

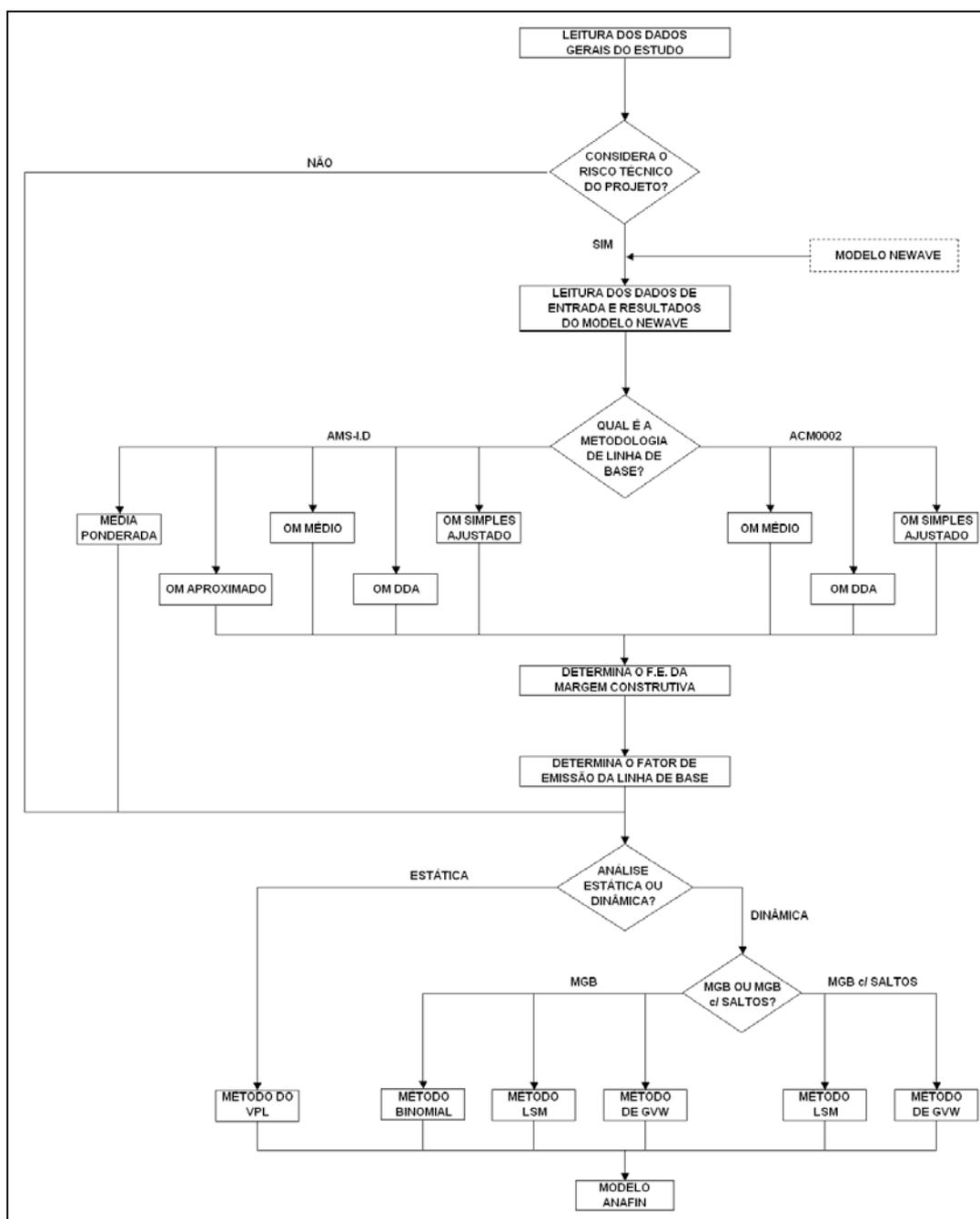
## **7 Resultados**

Este capítulo está dividido em três partes complementares. Na primeira parte descreve-se a metodologia desenvolvida para estimar o valor incremental do mercado de carbono nos projetos descritos no Capítulo 6. Na segunda parte, a convergência dos métodos numéricos utilizados para avaliar a flexibilidade gerencial embutida naqueles projetos é testada. Finalmente, a terceira parte deste capítulo apresenta os resultados numéricos finais deste trabalho.

### **7.1 Abordagem Metodológica Proposta**

A metodologia desenvolvida nesta tese tem como principal característica a união dos métodos e técnicas apresentados anteriormente nos Capítulos 3, 4 e 5. Sendo assim, os resultados do modelo NEWAVE, as metodologias ACM0002 e AMS-I.D, além da Teoria das Opções Reais servem de base para o desenvolvimento de um arcabouço metodológico capaz de estimar o valor incremental do mercado de carbono para determinados projetos de geração de energia elétrica. Cabe ressaltar que este sistema é integrado ao modelo computacional ANAFIN, cuja responsabilidade é determinar o impacto do mercado de carbono na rentabilidade dos projetos analisados. De maneira simplificada, o algoritmo do sistema computacional desenvolvido neste trabalho se encontra ilustrado na Figura 7.1.

O primeiro passo deste algoritmo consiste na leitura dos parâmetros gerais do estudo de caso, tais como o subsistema elétrico do projeto, a metodologia de cálculo do fator de emissão, o valor dos custos de transação, a capacidade instalada do empreendimento, as alíquotas de impostos, entre outros parâmetros. Segundo o fluxograma da Figura 7.1, nesta etapa, também deverá ser informado se o risco técnico do projeto MDL será considerado.



**Figura 7.1 - Fluxograma Simplificado do Algoritmo de Solução do Problema Proposto**

Uma vez que se opte por não considerar o risco técnico do projeto, é importante observar que o Fator de Emissão da Linha de Base será considerado constante ao longo de todo o período de obtenção das RCEs, caso contrário, a evolução temporal deste parâmetro será considerada. Neste caso, conforme indicado na Figura 7.1, a análise será baseada nos dados e resultados fornecidos pelo modelo NEWAVE, cuja execução é caracterizada como uma operação

exógena ao algoritmo proposto. Para cada subsistema elétrico considerado, os dados e resultados necessários para a análise são os seguintes:

- as metas de geração térmica e hidráulica;
- os intercâmbios de energia;
- o custo operativo, o nível de inflexibilidade e a fonte primária de energia utilizada por cada empreendimento termelétrico;
- o mercado de energia;
- os custos marginais de operação;
- os valores d'água;
- e, finalmente, a configuração da expansão térmica e hidráulica do sistema;

Uma vez reconhecidos os parâmetros descritos anteriormente, a próxima etapa consiste em determinar o Fator de Emissão da Linha de Base do projeto MDL. Conforme descrito no Capítulo 4, neste trabalho duas metodologias poderão ser empregadas com este objetivo: as metodologias ACM0002 e AMS-I.D. É importante observar que a escolha entre estas metodologias será determinada pela escala do projeto, sendo que a metodologia ACM0002 deverá ser empregada somente aos projetos de grande escala, enquanto que a metodologia AMS-I.D. deverá ser empregada somente aos projetos de pequena escala.

Ao se optar pela metodologia ACM0002, o próximo passo deverá ser o cálculo do Fator de Emissão da Margem Operacional do projeto. Apesar da metodologia ACM0002 descrever quatro alternativas com esta finalidade, apenas três podem ser empregadas nos projetos brasileiros conectados ao SIN: o método **OM Médio**, a **Análise dos Dados de Despacho** (OM DDA) e o método **OM Simples Ajustado**. Caso o projeto MDL seja de pequena escala, além dos métodos citados anteriormente, outras duas alternativas também podem ser empregadas: os métodos **Média Ponderada** e **OM Aproximado**<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> Apesar do método **OM Aproximado** não ser considerado pela versão mais recente (versão 9) da metodologia AMS-I.D., o mesmo foi contemplado em todas as suas versões

Note que, exceto quando o método da **Média Ponderada** é utilizado, o passo seguinte do algoritmo deve ser o cálculo do Fator de Emissão da Margem Construtiva do projeto, que por sua vez precede o cálculo do seu Fator de Emissão da Linha de Base. Cabe ressaltar que, ao final desta etapa, considera-se que o risco técnico do projeto MDL se encontra devidamente representado por meio de 2000 possíveis cenários que modelam a evolução da sua linha de base ao longo do período de obtenção das RCEs.

