindo uma eficiência de operação constante ao longo do tempo.

A variação no capital de giro foi considerada desprezível no modelo, tendo em vista a longevidade do projeto.

A tabela abaixo apresenta as principais premissas adotadas para este projeto:

- Capacidade de Produção da operação atual: 140mtpa
- Capacidade de produção de S11D (expansão): 90 mtpa
- Preço do minério de ferro no ano 0: 100 US$/ton
- Despesas logísticas (Ferrovia e Porto): US$ 23,00/ ton
- Royalties (CFEM): 2% do faturamento subtraído as despesas logísticas
- Opex: US$ 8,00/ton
- Overhead: US$ 0,30/ton
- Depreciação: US$ 15,00/20 anos
- Imposto de Renda: 34%
- Capex corrente: US$ 1,00/ton
- Taxa livre de risco no Brasil em US$: 5% a.a.
- Custo de capital no Brasil em US$: 11% a.a.
- Vida útil do projeto: 40 anos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

4.2.1.
Reservas minerais

As reservas minerais definem a capacidade de produção de uma mina e sua vida útil. As empresas de mineração normalmente dimensionam a capacidade de produção de sua mina em função dos volumes de reservas nela existentes de forma a alongar a vida útil da mina e diminuir os investimentos necessários para atender a capacidade de mineração, beneficiamento e transporte dos minerais.

A mina em potencial expansão tem um total de reservas minerais na ordem de 2,78 bilhões de toneladas de minério de ferro. Com este volume de produto e a capacidade de produçãode 90 milhões de toneladas por ano (mtpa) a mina tem uma vida útil de aproximadamente 40 anos até a exaustão de suas reservas.

4.2.2.
Investimentos

Atualmente a mina em operação já possui a infraestrutura necessária para produzir e escoar toda sua capacidade de produção como planta de mineração e beneficiamento, terminais de carregamento e descarregamento, acesso logístico através da rede ferroviária e um terminal portuário.

Entretanto, para elevar a capacidade de produçãoserãonecessários outros investimentos na expansão do acesso logístico, assim como na planta de mineração e beneficiamento. Espera-se que em 2 anos um novo terminal portuário entre em operação, permitindo o embarque marítimo de um volume adicional de produto, assim como a disponibilidade de novos equipamentos rodantes da ferrovia.

Para atender a expansão da capacidade de produção da mina serãonecessários, somente para estrutura de mina, beneficiamento, ampliação da ferrovia e do porto, investimentos na ordem de US$ 19,49 bilhões, ou US$ 217,00/t. Estes recursos se destinarãoa expansão das operações de mineração, da planta de beneficiamento do minério, da ferrovia e do porto.

Adicionalmente, projetos de mineraçãotambém necessitam de investimentos ao longo de sua vida útil para manter suas operações. Estes investimentos são considerados investimentos correntes, ou *sustaining capital expenses*, e são estimados em US$1,00 por tonelada de minério produzido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

4.2.3.
Custo e despesas

Os custos de produção, que compreendem principalmente os custos com pessoal, combustível, manutenção de equipamentos e serviços foram definidos em US$ 8,00/t. Estes custos estão baseados na capacidade média de produção de 140mtpa, sendo que a produçãoestará em operação ao longo das 8.760 horas por ano.

Despesas logísticas, que incluem principalmente transporte ferroviário e operaçõesportuárias, são estimadas em US$15/t e US$8/t, respectivamente. Estas despesas estão relacionadas principalmente ao custo de combustível do transporte e ao custo de capital das estruturas, como rede ferroviária e porto.

Além das despesas mencionadas acima existem também as despesas comerciais, administrativas e gerais, aqui chamadas de overhead, as quais nãoestão atreladas à operação. Estas despesas foram estimadas em US$0,30/t. Caso o tamanho das operações aumente estas despesas deverão aumentar proporcionalmente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

4.2.4.
Preço do minério de ferro

O mercado de minério de ferro passou por uma fase de forte expansão até a crise de 2008. Atualmente o mercado se encontra com um crescimento bem modesto, demonstrando cautela, por conta da redução do crescimento da China, principal cliente da Vale.

