



**IV SINGEP**

**Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade**

**International Symposium on Project Management, Innovation and Sustainability**

ISSN: 2317 - 8302

# **APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS EM PROJETO DE GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA: OPÇÕES DE ADIAMENTO E DE EXPANSÃO**

**HAROLDO G. BRASIL**

Ibmec MG

haroldo.brasil@gmail.com

**ALEXANDRE VASCONCELOS ARONNE**

IBMEC - BH

alexandre.aronne@gmail.com



## APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS EM PROJETO DE GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA: OPÇÕES DE ADIAMENTO E DE EXPANSÃO

### Resumo

Este artigo apresenta critérios de precificação de opções reais em projeto de geração eólica de energia. A opção de adiamento tem sido utilizada como estratégia de agregação de valor aos projetos, na expectativa de surgimento de preço de mercado favorável ao empreendimento. Outra flexibilidade importante do projeto em questão é a possibilidade de expansão da potência instalada, aumentando a quantidade de aerogeradores (“cata-ventos”) dentro da área de outorga, surgindo um *trade-off* interessante entre capacidade instalada e fator de capacidade total. Estas duas opções reais (adiamento e expansão) foram estudadas e são apresentadas neste trabalho. A avaliação das flexibilidades descritas foi feita através de recursos da teoria das opções reais. O modelo binomial foi atribuído como mais adequado, em função da sua simplicidade e aderência às características das flexibilidades detectadas, que são claramente opções de adiamento e expansão americanas. Os resultados sugerem a decisão de investir imediatamente na planta de geração de energia eólica já na versão expandida, uma vez que as condições de exercício, das duas opções, já estão presentes.

**Palavras chave:** opções reais, energia eólica, avaliação de investimento.

### Abstract

This paper presents criteria for the evaluation of real options embedded in a wind power project. The option to postpone is frequently used as a strategy to add value to power projects, as decision makers wait for the favorable market prices for the project. Another important flexibility found in the project is the option to expand the installed capacity of the project, by increasing the number of wind turbines within the concession area, creating an interesting trade-off between installed capacity and capacity factor. These managerial flexibilities are analysed and priced in this paper using the real options framework. The binomial model was used, due to its simplicity and adherence to the features of the flexibilities, which are better modeled as american options. The results suggest investing immediately in the expanded plant, given that the conditions for the exercise of both options are already present.

**Keywords:** real options, wind power, investment valuation



## 1. Introdução

Segundo Fenólio e Minardi (2008), a opção de adiar o investimento na construção de uma usina gera valor significativo para o empreendedor, pois é possível aguardar um momento favorável de preços para vender energia ou a autorização. De acordo com as autoras, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) deveria promover ações que inibam esse tipo de especulação, como por exemplo, aumentar o valor do depósito de garantia para a concessão da outorga.

Por outro lado, as flexibilidades gerenciais podem servir de elemento de fidelização de investidores, uma vez que atuam como proteção (*hedging*). Ademais, a simples identificação, precificação e levantamento de fronteiras de preços de exercício dessas flexibilidades proporciona ao investidor maior conforto quanto ao *timing* ótimo de entrada. Este mapeamento dos riscos envolvidos no projeto e das suas flexibilidades gerenciais é fundamental, na medida em que o investidor racional acredita que os desembolsos de capital apresentam características importantes. Pelo menos em parte, são irreversíveis e podem ser adiados, de modo a se ter oportunidade de esperar por novas informações a respeito dos preços, dos custos e das condições de mercado (Dixit e Pindyck, 1994, pg. 135).

Aggarwal (1993, pg. 169; 170; 187; 188) e Amram e Kulatilaka (1999, pg. 9) consideram que a flexibilidade gerencial representa a habilidade de alterar o rumo estratégico do negócio como reação a mudanças internas e ambientais em contexto competitivo e incerto. As flexibilidades gerenciais englobam as oportunidades de expansão ou de abandono de atividades; de adiamento ou antecipação de investimentos, de modo a se criar sinergias ou reduzir perdas. Em negócios e projetos que operam sob condição de incerteza, é possível medir o valor das flexibilidades estratégicas através de modelos de precificação de opções, cujas variáveis preponderantes incluem volatilidade, taxa de juros, tempo de duração das oportunidades, dimensão do capital investido e distribuição de fluxos de caixa. Projetos com oportunidades de expansão ou retração, de abandono, adiamento, entre outras, recusados devido aos seus VPL negativos, podem ser viáveis quando o valor das suas opções reais embutidas é considerado (Trigeorgis, 1996, pg. 4-15). Além do mais, em contexto que incorpora flexibilidades gerenciais e aspectos relacionados com interação estratégica entre agentes, o valor (expandido ou estratégico) de um negócio inclui seu VPL (ingênuo), o valor da opção representativa da flexibilidade gerencial e o valor da estratégia de interação (*strategic commitment effect*) (Smit e Trigeorgis, 2004, pg. 13).

O objetivo deste artigo é a avaliação de flexibilidades embutidas em um projeto de geração de energia eólica e a determinação das curvas de gatilho para exercício ótimo destas opções reais. Parte-se do pressuposto de que o investidor atua num mercado atomizado e é um tomador de preços (*price taker*). O investidor é proprietário apenas da sua decisão. Ele não é capaz de alterar o sistema de preços através do rumo escolhido. A modelagem estocástica do preço da energia utilizada reflete exatamente essa postura. Este argumento corrobora a afirmação de MacDonald e Siegel (1986) – de que a abordagem comum da teoria das opções reais é a de que o investidor possui poder de mercado absoluto da oportunidade de investimento, configurando uma hipótese simplificadora geralmente assumida neste âmbito, tipicamente no tempo de vida da opção – e vai de encontro à proposição de Dalbem e Bastian-Pinto (2010) – que avaliam resultados de leilões de energia eólica sob a ótica das opções reais em contexto de concorrência caracterizada pelo duopólio. Ressalta-se que este encaminhamento, chamado de *option games* é fundamental, ao considerar a interação entre agentes num contexto de estrutura de mercado específica, em que a decisão nem sempre é tomada de forma independente, mas sim incorporando ações de outros agentes<sup>1</sup>, uma vez que, segundo Smit (1999) e Smit e Trigeorgis (2004, pg. 5), em ambiente dinâmico, a adaptabilidade estratégica é essencial como



resposta apropriada aos movimentos competitivos. Apesar disto, em situações onde o empreendimento já possui a outorga para implantação e operação do parque, a hipótese simplificadora de monopólio da oportunidade de investimento apresenta grande aderência à realidade.

