

## 6

### Aplicação a *smelter* de alumínio

#### 6.1.

##### Introdução

Conforme apresentado no início deste trabalho, a indústria brasileira de alumínio apresenta um reduzido número de grandes empresas, a maioria ligada a grandes mineradoras multinacionais (tais como Rio Tinto Alcan, BHP e Vale). Uma importante característica dessas empresas é a verticalização das operações, uma vez que maior parte opera em toda a “cadeia mineral” do alumínio, desde a mineração da bauxita, passando pela produção da alumina até produção do alumínio primário<sup>1</sup>.

Quanto ao fornecimento de energia elétrica, a maioria das empresas vem investindo em auto-geração, a fim de reduzir riscos de falta de fornecimento (via racionamentos ou via quebra de contratos) e a oscilação do preço. Por exemplo, em abril 2008 a Novelis anunciou a intenção de investir na construção de PCHs a fim de tornar-se auto-suficiente em energia e assim poder deixar o mercado livre. Em Janeiro de 2008, o preço no mercado spot atingiu o teto e a Novelis decidiu parar a operação<sup>2</sup>.

Adicionalmente, grandes investimentos foram feitos em desenvolvimento tecnológico a fim de reduzir o consumo específico, tornando a indústria brasileira de alumínio uma das mais eficientes do mundo neste quesito. Outra iniciativa importante é a utilização de material

---

<sup>1</sup> Ao contrário da Alcan, Alcoa, CBA e Novelis, a Vale opera nas três etapas com empresas diferentes (MRN (bauxita), Alunorte (alumina), Albrás (alumínio) e Valesul (alumínio)).

<sup>2</sup> Em 2008, a empresa produzia 60% da energia que consome. O restante era comprado da Cemig, estatal mineira que também comercializa energia no mercado livre. A carga de energia comprada no mercado estava vinculada a um contrato que previa que, caso o preço do insumo no PLD passasse de R\$ 120 por MWh, seria disparado um gatilho de correção. Com o PLD a R\$ 569,59, por exemplo, a Novelis teria que pagar este valor pela energia comprada no mercado spot.

reciclado na produção, o que reduz em 95% a necessidade de energia, segundo a ABAL, Gazeta Mercantil (2001).

O estudo de caso apresentado a seguir busca medir o valor capturado pela redução da incerteza do preço de energia elétrica. Será criada uma empresa hipotética que participa de toda a cadeia mineral e, antecipando um movimento generalizado na indústria em questão, já autosuficiente em energia elétrica. Com isso, a empresa não só garante o seu fornecimento como também pode tomar a decisão de reduzir a produção de alumínio e vender a energia excedente a fim maximizar seus ganhos. No limite, a empresa pode também abandonar a produção de alumínio (ou produzir alumínio a partir de material reciclado) e se dedicar a venda de energia (no mercado *spot* ou não). Apesar de aparentemente pouco factível a primeira vista, estas opções são relevantes na medida em que algumas das empresas de alumínio fazem parte de grandes grupos industriais<sup>3</sup> e a geração antes dedicada ao alumínio pode ser transferido para outras atividades.

## 6.2. Elementos da opção

Neste ponto, faz-se referência aos principais elementos da Teoria de Opções Reais: incerteza, flexibilidade gerencial e irreversibilidade, que foram apresentados anteriormente neste trabalho.

A incerteza refere-se aos retornos futuros que não podem ser previstos deterministicamente, pois dependem das condições futuras do ambiente de negócios e do ambiente interno de tomada de decisão. Na melhor das hipóteses, é possível calcular as probabilidades dos resultados possíveis que podem gerar retornos maiores ou menores para o investimento. As incertezas podem ser de origem econômica, técnica, regulatória, entre outras, e são as fontes de risco de um projeto. No caso do *smelter* de alumínio, a principal incerteza é a cotação do alumínio, que além de definir o preço *spot* é a referencia para os contratos comerciais.

---

<sup>3</sup> A CBA pertence ao Grupo Votorantim e a Albrás e Valesul pertencem a Vale. Ambas as empresa atuam em outras atividades que demandam muita energia elétrica, por exemplo: cimento, siderurgia e pelotização.

Nenhuma empresa isoladamente tem poder de mercado suficiente para influenciar a cotação na LME.

A flexibilidade gerencial é a possibilidade de rever e alterar o planejamento original de um projeto ou operação, adaptando-o às novas situações de mercado. No estudo, um *smelter* pode tomar a decisão de alterar sua capacidade produtiva ou abandonar o mercado de alumínio, vendendo a energia disponibilizada por essa decisão. Ou seja, trata-se das opções de alternância de mix de receitas e abandono.

A irreversibilidade diz respeito ao investimento inicial realizado que não pode ser facilmente recuperado imediatamente, devido às especificidades técnicas, que são em grande parte custos afundados e mesmo os investimentos não específicos de firmas ou indústrias que são parcialmente irreversíveis, pois podem ser revendidos a firmas de diferentes indústrias, mas a preços inferiores ao custo de reposição. No caso da indústria de alumínio, é o investimento na construção de todo o complexo industrial, logístico e das fontes de energia.

### **6.3. Premissas**

Como o modelo abordará um *smelter* hipotético, algumas premissas devem ser adotadas:

- O *smelter* inicialmente operará em sua máxima capacidade até que seja interessante fazer uso de alguma opção (alternância ou abandono). Por outro lado, a fonte de energia elétrica sempre operará em seu máximo;
- O *smelter* venderá toda a produção, em todos os momentos, assim como a fonte de energia elétrica;
- Além de energia elétrica e alumina, outros inputs compõem o custo de produção tais como coque, piche, combustíveis e fluoreto de alumínio, que na realidade podem variar em função não só do nível de produção como também da cotação de alguma *commodity* (petróleo ou o próprio alumínio). Para o modelo, esses

itens de gastos permanecerão constantes, dada a dificuldade de obtenção dos dados;

- As despesas administrativas, comerciais, de pessoal, pesquisa e desenvolvimento, entre outras, permanecerão constantes. Essa premissa inclui os gastos de operação da fonte de energia elétrica;
- Não há necessidade de investimento em capital de giro ou reinvestimento em imobilizado durante a vida útil do *smelter*;
- Não há custo decorrente do exercício da opção de reduzir a produção de alumínio;
- O *smelter* possui todos os requisitos legais necessários para que sua fonte de energia possa operar normalmente no mercado da CCEE. Na prática, isso é possível com a criação de uma empresa dedicada exclusivamente a gerar e vender energia elétrica<sup>4</sup>.

As premissas acima devem ser adotadas uma vez que não há informação disponível no nível de detalhe necessário para um estudo de caso real.