Por não se tratar de uma commodity, pois este minérionão é comercializado na bolsa de futuros e seu preço é negociado trimestralmente para cada contrato de fornecimento, o mercado tem como referência de preço os praticados pela Vale – a maior produtora de minério de ferro no mundo. Os preços da Vale são benchmark do mercado devido ao maior volume comercializado e a elevada qualidade. A maioria das outras mineradoras se baseia na variação do preço de referência para reajustar os preços de seus contratos.

Na formação de preço de cada contrato élevado em consideração diferenciais de frete de origem e destino em relação ao preço benchmark. Além disso, é descontado o teor de ferro de cada produto e o percentual de umidade aferido.

- Preço de referência: 100 US$/ton
- Teor de Ferro: 66%
- Umidade: 10%

Na análise do projeto em questão levaremos em consideraçãoa premissa de uma variação de preço esperada pelo mercado de 2% ao ano. Na formação do preçoserá considerado teor de ferro e percentual de umidade semelhante ao de produtos da mesma região, e que toda a produçãoserá exportada, ou seja, com preço base do mercado externo.

4.2.5. Custo de capital

Foi adotado como premissa o custo de capital médio ponderado como 11% ao ano. Já o custo de capital livre de risco foi adotado 5% ao ano. Como referência foram usadas informações de mercado de instituições financeiras internacionais que em seus relatórios de 2013 publicam as taxas de desconto para avaliar a empresa Vale (codificada na BM&F Bovespa como VALE3 e VALE5, ações ordinárias e ações preferenciais respectivamente).

4.3. Modelagem financeira do projeto

Com base nos principais parâmetros definidos anteriormente, foi montado o fluxo de caixa em moeda constante para a análise do projeto em questão:

Itens	**Definições**
Produção Anual	140.000.000 ton
(=) Receita Bruta	Preço de venda FOB X Produção anual
(-) Impostos sobre Venda	Não há (100% exportação)
(-) Despesas Logísticas	US$ 23,00/ton x Venda anual
(=) Receita Líquida	Receita Bruta – Despesas Logísticas
(-)Royalties	2% sobre Receita Líquida
(-) Opex	US$ 8,00/ton
(-) Overhead	US$0,30/ton
(-) Depreciação e Amortização	US$15,00/ton
(=) LAJIR	Base de cálculo do imposto de renda
(-) Imposto de Renda e Contribuição Social	34%
(+) Depreciação	US$ 15,00/ton
(-) Capex recorrente	US$ 1,00/ton
(=) Fluxo de Caixa Livre	Caixa disponível ao acionista

Tabela 4 – Modelo de fluxo de caixa
Fonte: própria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

Desta forma, podemos expressar o modelo de fluxo de caixa como:

$$FCt = PRt(((Pt - DL)(1 - RS) - CP - DG - DA)(1 - T) + DA - I)$$

onde,

FCt: Fluxo de caixa no período t

PRt : Produção no período t

Pt : Preço no período t

DL : Despesas Logísticas

RS : Royalties (CFEM)

CP :Opex

DG : Overhead

DA : Depreciação e Amortização

T : Imposto de Renda e Contribuição Social

I :Capex Recorrente

O FCD se encontra em moeda constante, valores reais, sem projetar o impacto da inflação nas receitas e despesas.

4.4. Flexibilidade do projeto

Projetos na área de extração mineral demandam largas somas de investimentos para serem implantados, ao longo de um a três anos, e requerem um longo prazo para gerar retorno aos investidores. De modo similar a outras indústrias de capital intensivo, como projetos de energia elétrica, na mineração é possível que contratos de longo prazo de fornecimento de minério sejam celebrados para viabilizar novos projetos, porém os reajustes de preçosestarão sujeitos à variação do mercado. Os investimentos nestes projetos podem ocorrer a qualquer momento, permitindo que a empresa tenha sempre uma opção de longo prazo de investir.