No caso de empreendimentos voltados para a geração de energia, os dois aspectos levantados por Dixit e Pindyck (1994, pg. 135) são facilmente identificáveis, quais sejam, a irreversibilidade dos desembolsos de capital e a possibilidade de adiamento desses desembolsos. As possibilidades de adiamento – e de expansão – são, em parte, advindas do aparato regulatório vigente.

Para atingir o objetivo proposto, este artigo está estruturado em cinco tópicos, incluindo esta Introdução que é o primeiro. O segundo tópico apresenta o caso a ser estudado e é seguido pelo tópico três, que apresenta a modelagem de opções reais utilizada. Seguem os tópicos quatro, com a opção de adiamento e o tópico cinco com a opção de expansão. O tópico seis apresenta as conclusões e recomendações.

## 2. Apresentação do Caso e Obtenção da Volatilidade Simulada

Considera-se no caso estudado que há a possibilidade de licenciamento de usina de geração de energia eólica contemplando duas configurações distintas em termos de capacidade instalada. A primeira consiste na instalação de 15 aero geradores (doravante AG), somando potência de 30 megawatts (MW) e fator de capacidade<sup>ii</sup> de 37,77%. Uma segunda planta mais arrojada envolve a instalação de 43 AG, totalizando potência de 86 MW e fator de capacidade de 35,29%. A redução do fator de capacidade ocorre em função da perda da capacidade de geração de cada AG com a instalação de outro AG mais próximo, na medida em que um equipamento tende a atrapalhar o comportamento do vento para outro.

Com base nas projeções de fluxos de caixa elaboradas previamente para cada alternativa de investimento, foi possível obter o valor presente<sup>iii</sup> (VP) dos fluxos de caixa operacionais (FCO) até a data final do projeto ( $T$ ), apurados antes dos desembolsos de capital, que neste caso ocorrem somente no ano zero. Ou seja,

$$VP = \sum_{t=1}^T \frac{FCO_t}{(1 + wacc)^t} \quad (1)$$

onde

$wacc$  = Custo Médio Ponderado do Capital, assumido como sendo de 9% ao ano, em termos reais.

Os fluxos de caixa foram projetados para 30 anos, coincidentes com o período de concessão. O valor presente líquido da primeira configuração (15 AG) é de R\$ 24.002 mil e o VP dos fluxos operacionais, apurados antes dos desembolsos de capital, foi de 94.710 mil. A versão ampliada (43 AG) tem VPL de R\$ 36.603 mil, sendo o VP de 113.990 mil, computados antes dos desembolsos de capital.

Foram contempladas duas opções reais. A primeira refere-se à possibilidade de adiamento do investimento, podendo os investidores aplicar capital a qualquer momento num horizonte-limite de 5 anos (estabelecido arbitrariamente). A outra flexibilidade estratégica consiste na opção de expandir a operação de uma configuração de 15 AG para 43 AG, também a qualquer momento no mesmo horizonte-limite estipulado.

Foram consideradas três variáveis incertas, para efeito de determinação da volatilidade, que será utilizada na precificação das opções. A principal delas foi o preço de longo prazo da



energia, que foi modelada como sendo um processo estocástico de reversão à média. Segundo Dixit e Pindyck (1994, pg. 135), a modelagem dos preços em conformidade com o movimento geométrico browniano é adequada para ativos financeiros especulativos, mas não para *commodities*. Segundo eles, no curto prazo os preços de *commodities* podem flutuar aleatoriamente, em resposta a fatos recorrentes ou a eventos específicos. Mas no longo prazo, eles são atraídos de volta para os custos marginais de produção. Ou seja, o preço oscila com determinada volatilidade em torno de uma média de longo prazo, sendo atraída à mesma a uma determinada taxa de reversão. Desta forma, optou-se pela modelagem do preço através do processo de reversão à média proposto por Schwartz (1997):

$$dS = \eta(\ln \bar{S} - \ln S)Sdt + \sigma Sdz \quad (2)$$

Onde

$S$  representa o preço de eletricidade;

$\bar{S}$  representa o preço de longo prazo<sup>iv</sup> para o qual o processo converge quando  $\sigma = 0$ ;

$\sigma$  representa a volatilidade do processo e

$dz$  representa o processo de Wiener.

Os parâmetros do processo foram estimados através do método de mínimos quadrados ordinários, seguindo a abordagem implementada por Bastian-Pinto *et al* (2009). Os dados foram obtidos na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e referem-se à série semanal dos preços de liquidação de diferenças (PLD) do sistema sul-sudeste, no período de Janeiro/2005 a Dezembro/2013. A série de preços foi deflacionada pelo IPCA, tendo como data base o mês de Dezembro/2013. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Estimativas obtidas para os parâmetros do processo de reversão à média

Parâmetros Estimados	
Taxa de reversão à media – $\eta$	3,22
Preço de longo prazo <sup>v</sup> – $\bar{S}$	227,47
Volatilidade – $\sigma$	2,44

Fonte: Elaborado pelos autores

Para efeito da simulação de Monte Carlo, foi utilizada a discretização exata abaixo, utilizando-se  $\Delta t = 1$ , ou seja, o intervalo entre dois momentos consecutivos no tempo é de um ano:

$$S_t = e^{\left( \ln(S_{t-1})e^{-\eta\Delta t} + \left[ \ln(\bar{S}) - \frac{\sigma^2}{2\eta} \right] (1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2\eta\Delta t}}{2\eta}} \varepsilon_t \right)} \quad (3)$$

Onde  $\varepsilon_t \sim N(0,1)$ .

O fator de capacidade foi considerado como variável aleatória, de distribuição triangular (escolhida por não haver histórico dessa variável), com valores máximo e mínimo 10% acima e abaixo do valor determinístico, respectivamente.