#### **6.4. Modelo financeiro**

Os indicadores das tabelas 8 e 9 servirão de base para a modelagem das contas de fluxo de caixa do *smelter*. Os dados refletem o tratamento das informações colhidas em diversas fontes como a ABAL e BNDES em comparação com análise de demonstrativos financeiros de 2008 disponibilizados publicamente pelas maiores empresas do setor (a CBA e Albrás).

---

<sup>4</sup> Por exemplo, a Vale possui uma empresa no grupo (a Vale Energia) dedicada a investimentos em projetos de geração de energia (hidrelétrica, termelétrica e gás natural), suprimento das necessidades das diferentes operações da empresa e atua normalmente na CCEE.

Conta	Cálculo
Receitas Operacionais Líquidas	(Volume de Venda Anual x Cotação Média da LME Spot) + (Excedente de EE x Preço Médio Anual da PLD)
- Custo dos Produtos e Serviços	Custo Variável de Alumina + Custos Fixos de Geração de Energia Elétrica, Mão de Obra e Insumos
- Depreciação e Amortização	5% do Custo de Produtos e Serviços
= Lucro Bruto	Receitas operacionais Líquidas - CPV - Depreciação e Amortização
- Despesas Administrativas e Operacionais	Gastos Fixos (Pessoal + Outros)
= Lucro Operacional	Lucro Bruto - Despesas Administrativas e Operacionais
- Impostos Sobre Lucro Operacional	Percentual Fixo (34%) do Lucro Operacional
= Lucro Operacional Após Impostos	Lucro Operacional - Impostos
+ Depreciação e Amortização	5% do Custo de Produtos e Serviços
= Fluxo de Caixa Operacional	Lucro Operacional Após Impostos + Depreciação e Amortização

Tabela 8: Modelo Financeiro

Premissa	Valor
Volume de Produção	500 mil toneladas (ano)
Volume de Vendas	500 mil toneladas (ano)
Custo Variável de Produção - Alumina	US\$ 450/ton ALU (aprox)
Custo Fixo de Produção - Energia	US\$ 220 MM (aprox)
Custo Fixo de Produção - Outros Insumos + Mão de Obra	US\$ 150 MM (aprox)
Despesas Administrativas e Operacionais	US\$ 200 MM (aprox)
Taxa Livre de Risco	6,25%
Vida Útil	5 anos

Tabela 9: Premissas do Modelo Financeiro

#### 6.4.1. Receitas operacionais líquidas

É o somatório das receitas das vendas de alumínio e energia elétrica, caso este segundo ocorra. Como premissa, o volume de vendas de alumínio é igual a capacidade instalada de aproximadamente 500 mil toneladas por ano. Este valor é então multiplicado pela cotação futura da *commodity*, que neste trabalho segue um Movimento Geométrico Browniano, conforme abaixo:

$$\partial P_{alu} = \mu P_{alu} \partial t + \sigma P_{alu} \partial z$$

onde:

- $\partial P_{alu}$  é a variação incremental do preço no intervalo de tempo, um ano;
- $\mu$  é a taxa de crescimento anual do preço da *commodity*;
- $\sigma$  é a volatilidade do preço da *commodity*;
- $\partial z$  é um processo de Wiener padrão.

Analogamente, caso a empresa opte por vender a energia elétrica excedente resultante da redução do volume de produção de alumínio, o preço também seguirá um Movimento Geométrico Browniano, logicamente com as variáveis  $\mu$  e  $\sigma$  ajustadas para a série de preços do PLD:

$$\partial P_{pld} = \mu P_{pld} \partial t + \sigma P_{pld} \partial z.$$

O volume de produção anual adotado no modelo é aproximadamente 10% acima da capacidade produtiva da Albrás (445 mil toneladas/ano) informado no “Form20F” de 2007 da Vale ou 6% acima da capacidade da CBA (470 mil toneladas/ano) informado em seus resultados de 2007, sem considerar a expansão da capacidade desta última para 570 mil toneladas/ano já em 2009 aprovada recentemente. O objetivo é que o volume reflita a realidade dos maiores produtores nacionais de alumínio. Como citado anteriormente, o modelo financeiro assume que toda a produção será vendida e que não há expectativa de se aumentar a capacidade produtiva.

#### 6.4.2. Custos de produção e despesas

As empresas de alumínio no Brasil não informam os dados de custo de produção e despesa numa abertura suficiente para a modelagem. Por isso, foram cruzados dados de composição de custos disponibilizados pela ABAL (já citados anteriormente neste trabalho) com os demonstrativos financeiros das maiores empresas nacionais de alumínio, disponibilizados nos anexos deste trabalho.

- **Custo Variável** – Alumina: foram utilizados os dados da ABAL de volume de alumina necessário para produção de uma tonelada de alumínio (1,95 tonelada) e o percentual deste item no custo de produção do alumínio (28% aproximadamente);
- **Custo Fixo de Produção** - Energia Elétrica: foram utilizados os dados de 15,9MWh/ton de alumínio (dentro do intervalo informado pela ABAL) ao custo unitário de US\$ 7/MWh. Com isso, atingi-se

o percentual de 28% do custo de produção, conforme levantado pela ABAL. Importante destacar que a unidade geradora permanecerá produzindo a plena capacidade, independentemente do nível de produção de alumínio. Ou seja, a unidade sempre produzirá o suficiente para a produção de 500 mil toneladas de alumínio;

- **Custo Fixo de Produção** - Outros Insumos, Mão de Obra e Despesas Administrativas e Operacionais: o somatório destes itens atinge cerca 44% do gasto total anual, em linha com levantamento da ABAL.

Conforme visto, os parâmetros de produção utilizados foram os levantados pelo trabalho da ABAL. Uma forma de averiguar a validade do uso dessas premissas é analisar os dados consolidados dos demonstrativos financeiros publicados pela Albrás e CBA. A análise dos dados de 2007 de ambas as empresas permite concluir que os dados consolidados de CPV (cerca de 70% da receita Líquida) e margem a EBITDA (cerca de 20% da Receita Líquida) estão em linha com os dados do modelo, ou seja, o modelo reflete razoavelmente a realidade.

#### **6.4.3. Taxa de juros**

É a taxa utilizada para descontar os fluxos de caixa do projeto. Esta taxa deve refletir a expectativa do investidor em relação aos riscos assumidos com o projeto, onde  $\beta_{a,m} * (R_m - r)$  é a taxa de desconto ajustada ao risco,  $\pi$  o prêmio de risco e  $r$  a taxa de juros livre de risco, no processo ajustado ao risco utiliza-se  $\mu = r + \pi$ . Num processo neutro ao risco, por outro lado, subtrai-se o prêmio de risco da taxa ajustada ao risco, ou seja, basta calcular  $r = \mu - \pi$ . O prêmio de risco é calculado pelo tradicional modelo CAPM, ou seja por  $\beta_{a,m} * (R_m - r)$ , onde o Beta é a covariância dos retornos das séries de preços com o retorno de referência do mercado de capitais.