Uma vez avaliado o risco técnico do projeto MDL, as próximas etapas do algoritmo consistem em determinar o valor incremental do mercado de carbono no projeto considerado. Esta análise pode ser realizada sob o ponto de vista estático, calculando-se o Valor Presente Líquido do investimento, ou sob o ponto de vista dinâmico, quando a Teoria das Opções Reais é utilizada para avaliar os benefícios da ação gerencial na tomada de decisão.

Conforme descrita no Capítulo 5, a relevância de uma análise de viabilidade dinâmica está em reconhecer três importantes características das decisões de investimento: a irreversibilidade, a liberdade de ação no tempo e a incerteza sobre os fluxos de caixa futuros. Desta forma, ao se realizar uma análise deste tipo, surge a necessidade de se modelar o comportamento do preço do ativo objeto do investimento ao longo do tempo. Neste trabalho dois processos estocásticos foram utilizados com este objetivo: o Movimento Geométrico Browniano e o Processo de Difusão com Saltos.

Sempre que o Movimento Geométrico Browniano for utilizado para modelar o preço das RCEs, a opção de investimento considerada poderá ser avaliada de três formas distintas: utilizando-se o método Binomial, o método de Grant, Vora & Weeks ou o método dos Mínimos Quadrados. Caso o processo estocástico empregado contemple a possibilidade de saltos na trajetória do preço, apenas os dois últimos métodos poderão ser utilizados.

Finalmente, uma vez que o investimento no ciclo do projeto MDL foi devidamente avaliado, o resultado desta análise é contabilizado pelo modelo ANAFIN no fluxo de caixa do projeto, sendo determinado o acréscimo de

---

anteriores. Por este motivo, este método foi empregado no cálculo do Fator de Emissão da Margem Operacional de grande parte dos projetos brasileiros.

rentabilidade oriundo do investimento adicional realizado. Cabe ressaltar que a opção considerada é avaliada para cada cenário de incerteza técnica do projeto, sendo que a média desses valores é utilizada como dado de entrada no modelo ANAFIN.

Além do algoritmo descrito anteriormente, os seguintes resultados merecem lugar de destaque nesta análise:

- o valor incremental do mercado de carbono para o projeto MDL;
- o impacto do valor incremental do mercado de carbono na Taxa Interna de Retorno do empreendimento avaliado;
- a possibilidade de se mensurar o risco técnico do projeto MDL, ou seja, aquele relacionado ao nível de produção das RCEs ao longo de sua vida útil;
- as curvas de gatilho para o ativo objeto da opção de investimento considerada;
- a verificação da convergência dos métodos Binomial, GVW e LSM, quando utilizados sob as condições particulares deste trabalho;
- e, finalmente, a verificação da convergência dos métodos GVW e LSM quando considerado que o preço da RCE está sujeito a saltos aleatórios ao longo do tempo;

As análises a que se referem os dois últimos itens descritos anteriormente serão o objeto de discussão da próxima seção.

## **7.2**

### **Análises de Convergência**

Nesta seção serão apresentados os resultados de uma investigação sistemática sobre a robustez dos métodos LSM e de GVW quando aplicados na análise de investimentos com as características descritas no Capítulo 6. Utilizar-se-á o método binomial como referência para verificar a convergência dos resultados encontrados. Esta comparação será válida sempre que o MGB for o processo estocástico empregado, caso contrário, os resultados do método LSM serão diretamente comparados aos resultados obtidos pelo método de GVW.

No que tange ao método LSM, além de verificar a convergência dos seus resultados, a análise proposta também tem por objetivo determinar alguns

parâmetros necessários para a sua utilização, por exemplo, o número de instantes onde é possível o exercício antecipado da opção e o número de trajetórias simuladas para o preço da RCE. Cabe ressaltar que a determinação destes parâmetros será baseada nos critérios de tempo computacional e precisão dos resultados<sup>37</sup>.

Adicionalmente, no que tange ao método de GVW, o objetivo inicial desta análise é verificar a convergência dos seus resultados quando o MGB for o processo estocástico utilizado. Tendo em vista que a avaliação de opções pelo método binomial se torna bastante complexa quando saltos aleatórios são considerados na dinâmica do preço do ativo objeto, também é objetivo desta análise demonstrar empiricamente que, na presença dos saltos, os resultados do método de GVW se aproximam dos resultados obtidos pelo método LSM, demonstrando assim a sua adequabilidade sob as condições especificadas.

A medida de precisão utilizada nestas análises será a raiz do erro quadrático médio (RMSE) percentual do estimador, cuja fórmula de cálculo é descrito pela equação 7.1 a seguir:

$$CV(\bar{C}) = \frac{RMSE(\bar{C})}{C_{REF}} \times 100 = \frac{\sqrt{V(\bar{C}) + [\bar{C} - C_{REF}]^2}}{C_{REF}} \times 100 \quad (7.1)$$

Nesta equação, note que **CV** representa o coeficiente de variação ou o RMSE percentual do estimador  $\bar{C}$ ,  $C_{REF}$  representa o seu valor verdadeiro ou de referência, e  $V(\bar{C})$  representa a variância do estimador  $\bar{C}$ .

Cabe ressaltar que a robustez do método LSM e de GVW será testada utilizando-se o empreendimento **EÓLICA A**. Considerar-se-á que este empreendimento será implantado no subsistema Sudeste, em conformidade com a **Alternativa 2** de configuração do SIN (vide seção 3.3). Além disso, o método **OM Médio** será utilizado no cálculo do Fator de Emissão da Margem Operacional do projeto, sendo que o peso deste fator no cálculo do Fator de Emissão da Linha de Base será igual a 50%. Considerar-se-á que em Janeiro de

---

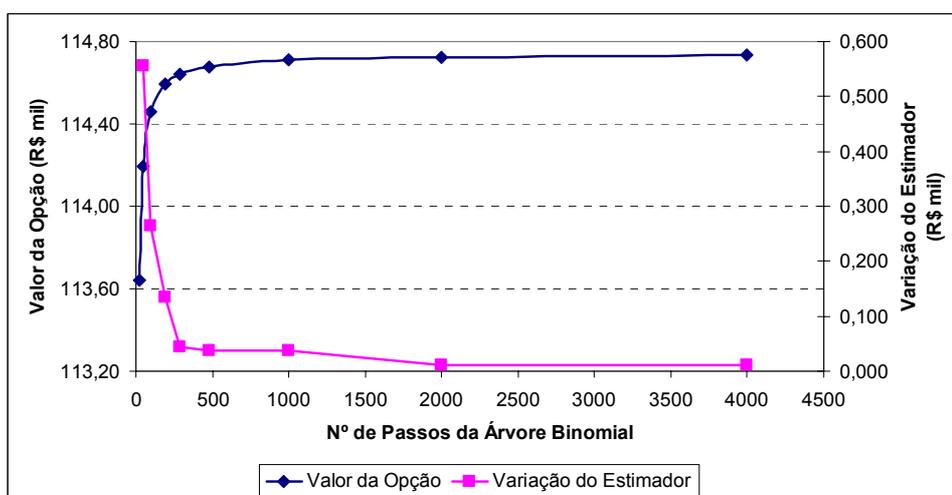
<sup>37</sup> Os resultados desta tese foram gerados em um processador Pentium 4 de 3GHz e 512 MBytes de memória RAM.