Também fazem parte do controle da empresa as decisões de interromper as operações, expandir a capacidade, transferir as operações para outro site e outras. Minas menos competitivas podem ter suas operações interrompidas aguardando que o preço do mineral volte a patamares mais atrativos ou que se tome a decisão definitiva de se desfazer dos ativos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

Exploraremos a possibilidade de expansão da capacidade de um projeto de mineração, uma opção que pode ser facilmente planejada pela empresa.

4.4.1. Opção de expandir

A exploração extrativista de minerais depende de concessões do governo, licenças ambientais e direito de acesso àsáreas de exploração. Por sua vez é necessário que se tenha realizado estudos prévios para identificação de recursos minerais que viabilizem sua exploraçãoeconômica.

Além das condições acima, a possibilidade de expansão da produçãoestará sujeita a diversas outras restrições como a capacidade de escoamento do produto até o cliente final, que envolve a disponibilidade de infraestrutura logística.

Ao considerar que a empresa possui ou tem capacidade de obter todos os direitos minerais e licenças ambientais para desenvolver o projeto, assim como poder investir para desenvolver o acesso logístico para o escoamento de seusprodutos, a decisão de expandir a capacidade de produção passa a estar restrita exclusivamente aos gestores do projeto.

Por sua vez, há diversas incertezas inerentes a decisão de expandir o projeto, dentre elas a incerteza do tamanho das reservas de minério, dos valores de investimento, dos custos de produção, da variação cambial e do comportamento do preço do minério ao longo da vida útil do projeto.

Incertezas como valores de investimento, custo de produção e variação cambial podem ser facilmente eliminadas através de ferramentas financeiras como hedges e seguros. A dúvida quanto ao tamanho das reservas de minério, que determinarão a capacidade e a vida útil do projeto, pode ser reduzida com a condução de estudos geológicos mais elaborados seguindo normas internacionais mais rígidas de medição, com maiores áreas pesquisadas e com estudos confirmados por pareceres de auditores independentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

Resta a mais significante e única incerteza nãogerenciável do projeto, que é o preço do minério no médio e longo prazo. Uma vez que o comportamento do preço do minério de ferro está associado ao PIB mundial, a projeção do preço no médio e longo prazo pode sofrer altos níveis de erro. Por não ser uma commodity, não existe operação de hedge do preço do minério de ferro no mercado financeiro, permanecendo o retorno do projeto suscetível exclusivamente à variação do preço do minério.

Portanto, a opção de expandir a capacidade de uma mina estará sujeita unicamente ao preço do mineral no mercado internacional.

Como premissa deste estudo, o projeto de mineração possui opção de ter sua capacidade expandida a partir do terceiro ano do projeto. A decisão de expandir precisa ser tomada dois anos antes do efetivo aumento de capacidade, no fim do terceiro ano, 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 como premissa o período máximo de três anos para o exercício da opção. O limite de prazo para que a opção seja exercida nesta indústria pode ser exemplificado pelo limite de prazo dos direitos minerais, e que depois estes poderão ser oferecidos a outras empresas. No caso dos direitos de exploração minerais, uma empresa que detém uma preferência de compra destes direitos e, caso opte pela aquisição, o pagamento poderá ser feito ao longo da extração dos recursos, através de royalties sobre os direitos minerários, calculado na mesma base da CFEM. Esta condição facilita um estudo de caso,de forma que a mineradora não precise modelara incerteza sobre as reservas de minério, podendo avaliar a opção de expansão em funçãoúnica e exclusivamente do preço do minério de ferro.

Parâmetros da opção de expansão:

- Capacidade adicional: 90 mtpa
- Investimento: US$ 19,49 bilhões
- Início do aumento da produção: ano 3
- Vencimento da opção: ano 3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

A escolha ótima de expandir ou não a capacidade da mina será dada pelo VP da operação com este novo investimento. Caso o novo VPcom o aumento da capacidade de produção adicional, trazido a valor presente, for maior do que o investimento necessário para aumentar a capacidade, a decisãoótimaserá de expandir, caso contrárionão deverá ser feita a expansão. O VP deste novo investimento dependerá exclusivamente do comportamento do preço do minério de ferro para os próximos anos.