Os valores utilizados são reais, portanto já descontam a inflação. O *Rm* utilizado foi a cotação de fechamento mensal do Ibovespa desde 2002 (Jan/02 a Dez/08, 16,82% ao ano). A taxa livre de risco média da TJLP<sup>5</sup> de 2008 (6,25% ao ano). Com esses parâmetros, o custo de capital real anual do *smelter* hipotético é de 11,2% ao ano.

#### **6.4.4. Vida útil**

Na prática, é o horizonte máximo de tempo de capacidade operativa do *smelter* e da unidade geradora de energia elétrica. Para simplificação, o modelo irá adotar o período de 5 e, ao final do projeto, as unidades não terão nenhum valor residual.

#### **6.5. As opções reais do *smelter***

##### **6.5.1. Opção de alternância**

A flexibilidade gerencial a ser estudada é a possibilidade do *smelter* desviar de sua atividade fim, que é a produção e venda de alumínio primário no mercado internacional, e absorver ganhos no mercado de energia elétrica nacional. O intervalo de tempo escolhido para o *smelter* exercer a opção é de um ano. Ou seja, a cada ano, o *smelter* poderá optar por reduzir um percentual fixo de sua produção e vender a energia elétrica excedente no mercado spot<sup>6</sup>. Conclui-se que na realidade é uma opção de alternância, uma vez que a composição de sua receita é a variável afetada pela opção.

---

<sup>5</sup> A Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 1994, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES.

<sup>6</sup> Obviamente, a opção de reduzir o nível de produção de um *smelter* implica em alguns outros custos, explícitos ou implícitos, tais como as decorrentes de demissões, reputação, possibilidade de perder mercado na sua atividade fim, possível pressão por parte do governo local, desgaste com fornecedores, etc. Pela dificuldade de serem medidos e para fins de simplificação, estes custos não serão abordados.

Os contratos comerciais de alumínio primário normalmente são de longo prazo (10, 15 anos), mas possuem uma flexibilidade de negociação de volumes, condições de crédito, garantias e entrega, entre outras variáveis. Como regra geral, há rodadas anuais de renegociações comerciais, daí a escolha do período de um ano para o exercício da opção. Também fica implícito que o *smelter* já possui todos os requisitos legais necessários para operar no mercado de energia *spot* e que encontrará mercado consumidor para sua geração excedente.

Será simulado inicialmente a opção do *smelter* reduzir em 20% sua capacidade de produção anual.

Ano	Caso Base	Opção Real	
	Alumínio (mil t)	Alumínio (mil t)	Energia Elétrica (MW)
Ano 0	500		
Ano 1	500	400	1.592
Ano 2	500	400	1.592
Ano 5	500	400	1.592

Tabela 1: Opção de alternância

Com essa opção, o *smelter* tem a possibilidade de absorver os ganhos oriundos dos preços *spot* de energia elétrica no mercado nacional. Visto de outra forma, o *smelter* ganha uma fonte alternativa de receitas em anos de depressão do mercado internacional de *commodities*, ao invés de simplesmente reduzir a capacidade produtiva.

Essa opção tende a ficar especialmente interessante no cenário atual para o *smelter* brasileiro. A crise econômica global provocou forte queda da *commodity*. Como ilustração, em 31/12/08, o alumínio primário *spot* estava cotado a US\$ 1.540, bem abaixo das médias de 2007 (US\$ 2.662) e 2008 (US\$ 2.450), segundo dados extraídos da plataforma Bloomberg<sup>7</sup>. Sobre as condições internas, o preço da energia *spot* apresentou forte volatilidade e prolongados períodos em elevados patamares, principalmente no segundo semestre de 2007 e o primeiro de 2008.

<sup>7</sup> Consulta realizada ao ticker LOAHDS03 Comdty, referente ao preço *spot* de fechamento do dia do alumínio primário.

## 6.5.2. Opção de abandono

Outra opção a ser analisada é a situação extrema de abandono da produção de alumínio<sup>8</sup>. Neste caso, a única fonte de receita é a capacidade de geração de energia elétrica.

Ano	Caso Base	Opção Real	
	Alumínio (mil t)	Alumínio (mil t)	Energia Elétrica (MW)
Ano 0	500		
Ano 1	500		7.960
Ano 2	500		7.960
Ano 5	500		7.960

Tabela 11: Opção de abandono

## 6.6. Solução

### 6.6.1. Séries de alumínio e energia elétrica

Neste tópico serão calculados alguns parâmetros necessários para a modelagem das opções, tais como as volatilidades das séries de preços a que o *smelter* está sujeito e as correlações entre eles.

Uma breve inspeção visual no gráfico do preço do alumínio primário (figura 15) permite concluir que se trata de uma *commodity* que apresenta crescente volatilidade nos últimos anos. Os últimos 3 anos foram especialmente favoráveis aos *smelters*, uma vez que a *commodity* esteve cotada quase sempre acima US\$ 2.500. O cenário se reverte abruptamente em Setembro de 2008, com o início da crise mundial de crédito.

<sup>8</sup> Outra situação hipotética e que se aproxima dessa opção é a transformação do *smelter* numa unidade produtora de alumínio a partir de material reciclado. Conforme dados da ABAL, essa forma de produção economiza cerca de 95% da energia elétrica necessária.