2006, data em que o projeto MDL começa a ser implantado, uma RCE esteja avaliada em US\$ 5,00 / tCO<sub>2</sub>e no mercado internacional de carbono. Os demais parâmetros desta análise estarão de acordo com os valores descritos na Tabela 6.2.

Uma vez que os resultados do método binomial serão utilizados como referência sempre que o MGB for o processo estocástico empregado, na próxima seção verificar-se-á a convergência deste método no sentido de se determinar empiricamente um valor adequado para  $C_{REF}$ . Conforme descrito na seção 7.1, diversos cenários hidrológicos serão considerados para modelar a incerteza técnica do projeto MDL, sendo que o valor da opção será calculado individualmente para cada um destes cenários.

### 7.2.1 Análise de Convergência do Método Binomial

Os resultados desta seção consideram que a dinâmica do preço da RCE segue o Movimento Geométrico Browniano descrito pela equação 5.43. Sendo assim, nesta análise considerou-se a taxa de juros livre de risco igual a 8% a.a., a volatilidade anual dos preços da RCE igual a 40%, o *dividend yield* do ativo objeto igual a 5% a.a., e o tempo de vida da opção igual a 2 anos, ou seja, o seu vencimento ocorre em 31 de Dezembro de 2007. O comportamento do valor da opção para o cenário médio, ou seja, quando a média dos valores da opção referentes a cada cenário de incerteza técnica é calculada, se encontra representado na Figura 7.1 a seguir.



**Figura 7.1 – Convergência do Valor da Opção de Investimento pelo Método Binomial (Cenário Médio)**

A partir do gráfico ilustrado nesta figura conclui-se que o valor da opção se aproxima de R\$ 114,80 mil à medida que se aumenta o número de passos da árvore binomial. Além disso, aumentando-se o número de passos, também se observa que a variação do valor estimado tende a zero<sup>38</sup>, assumindo valores muito pequenos quando o método binomial é utilizado com mais de 1000 iterações (passos).

Sendo assim, considerando que para cada cenário de incerteza técnica os valores de referência da opção são especificados pela utilização do método binomial com 4000 passos, é possível avaliar a convergência individual do valor da opção nestes cenários. A medida de precisão utilizada nesta análise será o viés percentual do estimador, ou seja, uma simplificação do cálculo descrito pela equação 7.1:

$$\text{Viés}(\bar{C}) = \frac{\bar{C} - C_{\text{REF}}}{C_{\text{REF}}} \times 100 \quad (7.2)$$

Nesta equação, note que  $\bar{C}$  e  $C_{\text{REF}}$  possuem o mesmo significado definido na equação 7.1. Os resultados desta análise se encontram apresentados na Tabela 7.1.

**Tabela 7.1 – Viés das Estimativas Realizadas pelo Método Binomial**

<b>Nº de Passos</b>	<b>Viés Máximo</b>
12	26,83%
24	16,20%
48	8,56%
96	3,94%
192	1,97%
288	1,41%
480	0,75%
1000	0,30%
2000	0,12%
4000	0,00%

---

<sup>38</sup> Por exemplo, considerando a utilização do método binomial com 500 e com 1000 passos respectivamente, define-se a variação do valor estimado com 1000 passos pela diferença entre este valor e o valor estimado com a utilização de 500 passos.

Os resultados da Tabela 7.1 indicam o viés da estimativa de menor precisão dentre todos os cenários de incerteza técnica considerados. Por exemplo, utilizando o método binomial com 24 passos, a estimativa de menor precisão apresenta um viés de 16,20% em relação ao seu respectivo valor de referência.

Utilizando-se o método binomial a partir de 96 passos, nota-se que todas as estimativas apresentam viés inferior a 5%, nível de precisão considerado satisfatório neste trabalho. Além disso, considerando a utilização do método binomial com 2000 passos, o maior viés encontrado foi igual a 0,12%, o que demonstra a convergência dos resultados e corrobora com a utilização dos valores de referência previamente adotados. Cabe ressaltar que estes valores serão novamente utilizados como referência para se analisar a convergência dos métodos LSM e de GVW.

Na próxima seção a precisão do método de GVW será analisada. O objetivo desta análise é determinar uma base de comparação para os resultados do método LSM quando a dinâmica do preço da RCE considerar a possibilidade de saltos aleatórios em seu valor. Uma vez que o método binomial não pode ser utilizado nestas condições, esta análise se faz necessária para que se possa determinar a convergência do método LSM nesta situação.

## **7.2.2 Análise de Convergência do Método de GVW**

Esta seção está dividida em duas partes. Na primeira parte verifica-se o comportamento das curvas de gatilho sob as condições específicas deste trabalho. Na segunda parte a convergência do método de GVW é testada frente os resultados obtidos pelo método binomial com 4000 passos.

### **7.2.2.1 Análise da Curva de Gatilho**

Conforme visto anteriormente na seção 5.3.2, o princípio básico do método de GVW consiste em utilizar a Simulação de Monte Carlo no sentido de se identificar a curva de gatilho de um derivativo americano. Apesar deste método ter sido publicado apenas em 1996, é importante observar que o conceito da curva de gatilho já havia sido empregado em outros trabalhos envolvendo a avaliação de

opções. Por exemplo, em 1987, Siegel, Smith & Paddock [40] utilizaram o método de Diferenças Finitas para determinar a curva de gatilho de uma oportunidade de investimento em uma reserva de Petróleo ainda não desenvolvida.

Dentre as principais características das curvas de gatilho, cabe ressaltar que as mesmas são caracterizadas como funções monotônicas<sup>39</sup>. Por exemplo, para opções americanas de compra, espera-se que suas respectivas curvas de gatilho sejam funções estritamente decrescentes com o tempo (vide Figura 5.2). Segundo Hull [47], isto ocorre porque quanto mais próxima a data de vencimento deste tipo de derivativo menor é o custo de oportunidade pelo seu exercício antecipado, o que, conseqüentemente, reduz o seu valor.

Conforme mencionado na seção anterior, a opção de investimento considerada neste trabalho será avaliada individualmente para cada cenário de incerteza técnica, ou seja, supondo 2000 cenários deste tipo de incerteza, entende-se que o algoritmo descrito na seção 5.3.2 deverá ser repetido 2000 vezes.

Neste contexto, considerando uma opção de investimento (C) sobre um determinado projeto (V), o qual produz um determinado *output* (S), é importante observar que existe linearidade entre os valores de V e S quando S é modelado por determinados processos estocásticos. Por exemplo, supondo que:

$$V = q.S \quad (7.3)$$

onde  $q$  representa o número de RCEs produzidas ao longo de um determinado período e  $S$  representa o preço da RCE modelado por um MGB, pode-se deduzir que:

$$dS = \alpha.S.dt + \sigma.S.dz$$

$$d(q.S) = \alpha.q.S.dt + \sigma.q.S.dz$$

$$dV = \alpha.V.dt + \sigma.V.dz \quad (7.4)$$

ou seja, o valor do projeto segue um MGB com os mesmos parâmetros do processo estocástico seguido pelo preço da RCE. Uma vez que a curva de gatilho