4.5. Solução

Para determinar o valor da flexibilidade do projeto de mineração precisamos primeiro modelar as condições atuais do projeto para depois identificarmos o valor adicionado com a opção real, seguindo os passos do modelo de Copeland & Antikarov (2001) descritos no item 2.2.7.

4.5.1. Modelagem determinística: FCD sem opção

Considerando inicialmente a capacidade de produção original do projeto de mineração em condições de certeza, ou seja, com uma curva de preço esperado, montamos um cenáriobásico sem qualquer flexibilidade gerencial.

Utilizando o método tradicional de fluxo de caixa descontado identificamos o VP do projeto, com uma taxa de desconto de 11%. Desconsiderando os investimentos feitos até então, pois como dito anteriormente o projeto de mineraçãojá se encontra em operação, calculamos um valor do projeto de US$76,8 bilhões.

A vida útil da mina é de aproximadamente 40 anos, portanto o FCD não considera nenhum valor de continuidade do projeto para o período superior aos 40 anos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

	unidade	Ano 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produção	mtpa x 1.000		140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000
Preço MinFe	US$		100,00	102,00	104,04	106,12	108,24	110,41	112,62	114,87	117,17	119,51
+ Faturamento bruto	US$		14.000.000	14.280.000	14.565.600	14.856.912	15.154.050	15.457.131	15.766.274	16.081.599	16.403.231	16.731.296
- Despesas Logística	US$		3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000	3.220.000
- Custos de produçã	US$		1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000	1.120.000
- Custo de overhead	US$		42.000	42.000	42.000	42.000	42.000	42.000	42.000	42.000	42.000	42.000
- Royalties	US$		215.600	221.200	226.912	232.738	238.681	244.743	250.925	257.232	263.665	270.226
EBITDA			9.402.400	9.676.800	9.956.688	10.242.174	10.533.369	10.830.389	11.133.348	11.442.367	11.757.567	12.079.070
- Depreciação			2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000
EBIT			7.302.400	7.576.800	7.856.688	8.142.174	8.433.369	8.730.389	9.033.348	9.342.367	9.657.567	9.979.070
- IR-CSLL			2.482.816	2.576.112	2.671.274	2.768.339	2.867.346	2.968.332	3.071.338	3.176.405	3.283.573	3.392.884
Lucro Líquido			4.819.584	5.000.688	5.185.414	5.373.835	5.566.024	5.762.056	5.962.010	6.165.962	6.373.994	6.586.186
Fluxo de Caixa												
+ Lucro Líquido			4.819.584	5.000.688	5.185.414	5.373.835	5.566.024	5.762.056	5.962.010	6.165.962	6.373.994	6.586.186
+ Depreciação			2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.100.000
- Capex Mina		-										
- Capex Logística		-										
- Capex Recorrente			140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000
Fluxo de caixa do acionista		-	6.779.584	6.960.688	7.145.414	7.333.835	7.526.024	7.722.056	7.922.010	8.125.962	8.333.994	8.546.186
VP por ano	x 1.000	**76.826.406**	6.107.733	5.649.451	5.224.665	4.831.024	4.466.329	4.128.527	3.815.703	3.526.070	3.257.965	3.009.834

Tabela 5 – Fluxo de caixa determinístico da operação 140 mtpa
Fonte: própria

Nota-se que os investimentos para o início das atividades de mineraçãojá foram feitos, por se tratar de uma mina já em atividade, e que demandam somente investimentos correntes na ordem de US$1,00/t ao ano para manutenção das operações.

A partir do valor do projeto no cenáriobásico poderemos identificar a volatilidade do projeto e determinarmos as probabilidades neutra a risco, conforme Copeland&Antikarov (2001), para montarmos um modelo de fluxo de caixa descontado com uma taxa de desconto livre de risco.

4.5.2. Determinação da volatilidade

Um dos passos importantes da identificação dos riscos do projeto é elaborarmos uma análiseestocástica, utilizando como variável de incerteza o preço do minério de ferro ao longo do projeto. Sabemos que o preço deste mineral pode sofrer grandes variações ao longo do tempo e identificaremos os riscos que esta incerteza pode levar ao retorno do projeto.