A taxa de câmbio (TC), considerada como sendo paridade de troca entre ativos financeiros (US\$ e R\$), foi modelada como sendo de ruído branco (*random walk*) sem crescimento, conforme equação abaixo:



$$TC_t = TC_{t-1} e^{-\frac{\sigma^2}{2} \cdot dz} \quad (4)$$

Utilizando-se dados obtidos no Banco Central (série ptax 800), do período de Janeiro/2005 a Dezembro/2013, a volatilidade anualizada da taxa de câmbio foi estimada em 6,534%. A correlação entre os resíduos de estimação da taxa de câmbio e do preço de energia foi estimada em -10,01%, que foi também considerada como uma premissa de simulação.

Seguindo a abordagem proposta por Brandão *et al* (2012), considerou-se que os fluxos de caixa são aleatórios somente no 1º ano do projeto ( $t = 1$ ), enquanto que nos anos restantes, os fluxos de caixa são calculados com base nos valores esperados condicionais (dados os valores simulados em  $t = 1$ ) das fontes de incerteza do projeto.

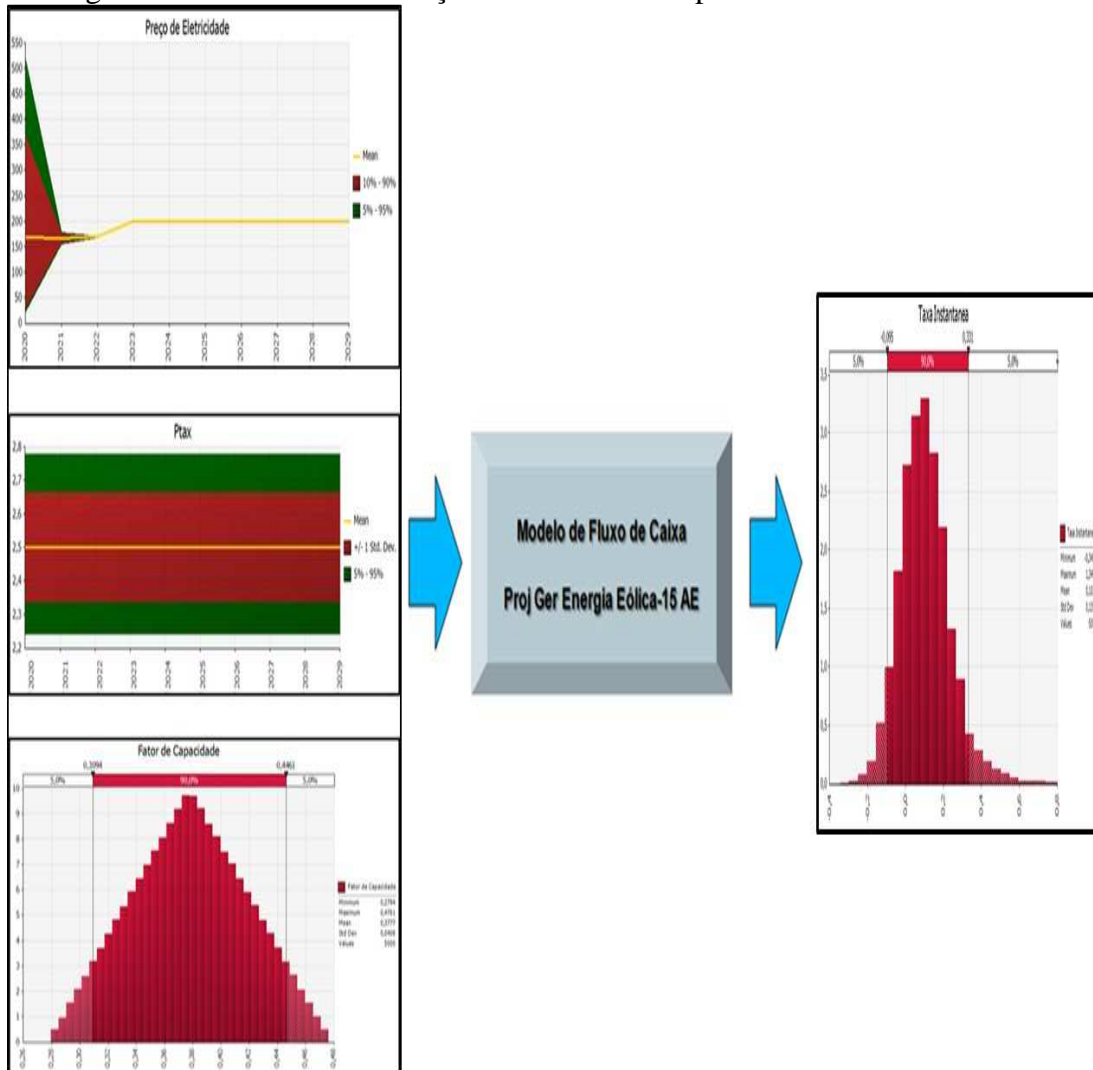
Assim, foi realizada Simulação de Monte Carlo para o projeto de 15 AG, utilizando o Fator de Capacidade, a Taxa de Câmbio e o Preço da Energia como variáveis de entrada estocásticas (*inputs*) e o Coeficiente de Correlação entre a Taxa de Câmbio e o Preço da Energia como constante interveniente. A Taxa Instantânea de Retorno (TI) foi utilizada como *output* (variável de saída) do procedimento:

$$TI = \ln \left( \frac{VP_1 + FC_1}{VP_0} \right) \quad (5)$$

A *proxy* da volatilidade utilizada na precificação das opções ( $\sigma$ ) foi obtida através do desvio-padrão da taxa instantânea. Após simulação de 10.000 séries, foi apurada volatilidade anualizada ( $\sigma$ ) de 14,11%. O processo de obtenção da volatilidade é ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Processo de Simulação de Monte Carlo para cálculo de volatilidade



Fonte: Elaborado pelos autores

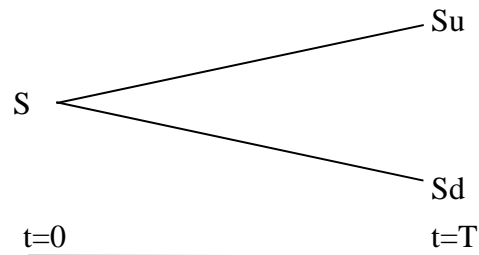
### 3. Modelagem das Opções Reais

A avaliação das flexibilidades descritas acima foi feita através de recursos da teoria das opções reais. O modelo binomial foi atribuído como mais adequado, em função da sua simplicidade e aderência às características das flexibilidades detectadas, que são claramente opções de adiamento e expansão americanas.