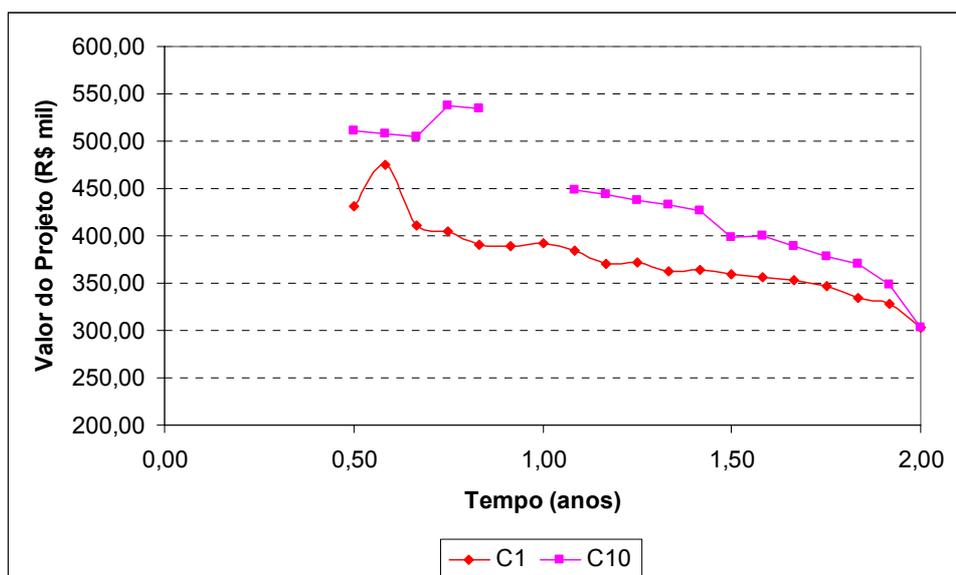
---

<sup>39</sup> Uma função é dita monotônica, ou monótona, se puder ser classificada como crescente, estritamente crescente, decrescente ou estritamente decrescente.

de uma opção americana depende unicamente da dinâmica do preço do seu ativo objeto, não tendo qualquer relação com a composição do seu valor propriamente dita (vide o algoritmo descrito na seção 5.3.2), a lógica descrita anteriormente leva a conclusão de que uma única curva de gatilho pode ser obtida para todos os cenários de incerteza técnica considerados.

Considerando a mesma oportunidade de investimento avaliada na seção anterior, utilizou-se o método de GVW para se determinar as curvas de gatilho de dois diferentes cenários de incerteza técnica. Para tanto, foram consideradas 24 datas de exercício antecipado (base mensal) e a simulação de 40000 trajetórias de preço em cada iteração do método anteriormente citado. Os resultados encontrados se encontram ilustrados na Figura 7.2.

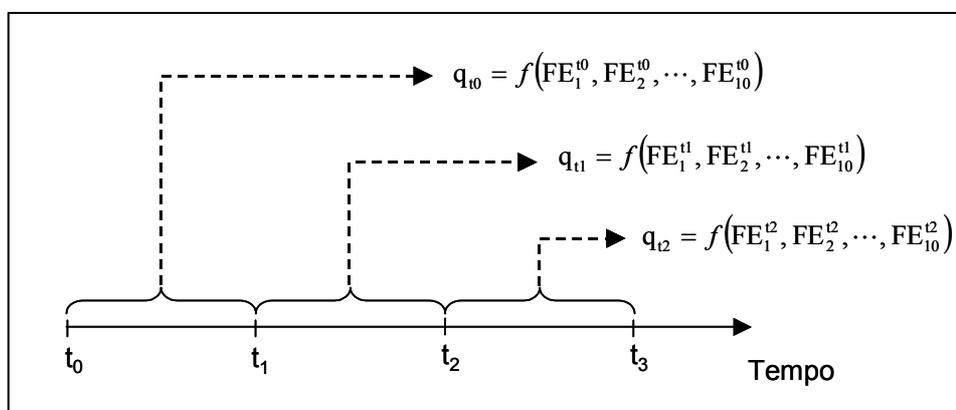
Os resultados da Figura 7.2 indicam que as curvas de gatilho não apresentam formato monotônico, além disso, nota-se que as curvas ilustradas não são equivalentes entre si, ou seja, elas variam de acordo com o cenário de incerteza técnica considerado. Ambos os resultados contradizem a lógica descrita anteriormente, entretanto, a explicação deste fenômeno pode ser encontrada ao se analisar, para o estudo de caso considerado, o comportamento do parâmetro “ $q$ ” descrito na equação 7.3.



**Figura 7.2 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto**

Uma vez que o Fator de Emissão da Linha de Base é calculado anualmente a partir do momento em que o exercício da opção é ótimo, o parâmetro “ $q$ ”

empregado no cálculo do valor do projeto difere de acordo com o instante considerado para o exercício da opção<sup>40</sup>. Por exemplo, conforme o ilustrado na Figura 7.3, note que em qualquer instante  $t \in [t_2, t_3)$  este parâmetro é igual a  $q_{t2}$ , entretanto, em  $t \in [t_1, t_2)$  este parâmetro é igual a  $q_{t1}$  e assim sucessivamente. Sendo assim, conclui-se que apesar do parâmetro “ $q$ ” ser previamente conhecido, ou seja, apesar deste parâmetro ser determinístico em relação ao cenário de incerteza técnica considerado, o seu valor varia com o tempo. Note que essa consideração afeta diretamente a relação entre os valores de  $V$  e  $S$ , a qual deixa de ser contínua ao longo do tempo.



**Figura 7.3 - Definição do Parâmetro “ $q$ ” ao Longo do Tempo**

Considerando  $V_t = q_t \cdot S_t$ , e considerando que  $S$  segue um MGB tal como o definido pela equação 5.42, note que o seguinte resultado pode ser obtido:

$$V_{t+\Delta t} = q_{t+\Delta t} \cdot S_{t+\Delta t} \quad (7.5)$$

$$E[V_{t+\Delta t}] = q_{t+\Delta t} \cdot E[S_{t+\Delta t}] \quad (7.6)$$

Substituindo a equação 5.1 em 7.6, tem-se que:

$$E[V_{t+\Delta t}] = q_{t+\Delta t} \cdot S_t \cdot e^{r \cdot \Delta t} \quad (7.7)$$

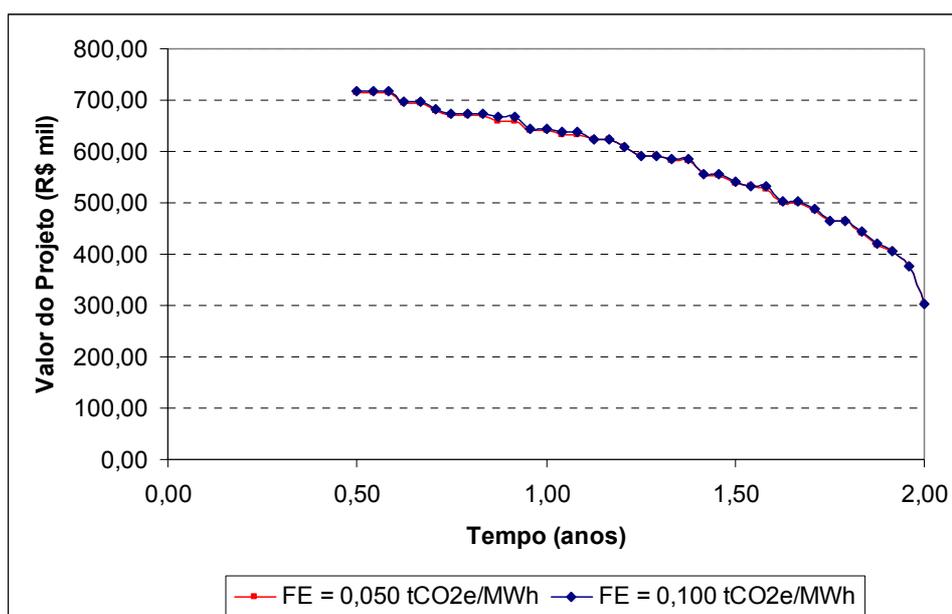
Empregado o mesmo raciocínio para a variância do valor do projeto tem-se que:

<sup>40</sup> Considera-se que o valor do projeto, ou seja, o valor do ativo objeto da opção, é igual ao valor presente dos fluxos de caixa provenientes da comercialização das RCEs.

$$\text{Var}[V_{t+\Delta t}] = q_{t+\Delta t}^2 \cdot S_t^2 \cdot e^{2r\Delta t} \cdot [e^{\sigma^2\Delta t} - 1] \quad (7.8)$$

ou seja, caso  $q_t$  seja constante ao longo do tempo, a relação entre os processos estocásticos seguidos por  $V$  e  $S$  também poderá ser considerada constante, entretanto, caso  $q_t$  varie, esta relação será descontínua período a período. É importante observar que a curva de gatilho referente ao cenário C10 de incerteza técnica é descontínua ao longo do tempo (vide Figura 7.2). Neste caso, dado o parâmetro  $q_t$  em determinados momentos da vida da opção, constata-se que, independente do preço da RCE, o valor de continuação é sempre superior ao valor intrínseco da opção.