O crescimento do preço do minério no modelo estocásticoserá baseado na variação projetada para os próximos 40 anos. O desvio padrão da curva foi obtido através da sériehistórica de preços,tabela 6, entre os anos de 2008 e 2013.

Data	US$/ton Nominal	US$/ton Real
05/12/2008	69,4	76,13
02/01/2009	71,7	79,30
06/02/2009	75,8	83,62
06/03/2009	66,3	72,84
03/04/2009	59,6	65,57
01/05/2009	60,6	66,63
01/06/2009	65,4	71,79
01/07/2009	78,2	85,12
03/08/2009	95,3	103,77
01/09/2009	85,2	92,46
01/10/2009	85,3	92,38
02/11/2009	88,9	96,02
01/12/2009	99,6	107,23
04/01/2010	119,3	128,32
01/02/2010	120,5	129,55
01/03/2010	133,1	143,17
01/04/2010	156,3	168,11
04/05/2010	173,9	187,13
01/06/2010	144	154,99
01/07/2010	134,8	145,02
02/08/2010	141,2	151,65
01/09/2010	141,8	152,07
01/10/2010	141,1	151,11
01/11/2010	149,9	160,04
01/12/2010	167,8	178,76
04/01/2011	171	181,35
01/02/2011	185,6	196,30
01/03/2011	180,1	189,76
01/04/2011	173,9	182,24
03/05/2011	182,6	190,70
01/06/2011	168,8	175,61
01/07/2011	167,7	174,21
01/08/2011	176,1	182,51
01/09/2011	180,4	186,48
03/10/2011	171,3	176,63
01/11/2011	119,3	123,03
01/12/2011	133,6	137,58
03/01/2012	138,3	142,36
01/02/2012	142,8	146,69
01/03/2012	143,2	146,69
02/04/2012	147,6	150,73
01/05/2012	145,4	148,48
01/06/2012	135	138,05
02/07/2012	133,5	136,35
01/08/2012	117,4	119,95
03/09/2012	89,1	90,56
01/10/2012	104,2	105,36
01/11/2012	120,3	121,43
03/12/2012	115,3	116,67
02/01/2013	144,9	146,57
01/02/2013	153,2	154,93
01/03/2013	150,6	151,27
01/04/2013	137,3	138,17
02/05/2013	129,4	130,70
03/06/2013	111,9	112,85
01/07/2013	116,9	117,33
01/08/2013	129,7	129,97
02/09/2013	138,7	138,87
01/10/2013	131,4	131,32

Tabela 6 – Preço de histórico do minério de ferro em US$/ton
Fonte: TSIPIO62 Index

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

O desvio padrão calculado para o período de 2008 a 2013 é de 38,21% (real). Pelo fato do minério de ferro não ser um ativo de mercado, pois não é uma commodity, assumiremos que o desvio padrão do ativo σ_P será de38%.

Como opções associadas a um projeto somente podem ser avaliadas utilizando o princípio da neutralidade ao risco se o valor do projeto variar seguindo um MGB (Copeland e Antikarov, 2003), o preço do minério seguirá então um MGB, com *drift* de 2% ao ano, conforme a equação a seguir:

$$dP = \alpha P dt + P\sigma_P dz \quad (4.1)$$

onde:

dP é a variação incremental do preço no intervalo de tempo dt;

αé a taxa de crescimento do preço no intervalo de tempo dt;

σ_Pé a volatilidade do preço do minério; e

$dz = \varepsilon\sqrt{dt}$, onde ε ∈ N (0,1)é um processo de Wiener padrão.

Este processo em tempo discreto, utilizando períodos anuais, nos fornece o preço em cada ano, em função do valor do ano interior:

$$P_{t+1} = P_t + P_t\alpha_t + P_t\sigma_P\varepsilon \quad (4.2)$$

A taxa de crescimento do preço do minério foi considerada constante, portanto a variável de *drift* α_t é de 2%.