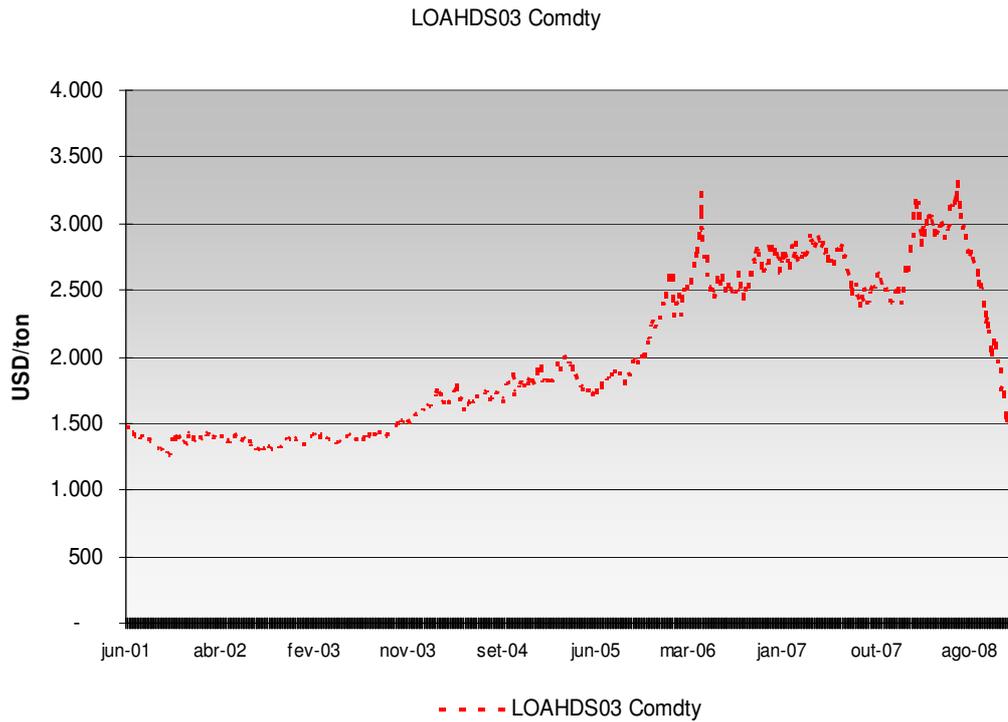


Figura 15: Cotação do alumínio (2001 – 2008)  
Fonte: Bloomberg

Também o preço da energia elétrica *spot* apresentou forte oscilação (figura 16), principalmente nos períodos do apagão de 2001 e finais de 2007/início de 2008, conforma já foi citado.

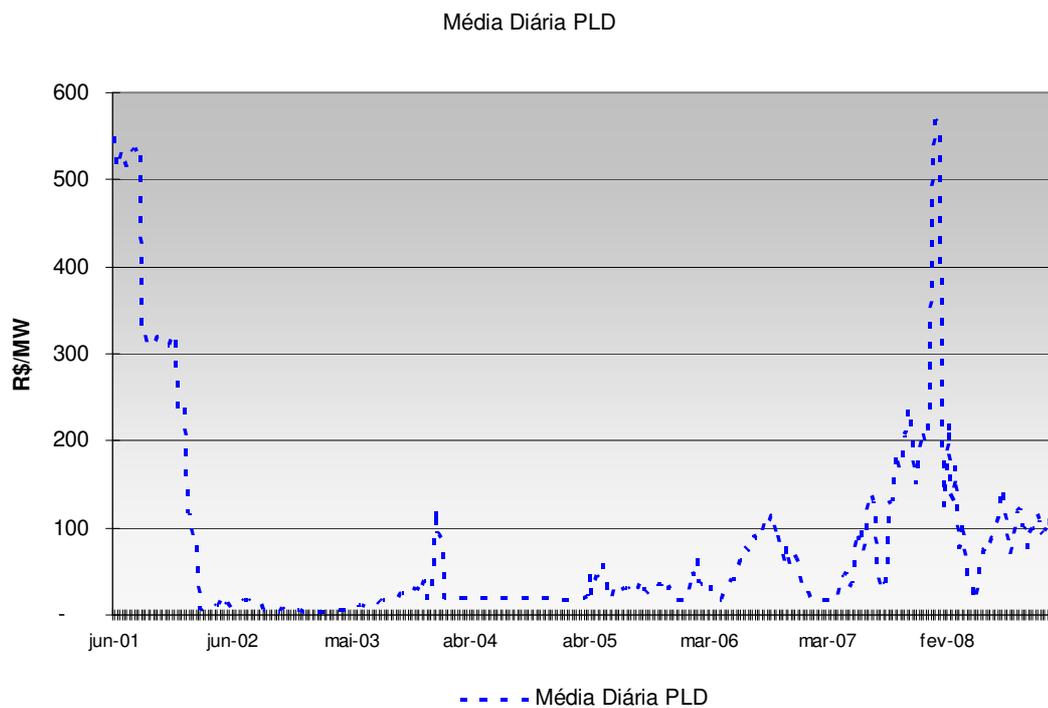


Figura 16: PLD diário (2001 – 2008)  
Fonte: CCEE

O período de tempo a ser analisado inicia-se em 2002 e vai até o último dia de 2008. Essa data foi escolhida para que o tamanho da amostra seja equivalente ao do preço de energia elétrica no mercado *spot*<sup>9</sup>. Também foram expurgados os feriados nos quais não houve cotação para o preço do alumínio ou preço de PLD.

O levantamento dos parâmetros dos processos foi realizado da seguinte forma: a taxa de crescimento foi calculada como a média do log-retorno dos preços tanto de alumínio (preço *spot* da cotação média mensal na LME em US\$ por tonelada) como de PLD. O parâmetro de volatilidade  $\sigma$  é calculado como o desvio padrão dessa série de retornos. Para os valores iniciais das variáveis incertas, correspondentes ao ano de 2008, foram considerados os valores médios mensais (em US\$) desse ano. A razão para tal está em que o ano de 2008 pode ser considerado atípico quanto a intensidade de suas oscilações de preços em todas as *commodities*, inclusive no que tange a energia elétrica no Brasil. Ambos os parâmetros foram calculados em bases anuais, de forma a poderem ser diretamente utilizados no modelo do trabalho. Os valores calculados encontram-se na tabela 12.

Parâmetro - ano	Alumínio (ALU)	PLD
Crescimento( $\mu$ )	10,70%	42,97%
Volatilidade( $\sigma$ )	19,10%	46,52%
Correlação ( $\rho$ )	-0,0188	
Preço inicial (2008)	2.450 US\$/ton	74,15 US\$/MWh

Tabela 12: Parâmetros da modelagem da árvore quadrinomial

### 6.6.2. Modelagem quadrinomial

Como visto anteriormente o modelo quadrinomial proposto por Copeland e Antikarov (2003) permite modelar simultaneamente duas incertezas estocásticas independentes, mas eventualmente correlacionadas. Como no caso do *smelter* auto-suficiente tanto o preço do alumínio quanto da energia elétrica têm comportamentos incertos mas são relevantes para a tomada de decisão sobre as flexibilidades da

<sup>9</sup> 30/06/01 é a primeira data com valor de preço PLD disponível do site da CCEE.

gestão, o trabalho utiliza um modelo quadrinomial para a avaliação das opções reais.