Assumindo que o fator de emissão seja constante ao longo do período de atividade do projeto, nota-se que tanto a monotonicidade das curvas de gatilho quanto a sua independência em relação ao cenário de incerteza técnica podem ser observadas. Estes resultados se encontram ilustrados na Figura 7.4.

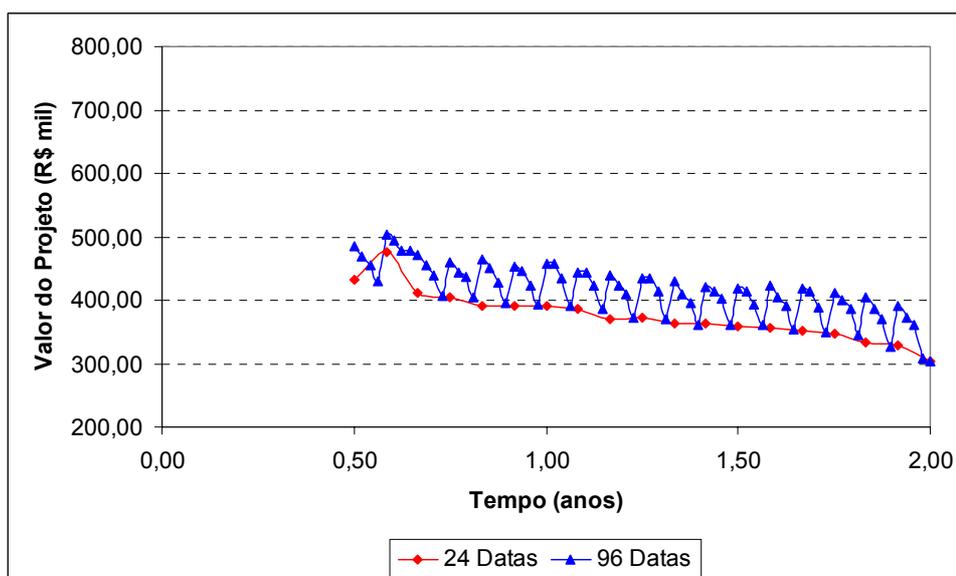


**Figura 7.4 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Fator de Emissão é Constante ao Longo do Tempo**

Apesar das curvas ilustradas considerarem dois diferentes cenários de incerteza técnica, nota-se que ambas se apresentam estritamente decrescentes e idênticas entre si. É importante ressaltar que curvas de gatilho não monotônicas já

havam sido observadas na literatura, entretanto, estes resultados nunca se relacionaram diretamente ao ativo objeto da opção<sup>41</sup>.

A influência da relação entre **V** e **P** na forma das curvas de gatilho pode ser novamente observada quando o tempo de vida da opção é discretizado em intervalos inferiores a um mês. Os resultados ilustrados na Figura 7.5 consideram o mesmo cenário anteriormente apontado como cenário C1 na Figura 7.2.



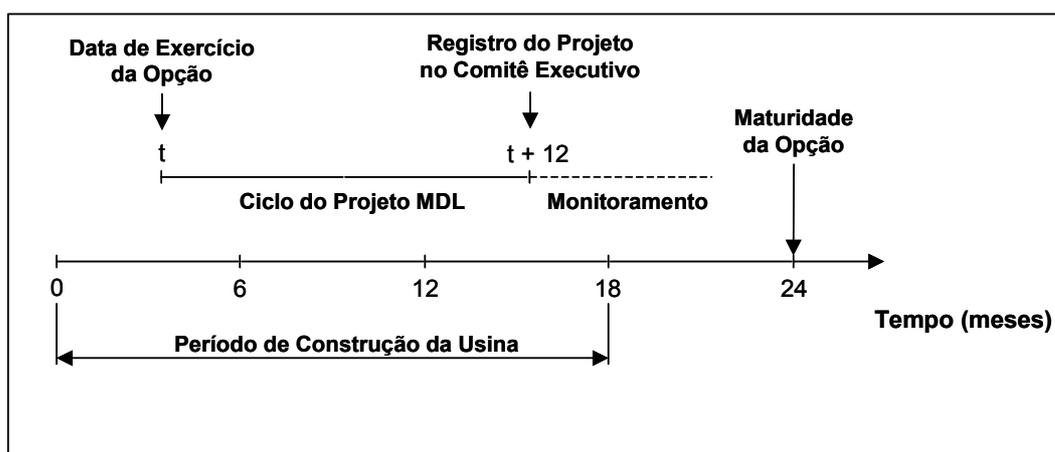
**Figura 7.5 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Número de Datas de Exercício Antecipado é Variado**

Em primeiro lugar, é preciso observar que a curva de gatilho que considera 24 datas de exercício antecipado representa o limite inferior da curva relacionada a 96 datas de exercício. Além disso, também é importante observar que a intercessão entre as curvas de gatilho ocorre de forma periódica e mensal. Entretanto, por que as curvas ilustradas não são próximas ou idênticas ao longo de todo o período considerado? Para responder a esta pergunta deve-se observar que existe uma incompatibilidade entre o horizonte de simulação do preço da RCE e o horizonte de cálculo do fator de emissão.

<sup>41</sup> Por exemplo, ao avaliar opções de expansão na produção de campos de Petróleo já desenvolvidos, Batista [48] encontrou curvas não monotônicas para o preço do Petróleo, entretanto, as curvas relacionadas ao valor do poço de Petróleo (ativo objeto da opção) seguiam sendo monotônicas.

Conforme descrito no Capítulo 3, note que o planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional é realizado pelo modelo NEWAVE em horizontes mensais, entretanto, quando 96 datas de exercício são consideradas, a simulação de preços da RCE é realizada em horizontes semanais. Conforme previamente ilustrado na Figura 7.3, é importante observar que dentro de cada mês do horizonte de estudo o parâmetro  $q_t$  é considerado constante, ou seja, trechos monotônicos de curvas de gatilho são obtidos dentro destes intervalos. Entretanto, sempre que o parâmetro  $q_t$  sofre alguma mudança (mês a mês), observa-se uma descontinuidade na curva de gatilho. Conclui-se que a curva ilustrada na Figura 7.5 alterna trechos monotônicos e descontínuos ao longo do período de vida da opção. Estes resultados estão de acordo com a lógica descrita ao longo desta seção.

É interessante observar que em todos os cenários anteriormente analisados, as curvas de gatilho indicam que não é ótimo o exercício da opção ao longo dos seus primeiros meses de vida. Este resultado é simples de ser entendido, entretanto, três parâmetros do estudo de caso devem ser observados: o tempo de vida da opção, a duração do ciclo do projeto, e a data de entrada em operação do projeto MDL. A relação entre esses parâmetros se encontra ilustrada na Figura 7.6.