Simulando diversos cenários do modelo estocástico pudemos montar a Figura 10, que descreve as diferentes variações de preço que o ativo pode percorrer ao longo do tempo.

Com a modelagem estocástica da única incerteza do projeto já definida, é preciso conhecer a volatilidade do valor do projeto. Fazendo a Simulação de Monte Carlo, utilizando o MGB do preço do minério, obtemos a seguinte distribuição do valor presente do projeto após 10 mil interações:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

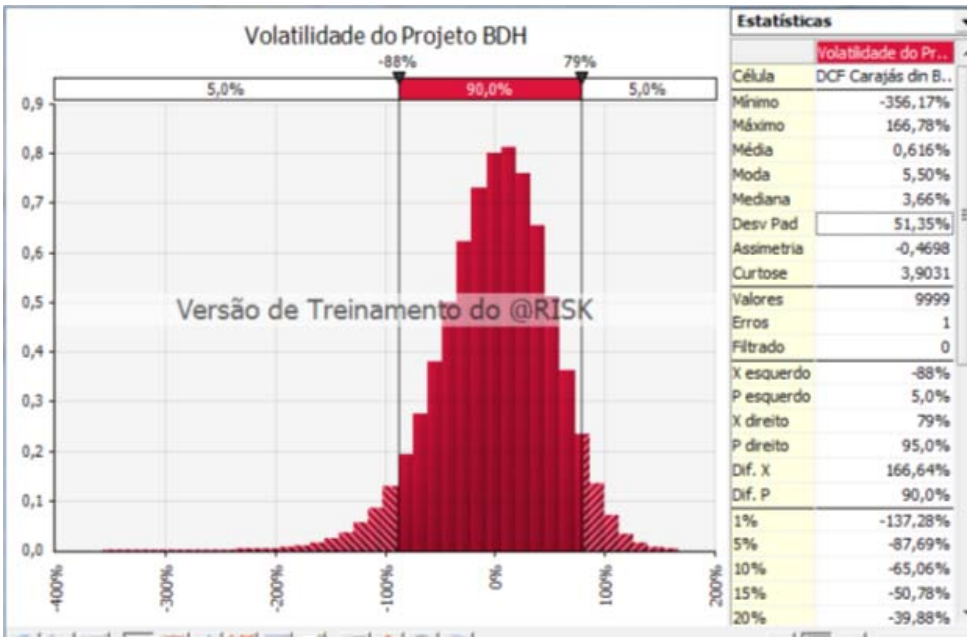

Figura 10 – Valor esperado do projeto
Fonte: @RISK

O valor do projeto médio encontrado através do modelo estocástico é bem próximo do valor obtido no modelo determinístico, pois o preço esperado do minérioserá o mesmo.

Para calcularmos a taxa de retorno anualizada do projeto, em tempo contínuo, e seu desvio padrão, ou volatilidade, precisamos obter a distribuição da seguinte variável:

$$V=\ln(\frac{V_1}{V_0}) \qquad (4.3)$$

onde V_0 é o valor presente do projeto obtido no cenário determinístico, V_1 é a variável estocástica do valor do projeto daqui a um ano, que incorpora o fluxo de caixa FC_1 do projeto no ano 1. Através da Simulação de Monte Carlo, com um número de interações suficientes, podemos obter o desvio padrão da taxa de retorno v. Realizando 3 simulações foram obtidos os seguintes resultados de volatilidade apresentados abaixo:

- Simulação 1: 51,35%
- Simulação 2: 51,66%
- Simulação 3: 51,34%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

A volatilidade do projeto foi de cerca de σ_v=0,51, demonstrando que o projeto possui uma volatilidade superior a volatilidade do preço do minério, que é $\sigma_P = 0{,}38$.

4.5.3. Aplicando o modelo binomial

De posse do Valor Presente do Projeto (*VP*) e de usa volatilidade (σ), utilizando o software DPL™, podemos modelar a distribuição estocástica do projeto como um Movimento Geométrico Browniano por meio de um modelo Binomial (BRANDÃO, 2002). A probabilidade de subida é dada por $p = \frac{e^{\mu.t} - d}{u - d}$, onde, $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$ e $d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$.