Chamando de X e Y as duas variáveis incertas, e sendo  $\sigma_X$  e  $\sigma_Y$  suas respectivas volatilidades, as expressões de  $u_x$ ,  $d_x$ ,  $u_y$  e  $d_y$  tem o mesmo valor do processo binomial comum. Definimos então:  $\Delta_X = \sigma_X \sqrt{\Delta t}$ ,  $\Delta_Y = \sigma_Y \sqrt{\Delta t}$ , e:  $v_X = r - 1/2\sigma_X^2$ ,  $v_Y = r - 1/2\sigma_Y^2$ , as probabilidades neutras ao risco podem ser calculadas pelas seguintes equações (6 a-d):

$$p_{uu} = \frac{\Delta_X \Delta_Y + \Delta_Y v_X \Delta t + \Delta_X v_Y \Delta t + \rho \sigma_X \sigma_Y \Delta t}{4\Delta_X \Delta_Y}$$

(3 a)

$$p_{ud} = \frac{\Delta_X \Delta_Y + \Delta_Y v_X \Delta t - \Delta_X v_Y \Delta t - \rho \sigma_X \sigma_Y \Delta t}{4\Delta_X \Delta_Y}$$

(3 b)

$$p_{du} = \frac{\Delta_X \Delta_Y - \Delta_Y v_X \Delta t + \Delta_X v_Y \Delta t - \rho \sigma_X \sigma_Y \Delta t}{4\Delta_X \Delta_Y}$$

(3 c)

$$p_{dd} = \frac{\Delta_X \Delta_Y - \Delta_Y v_X \Delta t - \Delta_X v_Y \Delta t + \rho \sigma_X \sigma_Y \Delta t}{4\Delta_X \Delta_Y}$$

(3 d)

Aplicando essas fórmulas para as séries de dados utilizadas, temos as seguintes probabilidades neutras a risco:

Prob. Neutra a Risco	%
$P_{uu}$	27,87%
$P_{ud}$	33,72%
$P_{du}$	17,22%
$P_{dd}$	21,19%

Tabela 13: Probabilidades neutras ao risco

### 6.6.3. Avaliação das opções

#### 6.6.3.1. Fluxo de caixa base

Com já citado anteriormente no texto, a situação inicial da *smelter* hipotético prevê a manutenção de suas operações normais, ou seja, produção de venda de 500 mil toneladas de alumínio primário anualmente. Além disso, sua estrutura de custos e despesas se mantém inalterada durante o período de 5 anos. Com respeito composição das receitas, é necessário reforçar que os preços do alumínio seguirão um Movimento Geométrico Browniano conforme abaixo,

$$\partial P_{alu} = \mu P_{alu} \partial t + \sigma P_{alu} \partial z$$

Onde os principais parâmetros, calculados a partir das séries da LME são:

- $\mu = 19,1\%$ ;
- $\sigma = 10,7\%$ ;
- $u = 1,21046$ ;
- $d = 0,82613$ .

Para sustentar o uso do MGB na modelagem do alumínio, foi aplicado o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller na série temporal da *commodity*. Conforme Bastian-Pinto, Brandão e Hahn (2009), segundo este teste a série temporal  $x_t - x_{t-1} = a + (b-1)x_{t-1} + \varepsilon_t$  conduz ao teste de hipótese  $H_o : (b-1) = 0$ , ou  $H_o : b = 1$ . A hipótese nula é da existência de raiz unitária, ou que a série é não estacionária. Caso a hipótese nula possa ser rejeitada, existe subsídio para defender a característica de reversão à média (o que enfraquece o uso de MGB).

Foi feito o teste para a série da média mensal da cotação ao alumínio primário na LME e foi obtida a seguinte estatística-t para o teste de hipótese:

- o Estatística-t Preço Alumínio: -1,431125

Este valor deve então ser confrontado com os valores críticos da série apresentado na tabela 14 abaixo:

Nível	Valores críticos
1,00%	-3,51229
5,00%	-2,897223
10,00%	-2,585861

Tabela 14: Teste de raiz unitária para alumínio

Observa-se que a estatística-t do alumínio não conduz a rejeição da hipótese nula do teste, portanto o uso de MGB não deve ser rejeitada para a amostra analisada.

Assumindo essas premissas, o preço do alumínio evolui ao longo do tempo conforme a árvore abaixo (figura 18), preço do alumínio em mil US\$/ton:

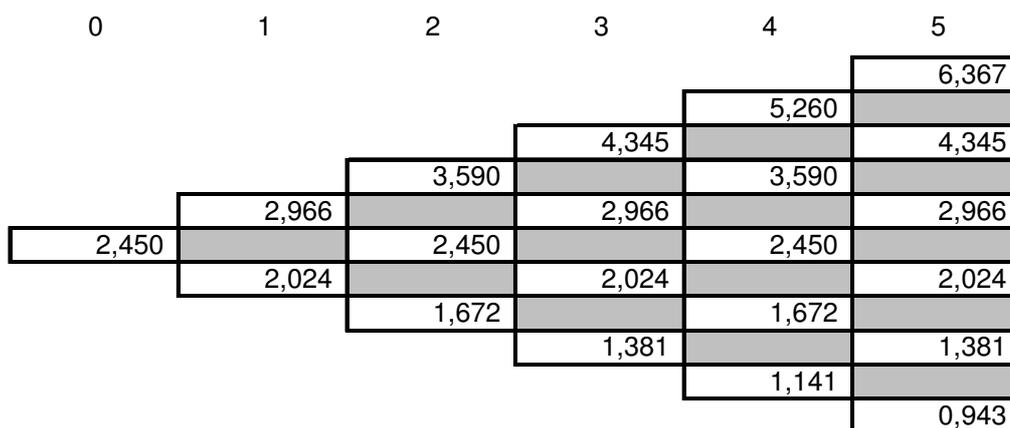


Figura 17: Árvore do preço do alumínio (US\$/ton)

Com esse comportamento de preços do alumínio primário e a estrutura de custo da empresa conforme abaixo:

- Custo Variável = US\$ 225 MM, constante ao longo do período em função do volume de produção constante;
- Custo e Despesas Fixas = US\$ 570 MM;
- IR = 34%.