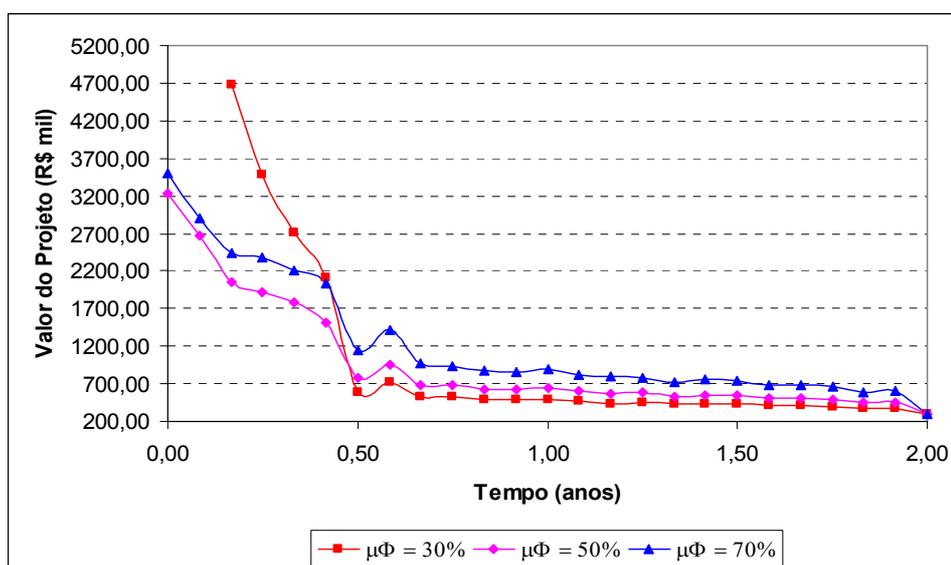


**Figura 7.6 – Horizonte de Exercício da Opção de Registrar o Projeto MDL no Comitê Executivo**

Conforme o ilustrado na Figura 7.6, uma vez que a opção é exercida são necessários 12 meses para que se cumpram todas as etapas do ciclo do projeto MDL, sendo este registrado pelo Comitê Executivo. Entretanto, mesmo com o

projeto registrado, cabe ressaltar que as RCEs produzidas pela sua atividade apenas serão monitoradas após a sua entrada em operação comercial, ou seja, após o período de construção da usina. Sendo assim, caso a opção seja exercida em qualquer instante  $t \in [0,6)$ , haverá um intervalo entre o final do ciclo do projeto e o início da produção de RCEs, sendo que tal intervalo será maior quanto menor for o valor de  $t$ . Neste caso, devido ao custo financeiro decorrente do maior intervalo entre o investimento e a receita, nota-se que o exercício antecipado da opção nunca será ótimo quando  $t \in [0,6)$ .

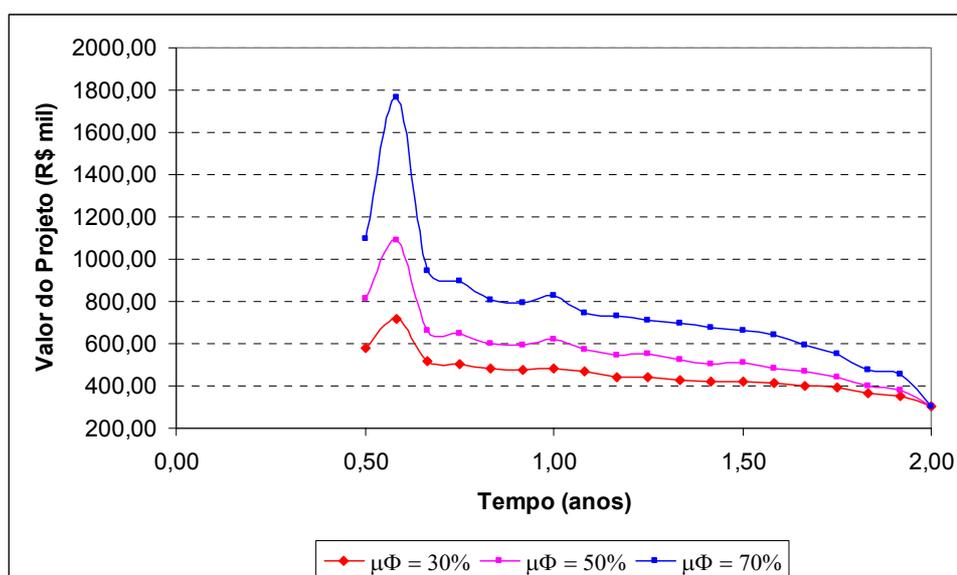
Cabe ressaltar que os resultados apresentados até o momento consideram o preço da RCE modelado por um Movimento Geométrico Browniano. Realizando as mesmas análises descritas anteriormente, porém considerando que o preço da RCE é modelado por um processo de difusão com saltos, nota-se que o comportamento das curvas de gatilho pode variar de acordo com a natureza do salto considerado. Por exemplo, as curvas de gatilho ilustradas na Figura 7.7 se referem ao valor do projeto quando grandes variações negativas de preço (saltos para baixo) podem ser observadas ao longo do tempo<sup>42</sup>.



**Figura 7.7 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o MGB com Saltos Negativos é Considerado**

<sup>42</sup> As curvas de gatilho ilustradas na Figura 7.7 se referem ao cenário C1 de incerteza técnica, considerando a ocorrência de saltos de diferentes tamanhos médios ( $\mu_\phi$ ).

Analisando o gráfico da Figura 7.7 nota-se que, ao contrário do observado na Figura 7.2, a utilização do processo de difusão com saltos exclusivamente negativos faz com que, mesmo durante os seus primeiros meses de vida, o exercício antecipado da opção possa ser ótimo. Conforme mencionado anteriormente, é interessante ressaltar que este resultado não está relacionado exclusivamente à presença de saltos na dinâmica do preço, mas também à natureza do salto considerado. Analisando a situação em que tanto saltos positivos quanto saltos negativos podem ser observados na trajetória do preço da RCE, nota-se que as curvas de gatilho voltam a ter o mesmo comportamento apresentado na Figura 7.2, onde o Movimento Geométrico Browniano era o processo estocástico utilizado. As curvas de gatilho para esta situação se encontram ilustradas na Figura 7.8.

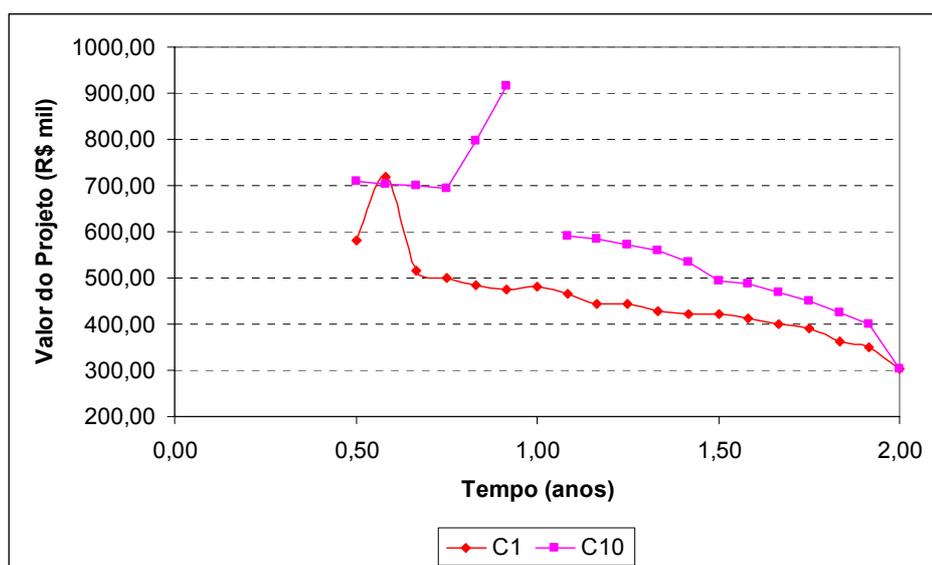


**Figura 7.8 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o MGB com Saltos Positivos e Negativos é o Processo Estocástico Considerado**