Calculando os parâmetros *u*, *d*, *p* e 1-*p*:

$$u = e^{0{,}5\sqrt{1}} = 1{,}6653$$

$$d = \frac{1}{u} = \frac{1}{1{,}6653} = 0{,}6005$$

$$p = \frac{(1+r)^t - d}{u - d} = \frac{1{,}0500 - 0{,}6005}{1{,}6653 - 0{,}6005} = \frac{0{,}4495}{0{,}0648} = 0{,}4221$$

$$1 - p = 1 - 0{,}4221 = 0{,}5778$$

Para esta modelagem, utilizamos o método alternativo ao de Copeland e Antikarov (2001) proposto por Brandão (2002), que utiliza a árvore de decisão como um modelo binomial para modelar o valor de projeto em função de seus fluxos de caixa estocásticos, de maneira que o valor do projeto siga um Movimento Geométrico Browniano.

De acordo com Brandão (2002), este método tem vantagem de aplicação pelos seguintes fatores: é de simples aplicação; pode ser utilizado em softwares de árvore de decisão, que permite a modelagem das flexibilidades diretamente no modelo; e os fluxos de caixa de cada ano mantêm uma relação linear com as entradas do projeto, que facilita a modelagem das opções.

O Apêndice apresenta o modelo da árvore binomial do projeto com um número de estágios 2^{40}, no qual cada nó de incerteza indica que ela ocorre em cada um dos estágios do período anterior.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

A árvore de decisão gerada a partir do modelo com probabilidades neutras a riscos, que está apresentada com apenas quatro períodos na Figura 11, tem como resultado US$ 76,8bilhões, semelhante ao calculado pelo método tradicional de FCD.

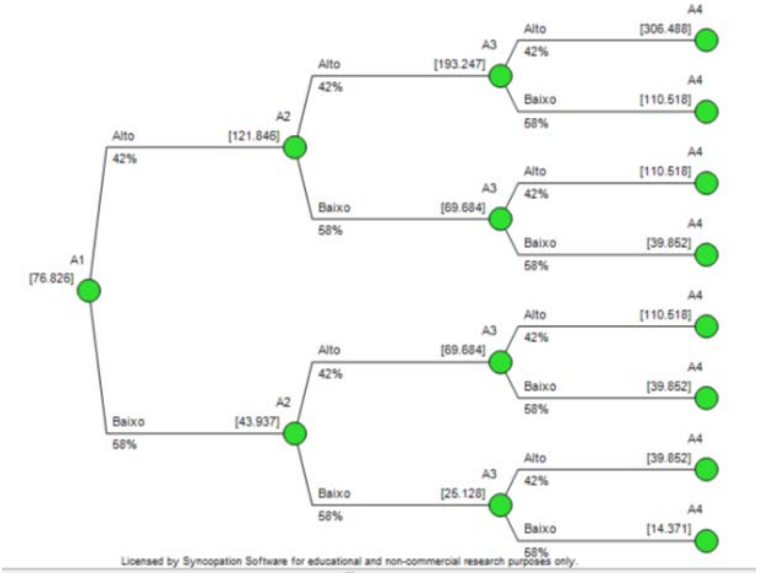

Figura 11 – Árvore de eventos do projeto sem opção
Fonte: Synoopation Software

4.5.4. Opção de expandir a capacidade de produção

Na árvore anterior, foram incorporadas duas opções de expansão que representam oportunidades para expandir a capacidade do projeto em 90 mtpa no ano 3 com um investimento de US$ 19,49 bilhões. O Apêndice apresenta o modelo da árvore binomial de decisão com opção de expansão. A Figura 12 apresenta o valor do projeto com a opção de expansão de US$ 99,269 bilhões. Verificamos que o valor do projeto aumenta de US$ 76,826 bilhões para US$ 99,269 bilhões com a presença das opções de expansão do projeto. A diferença entre estes valores, que é igual a US$ 22,442 bilhões representa o valor da opção de expansão, também chamado de prêmio da opção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