A premissa básica do modelo é que o preço do ativo-objeto pode, após um intervalo de tempo, se deslocar para um de dois preços possíveis, conforme o esquema apresentado na Figura 2.



Figura 2: Modelo binomial de passo único



Fonte: Adaptado de Hull (1998)

O valor de uma opção pode ser obtido através da construção de uma carteira capaz de replicar os mesmos retornos da opção. Esta carteira é composta por  $\Delta$  unidades do ativo-objeto e  $B$  unidades de dívida livre de risco. No caso de  $S$  se deslocar para cima com um fator multiplicativo  $u$ , o retorno da carteira é dado por:

$$f_u = \Delta S u + B e^{rT} \quad (6)$$

no caso de  $S$  se deslocar para baixo com um fator multiplicativo  $d$ , o retorno da carteira é dado por:

$$f_d = \Delta S d + B e^{rT} \quad (7)$$

onde  $r$  é a taxa de juros livre de risco.

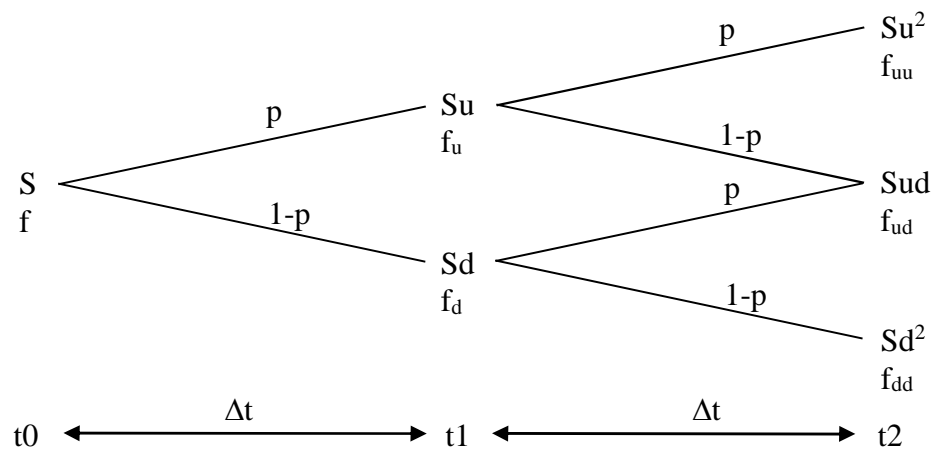
Os retornos da opção ( $f_u$  e  $f_d$ ) em sua data de vencimento são conhecidos –  $Max(S_T - X; 0)$  se opção de compra  $Max(X - S_T; 0)$  se opção de venda, onde  $X$  representa o preço de exercício da opção – e as duas equações podem ser resolvidas para as duas incógnitas, obtendo-se os valores de  $\Delta$  e  $B$ . O valor atual da carteira (ou da opção) é dado por:

$$f = \Delta S + B \quad (8)$$

O pressuposto de que o ativo-objeto só pode assumir dois possíveis valores na data de exercício é bastante restritiva e é contornada utilizando-se árvores binomiais de vários períodos, nas quais a vida da opção é dividida em intervalos menores, gerando várias possibilidades de trajetórias para o preço do ativo-objeto, conforme Figura 3.



Figura 3: Modelo Binomial de 2 passos



Fonte: Adaptado de Hull (1998, pg. 221)

O valor da opção pode ser determinado de forma recursiva, calculando-se inicialmente os retornos da opção nos nós finais da árvore ( $t = T$ ) e caminhando-se para trás no tempo até o primeiro nó ( $t = 0$ ). O modelo binomial é definido pelas equações 4 seguintes, obtidas através da generalização do modelo de passo único para vários passos:

$$f = e^{-r\Delta t} [pf_u + (1 - p)f_d] \quad (9)$$

$$p = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d} \quad (10)$$

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (11)$$

$$d = \frac{1}{u} \quad (12)$$

onde  $r$  é a taxa de juros livre de risco e  $\sigma$  é a volatilidade do ativo-objeto.

As variáveis  $p$  e  $(1-p)$  são chamadas de probabilidades neutras em relação ao risco e são interpretadas como a probabilidade de uma oscilação ascendente ( $p$ ) ou descendente ( $1-p$ ). No entanto, segundo Copeland e Antikarov (2001, pg. 99),

as probabilidades neutras em relação ao risco não são as probabilidades objetivas em que pensamos geralmente ao estimar a probabilidade de que um evento venha a acontecer. São simplesmente uma conveniência matemática destinada a ajustar os fluxos de caixa, de modo que possam ser descontados a uma taxa livre de risco.

Nos casos em que o ativo-objeto paga dividendos a uma taxa conhecida, (*dividend yield, div doravante*), é o modelo descrito acima deve ser modificado. Uma alternativa consiste em alterar a fórmula da probabilidade de subida do preço do ativo-objeto, levando-se em consideração o pagamento de dividendo no próximo período (Wilmott *et al*, 1994, pg. 397):



$$p = \frac{e^{(r-div)\Delta t} - d}{u - d} \quad (13)$$

O modelo binomial é adequado à precificação de opções americanas. Para isto, deve-se analisar a árvore recursivamente, andando-se para trás no tempo a partir da data de exercício, fazendo-se um teste de otimalidade em cada nó, para verificar se o exercício antecipado é ideal. O valor da opção americana nos nós finais é o mesmo da opção européia. Em cada um dos nós anteriores, o retorno do exercício imediato é comparado com o valor naquele nó de se manter a opção (obtido utilizando-se a equação (9)), e o maior deles é escolhido.

As flexibilidades gerenciais e operacionais presentes em projetos de investimentos podem ser precificadas de maneira análoga às opções financeiras. A Figura 4 apresenta uma analogia entre as variáveis que determinam o valor de uma opção financeira com as determinantes de uma opção real.