Tem-se o seguinte fluxo de caixa em cada nó (em US\$ MM):

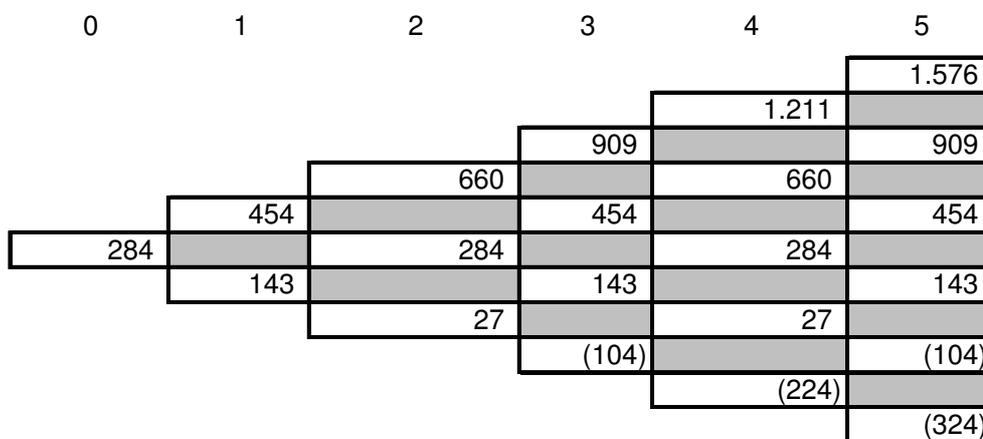


Figura 18: Fluxo de Caixa em cada nó

Para o cálculo do Valor Presente do caso base, faz-se necessário acrescentar dois parâmetros, a probabilidade neutra a risco e a taxa livre de risco:

- $p = 61,5\%$ ;
- $r = 6,25\%$ ;

Com esses parâmetros faz-se a conta no sentido “ano 5 – ano 0”, ou de traz para frente, aplicando  $p$  nos nós onde há crescimento do preço e  $1/p$  nos nós de redução de preços. Valores em US\$ MM:

	0	1	2	3	4	5
						1.576
					2.453	
				2.818		909
			2.818		1.351	
		2.560		1.453		454
	1.842		1.312		598	
		993		516		143
			250		72	
				(208)		(104)
					(402)	
						(324)

Figura 19: Cálculo do valor presente do caso base

O resultado final é o cálculo de um valor presente de US\$ 1.842 MM para o *smelter* hipotético no caso base.

### 6.6.3.2. Opção de alternância

A primeira opção a ser analisada é a do *smelter* reduzir sua capacidade produtiva de alumínio em 20% a fim de vender a energia excedente no mercado *spot*. Obviamente, a decisão de reduzir só será tomada caso haja uma expectativa de que o fluxo de caixa composto pelo mix de 400 mil toneladas de alumínio e a energia excedente supere o fluxo de caixa composto por 500 mil toneladas de alumínio.

Com duas variáveis estocásticas independentes utilizaremos a modelagem quadrimomial. Em cada nó da árvore quadrimomial será calculado o fluxo de caixa nesse período pelas duas possibilidades: o caso base de produção e venda de 500 mil toneladas de alumínio, e a opção de redução de produção de alumínio em 100 mil toneladas e a venda do excedente de energia elétrica produzida. Será então escolhida a

opção nesse nó que maximiza o fluxo de caixa em função dos preços de alumínio e PLD.

O preço da energia elétrica, medido pelo PLD seguirá um Movimento Geométrico Browniano conforme abaixo,

$$\partial P_{pld} = \mu P_{pld} \partial t + \sigma P_{pld} \partial z$$

Onde os principais parâmetros, calculados a partir das séries disponibilizadas pela CCEE são:

- $\mu = 42,9\%$ ;
- $\sigma = 46,5\%$ ;
- $u = 1,59235$ ;
- $d = 0,62800$ .

Para a série do PLD também foi utilizado o teste de raiz unitária aplicada ao alumínio, citado anteriormente. Ao contrário daquela série, o PLD conduz a rejeição da hipótese nula de presença de raiz unitária, conforme pode ser observado o valor da estatística-t do PLD face aos valores críticos da tabela 15 abaixo:

- Estatística-t PLD: -3,857810

Nível	Valores críticos
1,00%	-3,511262
5,00%	-2,896779
10,00%	-2,585626

Tabela 15 Teste de raiz unitária para PLD

Porém, foi mantido o uso do MGB para modelagem da opção em função das características da precificação do PLD (incertezas meteorológicas, atrasos de projetos hidrelétricos, entre outros) e da praticidade computacional desta técnica.

Assumindo essas premissas, o PLD evolui ao longo do tempo conforme a árvore abaixo (US\$/GWh):

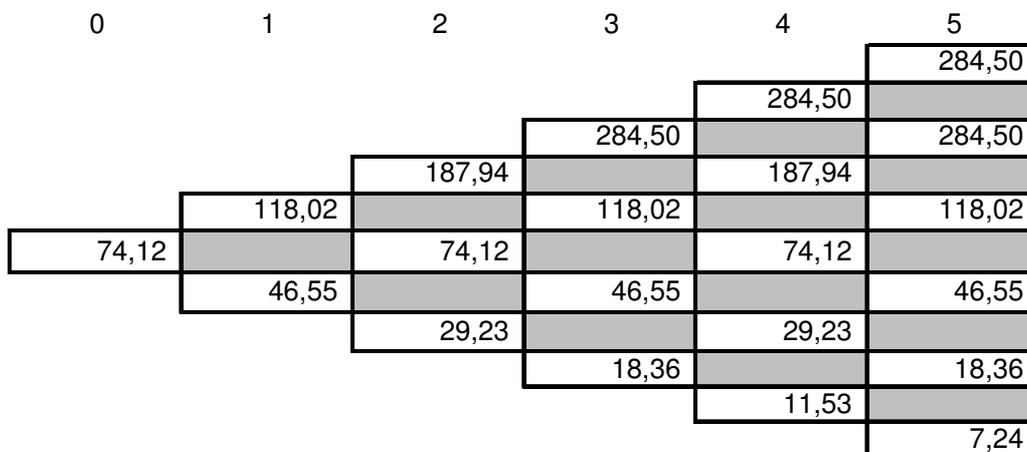


Figura 20: Árvore do preço PLD

Dois pontos merecem ser lembrados neste momento. Primeiro, o PLD possui um teto estabelecido pela CCEE, em 2008 este teto foi de R\$ 569. Daí que os nós superiores da árvore acima se repetem nos anos 3, 4 e 5. Segundo, caso o *smelter* opte pela redução do volume produzido, há uma redução do Custo Variável, que chega a um valor de US\$ 180 MM anuais.

A decisão a ser tomada é totalmente reversível no período posterior, e independe da decisão tomada no período anterior, o que transforma esta opção num conjunto de opções de compra europeias (*bundle of european call options*). Após essa escolha será então calculado o valor presente do projeto com vida de cinco anos, descontado os fluxos de caixa já maximizados ao longo da árvore quadrinomial, ponderando pelas probabilidades neutras ao risco de cada variável. Esta árvore é descontada à taxa livre de risco, pois as probabilidades já estão calculadas com essa consideração.

Quando consideramos a opção de alternância o *smelter* tem um acréscimo de valor de 27,3%, atingindo US\$ 2.353 MM. Destaca-se o predomínio da opção de alternância nos nós superiores das séries de preços. Isso se deve claramente à fortíssima volatilidade do PLD, que atinge seu pico já no terceiro ano.