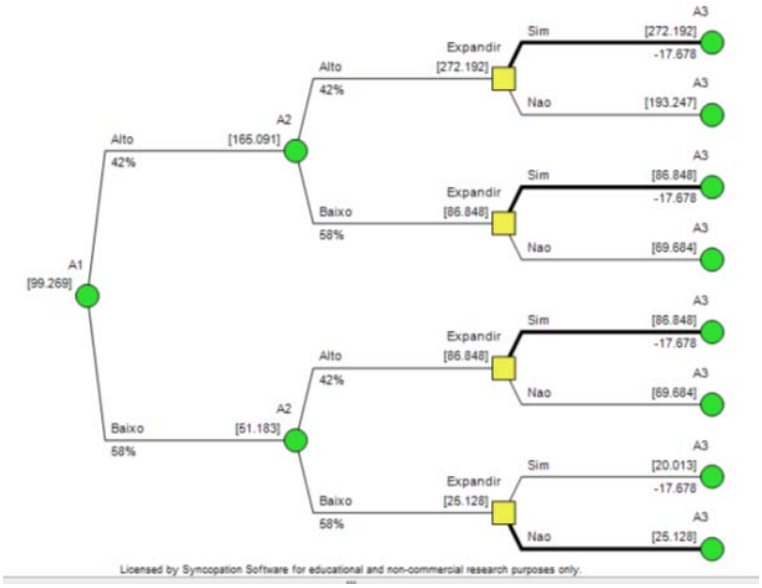

Figura 12 – Árvore de decisão do projeto com opção de expansão
Fonte: Synoopation Software

Analisando a Figura 13, verificamos que a política ótima de investimento será a expansão da capacidade no ano 3.

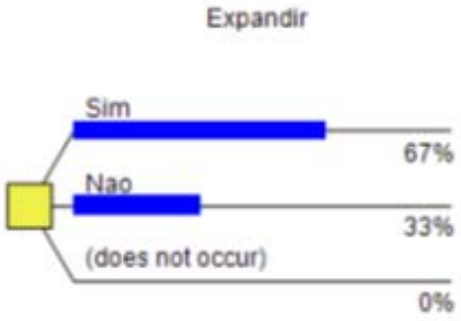

Figura 13 – Política ótima de investimentos – opção de expansão
Fonte: Dados do estudo

A Figura 14 apresenta os valores do projeto sem flexibilidade e com a incorporação das flexibilidades de expansão. Os dados confirmam a captura do valor da flexibilidade gerencial pelo uso da abordagem da teoria das opções reais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA

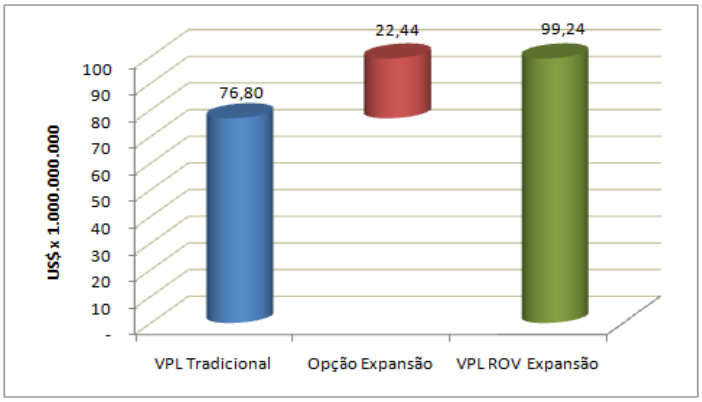

Figura 14 – Valor da opção
Fonte: Dados do estudo

O presente capítulo demonstrou a aplicação da teoria das opções reais com a abordagem em tempo discreto, com o uso de árvore de decisão binomial proposto por Brandão (2002) e com o uso de software computacional proposto Brandão e Dyer (2005). Apresentou os resultados de um estudo de caso do projeto Carajás com expansão para a mina de S11D.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212770/CA