Figura 4 - Analogia entre a opção financeira e a real

<b>Opção Financeira</b>	<b>Opção Real</b>
Preço da ação	Valor presente (sem flexibilidades) do projeto
Preço de exercício	Valor presente dos custos de investimento
Volatilidade dos retornos da ação	Volatilidade dos retornos do VP
Taxa de juros livre de risco	Taxa de juros livre de risco
Tempo até o vencimento	Tempo até o vencimento
Dividendos	Fluxos de caixa distribuídos

Fonte: Adaptado de Damodaran (1997, pg. 478)

A implementação de um modelo de opções reais começa na determinação do ativo-objeto da opção. Ao contrário das opções financeiras, o ativo-objeto de opções reais muitas vezes não é negociado em mercados, podendo gerar problemas para determinação de seu preço atual. Além disso, a inexistência de séries históricas dos preços do ativo-objeto impossibilita o cálculo de sua volatilidade histórica.

Para se contornar estes problemas, é prática comum utilizar o Valor Presente (VP) do projeto como ativo-objeto, uma vez que este é considerado a melhor estimativa não tendenciosa do preço de mercado do projeto em análise.

A utilização do VP do projeto como ativo-objeto se apoia na prova de Samuelson, de que preços adequadamente antecipados flutuam aleatoriamente, implicando que o valor do projeto seguirá um caminho aleatório normal ao longo do tempo, com volatilidade constante. (Copeland e Antikarov 2001, pg. 240).

A utilização do VP como ativo-objeto das opções reais implica que os fluxos de caixa operacionais distribuídos anualmente sejam tratados como dividendos. Na data de distribuição de dividendo, o valor do dividendo é deduzido do preço da ação, já que a quantia paga passa a ser propriedade do acionista, não mais compondo o valor da empresa. Assim, a distribuição de fluxo de caixa operacional resulta em queda equivalente no VP do projeto.

O valor da flexibilidade gerencial somado ao valor presente líquido do projeto é chamado de valor presente líquido expandido. Matematicamente:

$$VPLE = VPL + VOR \quad (14)$$

onde:

VPLE = Valor Presente Líquido Expandido

VPL = Valor Presente Líquido tradicional

VOR = Valor das Opções Reais



Desta forma, permite-se que a adaptabilidade e as oportunidades de crescimento possam ser refletidos nos preços das ações das empresas. Ações de crescimento, como as empresas de biotecnologia, de tecnologia de informação e farmacêuticas, tipicamente apresentam altos índices preço/lucro e preço/valor contábil. Da et al (2012) fornecem evidências de que as oportunidades (opções) de crescimento determinam grande parte do valor de mercado das ações.

#### 4. Opção de Adiamento

Neste item são apresentados em maiores detalhes os passos do processo de avaliação das opções reais embutidas no projeto de geração em análise. As opções reais inicialmente identificadas e avaliadas são:

- a) Opção Americana de Adiamento da Construção da Planta de 15 AG.
- b) Opção Americana de Expansão da Planta de 15 AG para 43 AG.

Identificadas as flexibilidades gerenciais que apresentam potencial de serem valiosas, inicia-se seu processo de avaliação, seguindo-se os passos abaixo. Todos os parâmetros necessários à construção do modelo binomial já foram estimados ou calculados, à exceção do *dividend yield*. Aqui, adotou-se a premissa de que os fluxos de caixa gerados para cada alternativa coincidem com o valor dos dividendos. Ou seja, o *dividend yield* em um instante  $t$  é calculado dividindo-se o Fluxo de Caixa Operacional (apurado em  $t$ ) pelo VPL do projeto (calculado em  $t$ ):

$$div_t = \frac{FCO_t}{VP_t + FCO_t} \quad (15)$$

A árvore binomial de preços possíveis do ativo-objeto foi construída levando em consideração a queda de valor do projeto (gerada pela distribuição de fluxos de caixa) no VP obtido em cada nó da árvore. Em função dessa queda do valor do projeto no tempo, as probabilidades neutras em relação ao risco –  $p$  e  $(1-p)$  – podem mudar a cada ano, afetando os valores da opção calculados em cada período de tempo da árvore binomial.

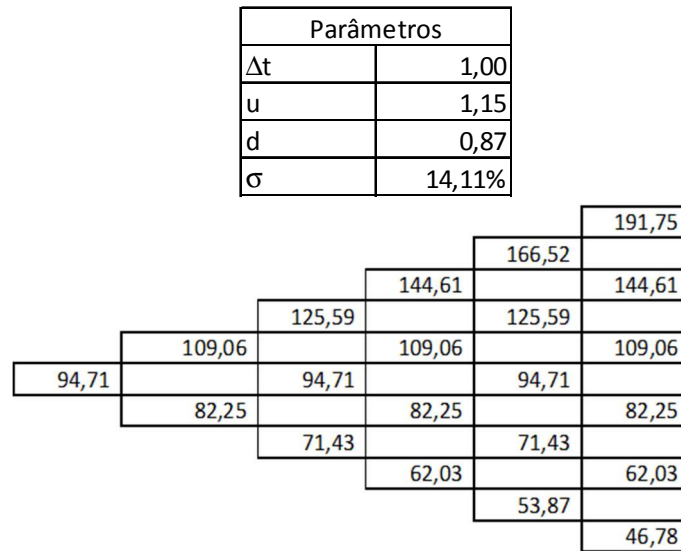
A árvore binomial do valor presente dos fluxos de caixa operacionais foi construída com base nos seguintes parâmetros:

- Valor Presente: \$ 94,71 milhões (Valor do Ativo-Objeto na Data Atual)
- Investimento (Capex): \$70,69 milhões (Valor de Exercício na Data Atual)  
Obs.: A cada período o valor do investimento é ajustado pela taxa livre de risco:  
( $I_t = I_{t-1} e^{r\Delta t}$ )
- Volatilidade Anual: 14,11%
- Taxa Livre de Risco Real: 6,75% ao ano
- Fluxos de caixa distribuídos são tratados como dividendos

A Árvore Binomial do ativo-objeto é mostrada na Figura 5:



Figura 5 – Árvore Binomial do Valor Presente (VP) do projeto

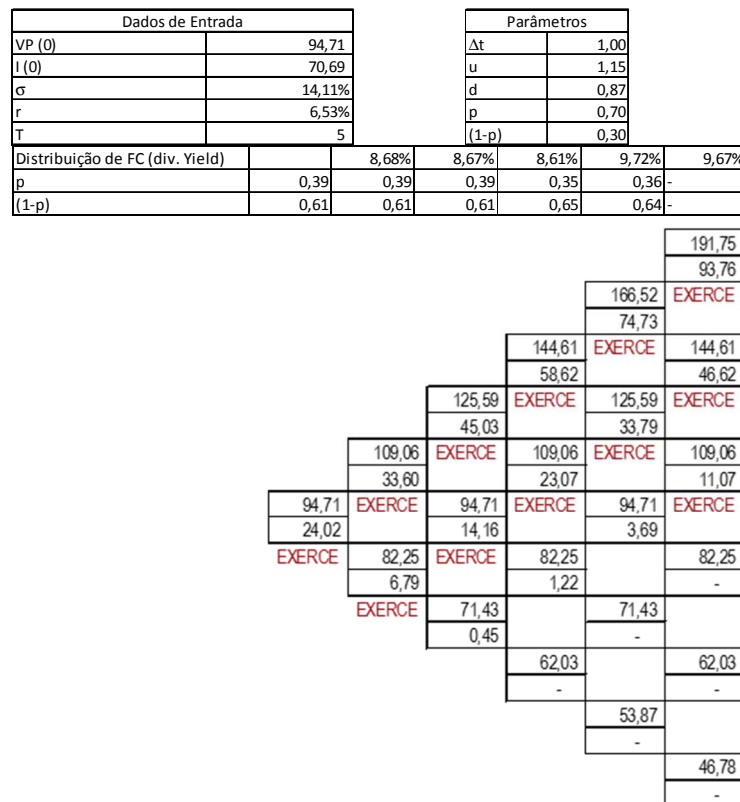


Fonte: Elaborado pelos autores

A opção de adiamento foi modelada com possibilidade de exercício antecipado (opção americana). O *payoff* da opção na data de vencimento ( $T$ ) é dado por:  $Max(VP_T - I_T; 0)$ . A regra de exercício a cada momento  $t < T$  é dada por  $Max(VP_t - I_t; \text{valor da opção viva})$ .

A Árvore Binomial da opção de adiamento e suas condições de exercício são mostradas na Figura 6:

Figura 6 – Árvore Binomial da Opção de Adiamento

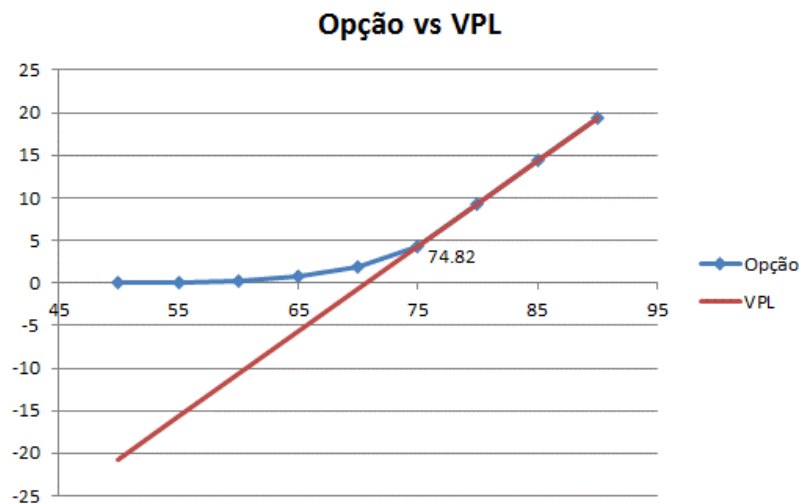


Fonte: Elaborado pelos autores



Observa-se que a opção de adiar virtualmente não possui valor, uma vez que se encontra “profundamente dentro do dinheiro (*deep in the money*)”, condição esta que faz com que a convergência do valor da opção ao VPL ocorra imediatamente, conforme apresentado na Figura 7. Nesta condição, a indicação - por enquanto provisória, até que se apresente a opção de expansão - é a de se exercer a opção imediatamente, investindo na planta eólica de 15 AG.

Figura 7 – Valor da Opção de Adiamento e VPL do projeto

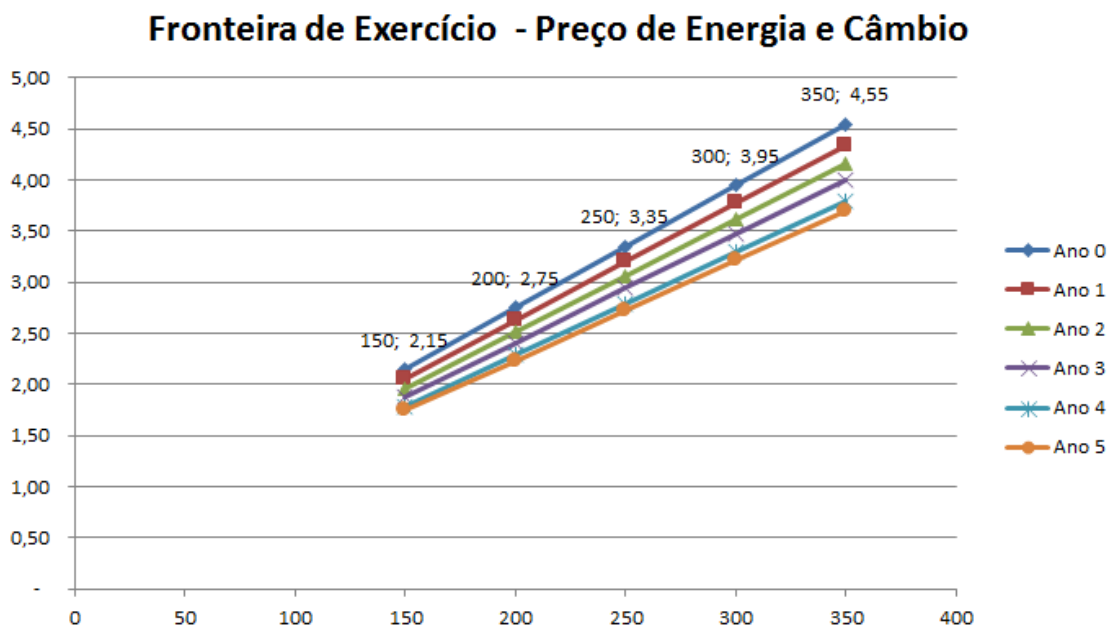


Fonte: Elaborado pelos autores

Mais importante do que a determinação do valor da opção, seria a visualização da fronteira de exercício – em relação ao preço de energia e a taxa de câmbio – da opção em cada momento discreto no horizonte de 5 anos. Estes preços de exercício atuam como referência de decisão, caso a empresa não exerça, por algum motivo, a opção de investir imediatamente. A Figura 8 apresenta a fronteira de preços e câmbio e os pares (preço de energia; câmbio) relevantes para exercício no ano zero.