A visualização da árvore otimizada é muito difícil, uma vez que ela toma um aspecto “tridimensional” no caso de duas variáveis independentes. Porém a tabela 16 com os fluxos de caixa de um ano ajuda a visualizar em que condições a opção de alternância é exercida.

ALU (000 USD/t)	PLD (USD/MWh)	FC 100% ALU (USD MM)	FC 80% ALU 20% PLD (USD MM)	OPÇÃO	ALU (000 USD/t)	PLD (USD/MWh)	FC 100% ALU (USD MM)	FC 80% ALU 20% PLD (USD MM)	OPÇÃO
0,94	7	(324)	(361)		2,02	7	143	71	
0,94	18	(324)	(344)		2,02	18	143	89	
0,94	47	(324)	(299)	Exerce	2,02	47	143	134	
0,94	118	(324)	(185)	Exerce	2,02	118	143	247	Exerce
0,94	285	(324)	79	Exerce	2,02	285	143	512	Exerce
1,14	12	(224)	(275)		2,45	12	284	248	
1,14	29	(224)	(247)		2,45	29	284	276	
1,14	74	(224)	(176)	Exerce	2,45	74	284	348	Exerce
1,14	188	(224)	5	Exerce	2,45	188	284	529	Exerce
1,14	285	(224)	159	Exerce	2,45	285	284	682	Exerce
1,38	7	(104)	(186)		2,97	7	454	448	
1,38	18	(104)	(168)		2,97	18	454	465	Exerce
1,38	47	(104)	(123)		2,97	47	454	510	Exerce
1,38	118	(104)	(10)	Exerce	2,97	118	454	624	Exerce
1,38	285	(104)	255	Exerce	2,97	285	454	889	Exerce
1,67	12	27	(63)						
1,67	29	27	(35)						
1,67	74	27	37	Exerce					
1,67	188	27	218	Exerce					
1,67	285	27	371	Exerce					

Tabela 16: Análise do exercício da opção de alternância

A tabela 16 acima não traz todas as combinações possíveis da árvore quadrinomial, portanto não traz todo o valor da opção. Foi incluído apenas o intervalo de cotação do alumínio mais plausível.

Uma análise dos dados revela que, para cada patamar de preço do alumínio, a opção se torna uma oportunidade de geração de valor a medida que o PLD aumenta, como era previsto.

#### 6.6.4. Opção de abandono do alumínio

Outra opção a ser analisada é a situação extrema de abandono da produção de alumínio. Neste caso, a única fonte de receita é a capacidade de geração de energia elétrica. A venda de alumínio vai a zero e a empresa se dedicaria apenas a venda de energia elétrica, aproximadamente 7,96 GWh anuais. Permanece inalterada a estrutura de custo fixo (US\$ 570 MM), enquanto que o Custo Variável torna-se nulo (as

componentes variáveis da produção no modelo referem-se apenas a produção de alumínio).

Esta opção difere da opção de conversão em que ela é uma decisão irreversível: uma vez abandonada a produção de alumínio primário, ela só poderá ser retomada com investimentos de uma nova planta de produção. Portanto o cálculo dessa opção deverá ser feito de forma recursiva “de traz para frente” ou “*backwards*”. Isso caracteriza uma opção de compra americana (*american call option*). No passo final da árvore (ano 5) será escolhido o fluxo de caixa máximo entre aqueles já selecionados na opção de alternância, e aquele da opção de abandono. Indo para o período anterior, em cada nó da árvore quadrinomial, será escolhido o valor máximo entre a continuação, ou seja manter a planta operando na opção de alternância, ou o valor presente da opção de abandono. Novamente esta árvore é descontada à taxa livre de risco, pois as probabilidades já estão calculadas com essa consideração.

Quando consideramos a opção de abandono o valor do *smelter* passa para US\$ 2.573 MM, ou um acréscimo de 39,4% sobre o caso base e 9,3% sobre a opção de alternância. Mais uma vez, a alta volatilidade do PLD foi o fator mais relevante, uma vez que nos nós superiores torna-se mais interessante abrir mão da produção de alumínio para a venda apenas de energia elétrica. A tabela 17 com os fluxos de caixa de um ano ajuda a visualizar em que condições a opção de alternância é exercida.

ALU (000 USD/t)	PLD (USD/MWh)	FC 100% ALU (USD MM)	FC 100% PLD (USD MM)	OPÇÃO	ALU (000 USD/t)	PLD (USD/MWh)	FC 100% ALU (USD MM)	FC 100% PLD (USD MM)	OPÇÃO
0,94	7	(324)	(512)		2,02	7	143	(512)	
0,94	18	(324)	(424)		2,02	18	143	(424)	
0,94	47	(324)	(199)	Exerce	2,02	47	143	(199)	
0,94	118	(324)	369	Exerce	2,02	118	143	369	Exerce
0,94	285	(324)	1.695	Exerce	2,02	285	143	1.695	Exerce
1,14	12	(224)	(478)		2,45	12	284	(478)	
1,14	29	(224)	(337)		2,45	29	284	(337)	
1,14	74	(224)	20	Exerce	2,45	74	284	20	
1,14	188	(224)	926	Exerce	2,45	188	284	926	Exerce
1,14	285	(224)	1.695	Exerce	2,45	285	284	1.695	Exerce
1,38	7	(104)	(512)		2,97	7	454	(512)	
1,38	18	(104)	(424)		2,97	18	454	(424)	
1,38	47	(104)	(199)		2,97	47	454	(199)	
1,38	118	(104)	369	Exerce	2,97	118	454	369	
1,38	285	(104)	1.695	Exerce	2,97	285	454	1.695	Exerce
1,67	12	27	(478)						
1,67	29	27	(337)						
1,67	74	27	20						
1,67	188	27	926	Exerce					
1,67	285	27	1.695	Exerce					

Tabela 17: Análise do exercício da opção de abandono do alumínio

### 6.6.5. Sensibilidade a alterações nas volatilidades

Um dos principais fatores para a avaliação de uma opção real é a volatilidade do ativo. No caso analisado, as principais volatilidades referem-se aos itens de receita, a cotação do alumínio e o PLD.

O primeiro exercício foi feito com diferentes valores para volatilidade do alumínio e um valor constante para a volatilidade do PLD (mantido igual ao valor do caso base). Foram calculados novos valores para o *smelter* com as opções de alternância e abandono e comparou-se com o valor presente do caso base.

Como pode ser visto na Figura 21, há um aumento gradativo do valor das opções de alternância e de abandono a medida que cresce a volatilidade do alumínio.