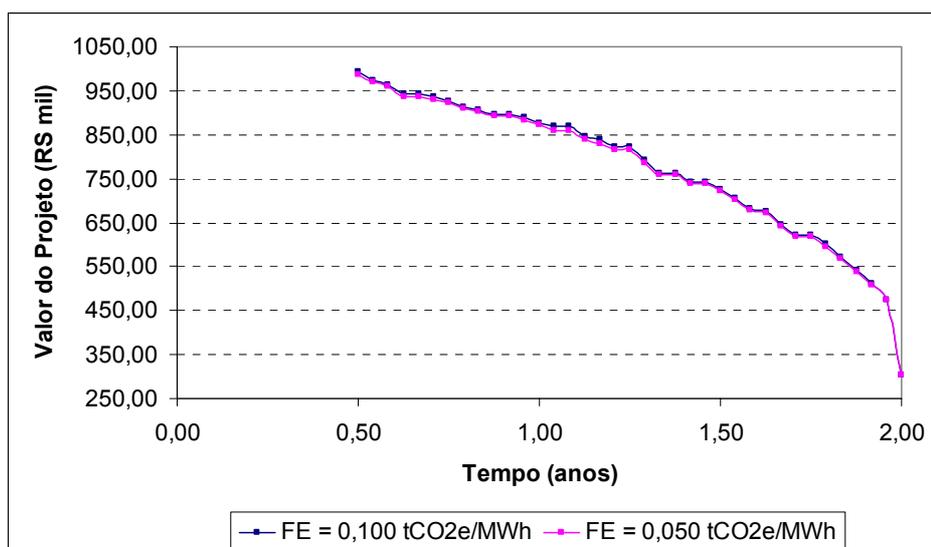
A partir do ilustrado na Figura 7.8, nota-se que quando saltos positivos e negativos são considerados na modelagem do preço da RCE o exercício antecipado da opção não é ótimo para  $t \in [0,6)$ . Entretanto, qual é a intuição destes resultados? Analisando a situação onde apenas saltos negativos podem ocorrer, nota-se que para grandes patamares de preço o custo de oportunidade pelo não exercício imediato da opção é elevado. Isso ocorre porque, no futuro, o preço da RCE estará sujeito a reduções bruscas de valor. Neste caso, nota-se que o valor

intrínseco da opção pode superar o benefício da espera por novas informações, mesmo que exista um custo financeiro associado a um maior intervalo entre o final do ciclo do projeto e o início de sua operação. Analisando a situação onde saltos positivos e negativos podem ocorrer, nota-se que tal custo de oportunidade deixa de existir, pois, no futuro, além de bruscas reduções de preço, grandes elevações no seu valor também podem ser observadas.

Finalmente, analisando as curvas de gatilho para diferentes cenários de incerteza técnica, nota-se que as mesmas não apresentam formato monotônico, tal como o observado na Figura 7.2. Adicionalmente, nota-se que as curvas de gatilho tampouco são idênticas entre si. Novamente, considerando diferentes cenários com fatores de emissão constantes ao longo do tempo, nota-se que tanto a monotonicidade quanto a equivalência das curvas de gatilho voltam a ser observadas. Estes resultados se encontram ilustrados, respectivamente, nas Figura 7.9 e Figura 7.10 a seguir.



**Figura 7.9 – Comparação entre as Curvas de Gatilho de Diferentes Cenários de Incerteza Técnica Quando o MGB com Saltos é Considerado**



**Figura 7.10 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Fator de Emissão é Constante e o Preço da RCE é Modelado Pelo MGB com Saltos**

Cabe ressaltar que estes resultados foram obtidos considerando que saltos positivos e negativos (de tamanho médio igual a 30%) podem ser observados no preço da RCE.

#### 7.2.2.2 Testes de Convergência

Nesta seção a convergência do método de GVW será verificada quando o mesmo é empregado sob as condições específicas deste trabalho. A medida de precisão adotada será o coeficiente de variação da estimativa (equação 7.1), sendo que os valores de referência serão os obtidos pela aplicação do método binomial com 4000 passos. Uma vez que o método de GVW utiliza a Simulação de Monte Carlo para determinar o valor de continuação da opção, é importante ressaltar que o custo computacional deste método é bastante elevado quando comparado ao método binomial ou LSM<sup>43</sup>. Por este motivo, apenas 10 cenários de incerteza técnica foram utilizadas nas análises desta seção.

Apesar de poucos cenários terem sido analisados, é importante observar que os principais estados de uma opção real se encontram representados pelos mesmos. Por exemplo, pode-se dizer que nos cenários C3, C5, C6, C9 e C10 a

<sup>43</sup> Uma comparação detalhada entre os custos computacionais dos métodos binomial, LSM e de GVW é apresentada no Apêndice D.

opção avaliada se encontra aproximadamente *at-the-money*, ou seja, com valor próximo a zero. Nos demais cenários, cabe ressaltar que a opção se encontra *in-the-money* ou *deep-in-the-money*<sup>44</sup>.

Assim como realizado na seção 7.2.1, nesta seção o valor da opção também será calculado individualmente para cada cenário de incerteza técnica. Além disso, o coeficiente de variação da estimativa de menor precisão será a variável inicialmente observada. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 7.2.

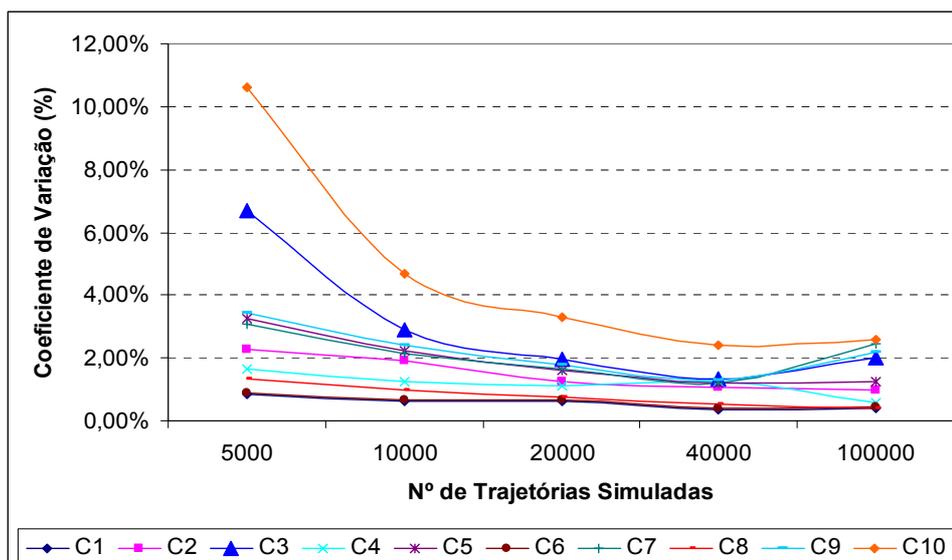
**Tabela 7.2 - Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão  
Obtidas pelo Método de GWV**

Nº de Trajetórias Simuladas	Número de Datas de Exercício Antecipado			
	12	24	48	96
5000	6.64%	11.32%	12.38%	10.60%
10000	8.99%	7.60%	8.61%	4.68%
20000	10.43%	6.48%	4.06%	3.32%
40000	10.02%	6.29%	3.50%	2.39%
100000	9.95%	5.60%	2.11%	2.57%

Os resultados da Tabela 7.2 indicam que o coeficiente de variação máximo dentre as estimativas tende a diminuir à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas para o preço da RCE, sendo que o mesmo comportamento é observado à medida que se aumenta o número de datas onde é possível o exercício antecipado da opção.