Figura 8 – Curva de gatilho: preços de energia elétrica e câmbio para exercício da opção de adiamento



Fonte: Elaborado pelos autores

A região de exercício é dada pela área à direita e abaixo das curvas apresentadas. Por exemplo, caso a taxa de câmbio no ano zero seja de 2,15, é ótimo exercer a opção caso os preços de energia sejam superiores a 150, i.e., esteja à direita do ponto (150; 2.15) no gráfico. Analogamente, caso o preço de energia seja 150, é ótimo exercer a opção caso a taxa de câmbio seja inferior a 2,15, i.e., esteja abaixo do ponto (150; 2.15) no gráfico. De forma geral, quanto mais alta a taxa de câmbio, maior é o preço de energia que justifica o investimento.

## 5. Opção de Expansão

A opção de expansão foi modelada com possibilidade de exercício antecipado (opção americana). O *payoff* da opção na data de vencimento é dado por:

$$\text{Max}(\Delta VP_{(15 \rightarrow 43);T} - \Delta \text{Capex}_{(15 \rightarrow 43);T}; 0)$$

Onde

$\Delta VP_{(15 \rightarrow 43)}$  representa a diferença entre VP do parque com 43 ag e VP do parque com 15 ag e  $\Delta \text{Capex}_{(15 \rightarrow 43)}$  representa o investimento incremental necessário para ampliar a capacidade do parque de 15 para 43 ag.

A regra de exercício a cada momento é dada por:

$$\text{Max}(\Delta VP_{(15 \rightarrow 43);t} - \Delta \text{Capex}_{(15 \rightarrow 43);t}; \text{valor da opção viva}_t)$$

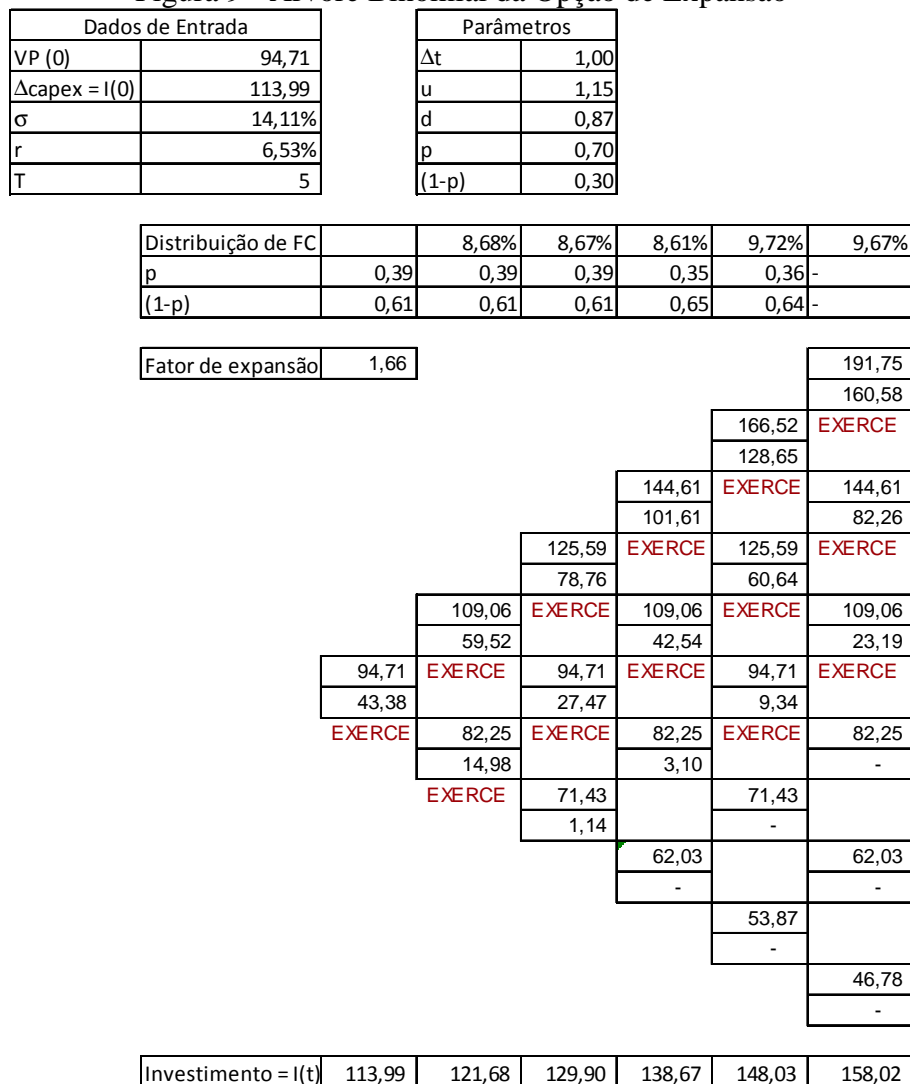
A Árvore Binomial do Valor Presente dos Fluxos de Caixa Operacionais foi construída com base nos seguintes parâmetros:



- Valor Presente: \$ 94,71 milhões (Valor do Ativo-Objeto na Data Atual)
  - Fator de Expansão do VP: 1,66 (Calculado pela relação: VP (43 AG) / VP (15 AG))
  - Investimento Incremental ( $\Delta Capex$  15 AG para 43 AG): \$113,99 milhões (Valor de Exercício na Data Atual)
- Obs.: A cada período o valor do investimento incremental é ajustado pela taxa livre de risco ( $I_t = I_{t-1} e^{r\Delta t}$ )
- Volatilidade Anual: 14,11%
  - Taxa Livre de Risco Real: 6,75% ao ano
  - Fluxos de caixa distribuídos são tratados como dividendos

A Árvore Binomial da opção de expansão e suas condições de exercício são mostradas na Figura 9:

Figura 9 - Árvore Binomial da Opção de Expansão



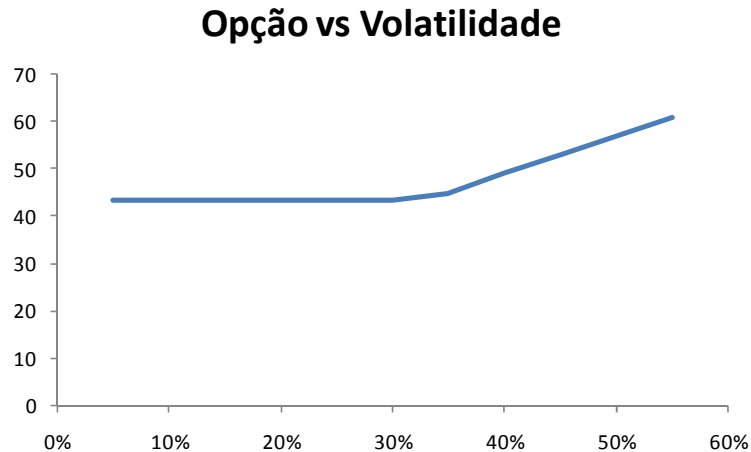
Fonte: Elaborado pelos autores

Observa-se que a opção de expansão tem valor e as condições de exercício sugerem ação imediata, no sentido do investimento em 43 AG. Essa conclusão parece ser bastante



plausível, uma vez o valor da opção é pouco sensível em relação à volatilidade do VP (letra grega Vega), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Sensibilidade do valor da opção em relação a mudanças na volatilidade



Fonte: Elaborado pelos autores

## 6. Conclusões e Recomendações

Neste estudo foram avaliadas a opção de se adiar o investimento em projeto de energia eólica e a opção de expansão do parque mediante investimento adicional. Através da simulação das fontes de incerteza do projeto – preços de energia elétrica, fator de capacidade e taxa de câmbio – determinou-se a volatilidade do valor presente do projeto sem flexibilidades, permitindo-se a precificação das opções utilizando-se o modelo binomial.

Os resultados sugerem a decisão de investir imediatamente na planta de geração de energia eólica já na versão expandida (43 AG), uma vez que as condições de exercício tanto da opção de adiamento quanto da opção de expansão já estão presentes.

Além da determinação do valor das opções de adiamento e de expansão, foi determinada a fronteira ótima de preços de energia de exercício em cada momento discreto no horizonte de 5 anos. Estes preços de exercício atuam como referência de decisão, caso a empresa não exerça a opção de investir imediatamente, por algum motivo. Uma razão típica para a empresa não investir imediatamente seria oriunda do racionamento de capital. É possível que o projeto avaliado esteja competindo com outros, numa carteira de projetos viáveis, mas sob a condição de racionamento orçamentário, e a empresa opte por algum arranjo de projetos que exclua este em questão.

**Referências Bibliográficas**

- AGGARWAL, R. Capital budgeting under uncertainty. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- AMRAM, M. & KULATILAKA, N. Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World. Boston: Harvard Business School Press, 1999.
- BASTIAN-PINTO, CARLOS; BRANDÃO, LUIZ; HAHN, WARREN J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. *Energy Economics*, 31, pg. 411-422, 2009
- BERRARA, T. Valuing Real Options when Time to Maturity Is Uncertain - Paper presented at the 3rd Annual International Conference on Real Options, June 1999, Netherlands
- BRANDÃO, LUIZ; DYER, JAMES; HAHN, WARREN. Volatility Estimation For Stochastic Project Value Models. *European Journal of Operational Research*, Vol. 220-3, 2012
- COPELAND, T.; ANTIKAROV, A. Opções Reais: Um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos. Rio de Janeiro: Campus, 2001.
- DA, ZHI; GUO, RE-JIN, JAGANNATHAN, RAVI. CAPM for estimating the cost of equity capital: Interpreting the empirical evidence. *Journal of Financial Economics* 103, 204-220, 2012
- DALBEM, MARTA; BASTIAN-PINTO, CARLOS. Leilão de Energia Eólica no Brasil: Análise dos Resultados com Base na Teoria de Jogos de Opções Reais. XXIV Encontro da ANPAD. Rio de Janeiro, 2010.
- DAMODARAN, ASWATH. Avaliação de Investimentos: Ferramentas e Técnicas para a Avaliação de Qualquer Ativo. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.
- DIXIT, A. K., PINDICK, R. S. *Investment under Uncertainty*. Princeton: Princeton
- FENÓLIO, Lara M. S., MINARDI, A. M. A. F. Applying the Real Options Theory to the Valuation of Small Hydropower Plants. *Revista de Economia e Administração*, 8: 346-369.
- HULL, J. *Options, Futures and Other Derivatives*. N.Y.: Prentice Hall, 2003.
- LAMBRECHT, B. & W. PERRAUDIN: Option Games - Working Paper, Cambridge University and CEPR (UK), August 1994.
- SCHWARTZ, E. The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging. *Journal of Finance*, 52-3, 1997
- SMIT, H. J. & TRIGEORGIS, L. *Strategic Investment: Real option and Games*. UK: Princeton Press, 2004.
- TRIGEORGIS, Lenos. *Real Options*. N.Y.: MIT Press, 1999

---

i Ver Lambrecht e Perraudin (1998), Smit e Trigeorgis (2004), Berrada, T. (1999).

ii O fator de capacidade é determinado pela razão entre a geração esperada durante a vida do empreendimento e a energia que poderia ser gerada com a planta rodando em potência máxima durante o mesmo período.

iii Considera-se ao longo do trabalho que os desembolsos de capital são realizados na data  $t=0$ . Assim, o valor presente líquido é dado por:  $VPL = VP - I$ , onde  $I$  representa o investimento realizado em  $t=0$ .

iv Uma característica pouco intuitiva do modelo descrito pela equação (2) é que o valor esperado da variável  $S$  no longo prazo é função da taxa de reversão à média e da volatilidade, sendo dado por  $\bar{S}e^{\frac{\sigma^2}{4\eta}}$ .

v Conforme nota anterior, obtém-se que o preço de eletricidade converge, no longo prazo, para R\$143,41 e não para o valor de 227,47, estimativa obtida para  $\bar{S}$ .