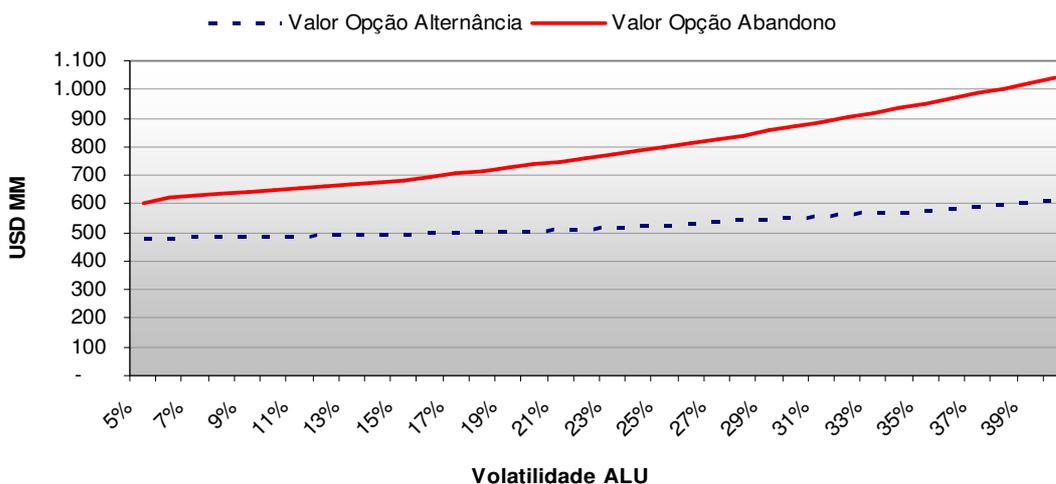


Figura 21: Sensibilidade a volatilidade do alumínio

Esse comportamento vem de encontro com o que prevê a Teoria de Opções Reais. Ou seja, com a flexibilidade gerencial de alterar o mix de vendas, o *smelter* pode evitar perdas excessivas (no caso de acentuadas quedas do alumínio) ao decidir por vender uma parte ou a totalidade de sua geração de energia.

O segundo exercício foi feito com diferentes valores para volatilidade da energia elétrica e um valor constante para a volatilidade do alumínio (mantido igual ao valor do caso base). Foram calculados novos valores para o *smelter* com as opções de alternância e abandono e comparou-se com o valor presente do caso base.

A Figura 22 mostra que há um aumento gradativo do valor das opções de alternância e de abandono a medida que cresce a volatilidade do PLD. Mas esse crescimento se dá até certo ponto, a partir do qual o valor das opções começa a cair. Isso se deve ao teto estabelecido pela CCEE para o PLD (em 2008 este limite máximo foi de R\$ 569). Pelo fato do PLD possuir alta volatilidade, o valor máximo é atingido rapidamente pela modelagem do MGB. Por outro lado, não foi estabelecido um limite mínimo para a energia elétrica na modelagem (para facilitar os cálculos), portanto, as influências dos movimentos de queda do PLD tendem a se acentuar ao longo dos períodos enquanto que os movimentos de subida permanecem limitados.

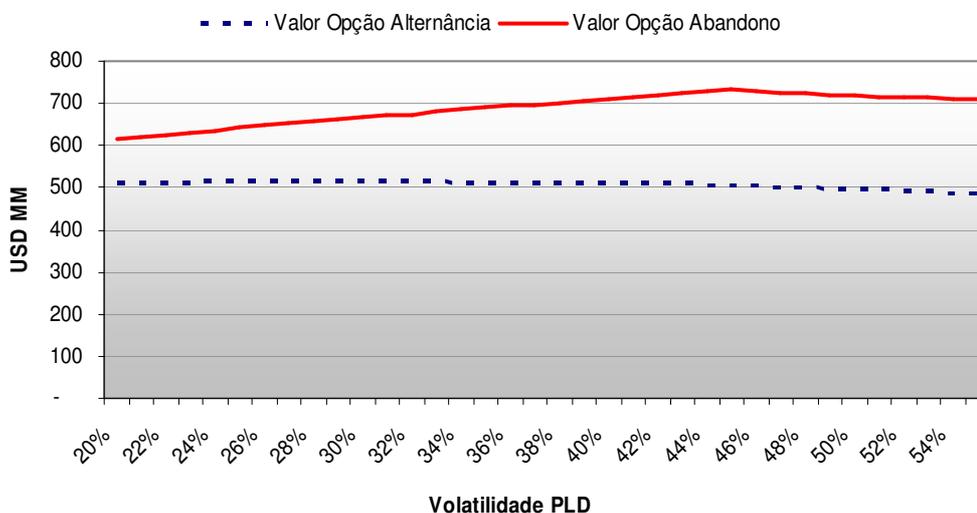


Figura 22: Sensibilidade a volatilidade do PLD, com limite máximo

O terceiro exercício é muito similar ao segundo, pois diferem apenas no fato de não haver trava para o preço da energia elétrica. Como era previsto (figura 23), neste caso o valor das opções seguem movimento de crescimento a medida que aumenta a volatilidade do PLD.

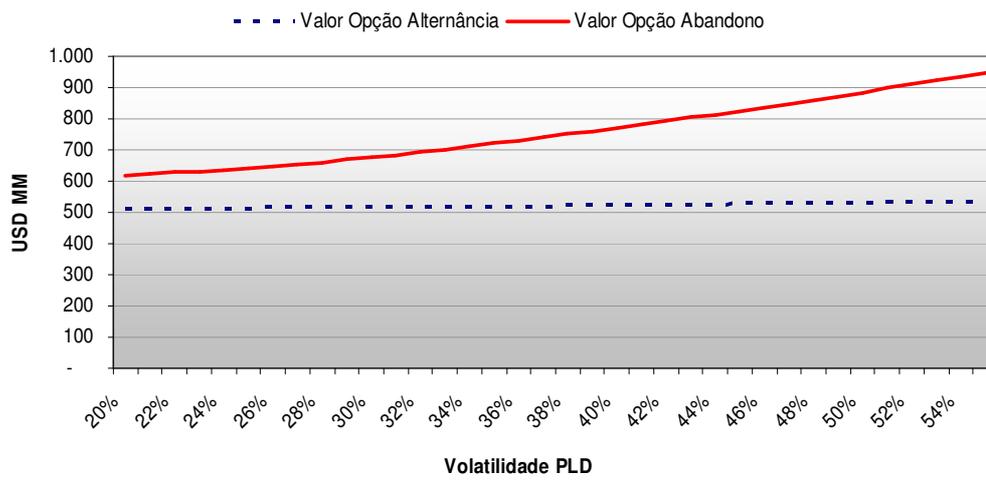


Figura 23: Sensibilidade a volatilidade do PLD, sem limite máximo.