Considerando a vida da opção dividida em intervalos semanais (96 datas de exercício antecipado) e analisando individualmente, para cada cenário de incerteza técnica, o seu valor em função do número de trajetórias simuladas para o preço da RCE, o mesmo comportamento descrito anteriormente pode ser observado, ou seja, nota-se que o coeficiente de variação da estimativa diminui à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas. Estes resultados se encontram ilustrados na Figura 7.11.

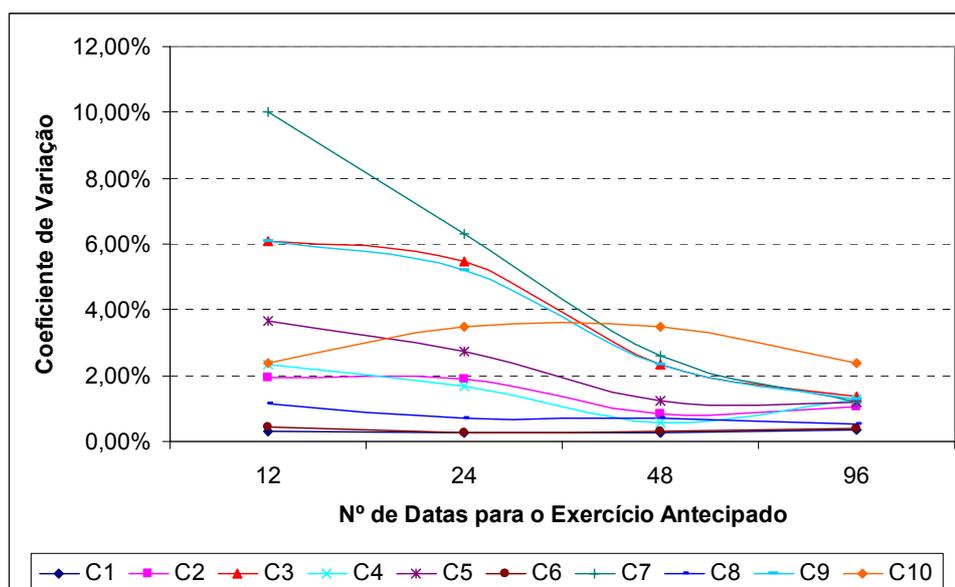
<sup>44</sup> Diz-se que uma opção se encontra *deep-in-the-money* quando o fluxo de caixa que a mesma proporciona ao seu titular é extremamente positivo.



**Figura 7.11 – Sensibilidade do Método de GVW Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas**

Note que este comportamento também pode ser observado quando o valor da opção é avaliado em função do número de datas onde é possível o seu exercício antecipado (vide Figura 7.12). Os resultados apresentados consideram que 40000 trajetórias de preço são simuladas em cada iteração do algoritmo de GVW.

A partir dos resultados apresentados nesta seção conclui-se que, à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas e o número de datas de exercício antecipado, o método de GVW pode ser considerado robusto para a avaliação de opções com as características consideradas neste trabalho. Sendo assim, na próxima seção este método será empregado como referência para verificar a convergência do método LSM quando saltos aleatórios são considerados na dinâmica do preço da RCE.



**Figura 7.12 – Sensibilidade do Método de GVW Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção**

### 7.2.3 Análise de Convergência do Método LSM

Assim como a seção 7.2.2, esta seção também está dividida em duas partes. Na primeira parte analisa-se a convergência do valor da opção estimado pelo método LSM quando o MGB é o processo estocástico empregado na modelagem do preço da RCE. Nesta etapa os resultados do método Binomial com 4000 passos são utilizados como referência. Na segunda parte a convergência do método LSM é novamente verificada, entretanto, considera-se que o Movimento de Difusão com Saltos é o processo estocástico empregado. Neste caso os resultados do método de GVW, com 100000 trajetórias simuladas e 96 datas de exercício antecipado, são utilizados como referência.

#### 7.2.3.1 Análise de Convergência Considerando o MGB

Conforme citado na seção 5.3.3, uma das principais premissas do método LSM é supor que a função de continuação da opção pode ser representada por uma combinação linear de funções base. Segundo Longstaff & Schwartz [57] diversos tipos de funções podem ser utilizadas com este fim, por exemplo, os polinômios de Laguerre, de Legendre, de Chebyshev ou mesmo os polinômios de Jacobi.

Neste trabalho utilizou-se o mesmo tipo de função base utilizado por Longstaff & Schwartz em seu artigo original, ou seja:

$$B_l(S) = S^l, \quad l=1, 2, 3, \dots \quad (7.9)$$

onde  $S$  representa o preço do ativo objeto e  $l$  representa o termo da função de continuação correspondente à respectiva função base. Cabe ressaltar que Longstaff & Schwartz utilizam a combinação linear de duas funções base para aproximar o valor de continuação da opção, ou seja, considera-se que o parâmetro  $G$ , descrito na equação 5.27, é igual a 2. A seguir a equação 7.10 descreve a função de continuação ( $F_G(w,t)$ ) originalmente utilizada por Longstaff & Schwartz:

$$F_G(w,t) = \sum_{l=0}^G a_l B_l(S) = \sum_{l=0}^2 a_l B_l(S) = a_0 + a_1 \cdot S + a_2 \cdot S^2 \quad (7.10)$$

Uma vez definida a função de continuação, a mesma oportunidade de investimento anteriormente descrita nesta seção será utilizada para verificar a robustez do método LSM. Novamente, o valor da opção será estimado individualmente para cada cenário de incerteza técnica, sendo que o coeficiente de variação da estimativa de menor precisão será a variável inicialmente observada. Cabe ressaltar que todos os 2000 cenários de incerteza técnica foram considerados nesta análise. Os resultados encontrados se encontram apresentados na Tabela 2.1.

**Tabela 7.3 – Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão  
Obtidas pelo Método LSM**

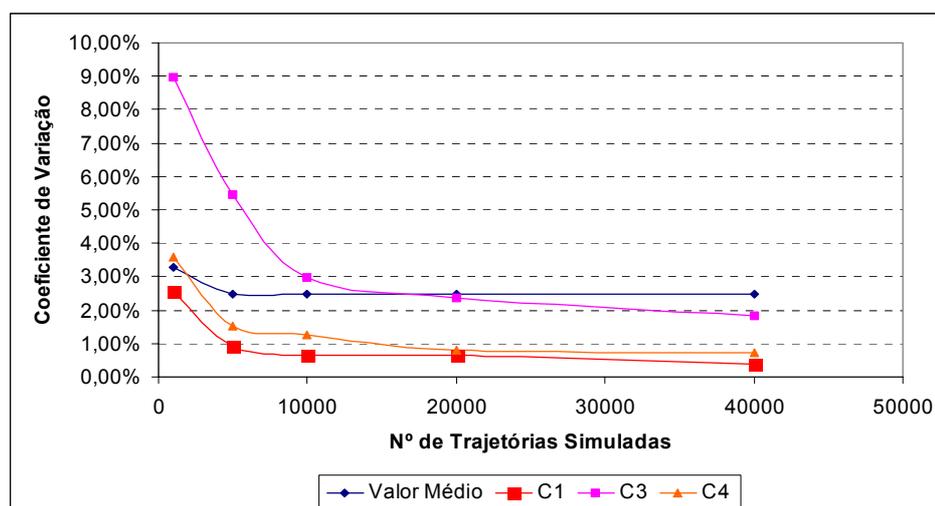
Nº de Trajetórias Simuladas	Número de Datas de Exercício Antecipado				
	12	24	48	96	192
1000	45,63%	29,68%	23,08%	19,87%	28,71%
5000	23,62%	13,99%	16,44%	16,76%	16,93%
10000	26,15%	12,31%	13,29%	8,57%	10,42%
20000	27,10%	12,02%	6,78%	5,02%	5,49%
40000	26,08%	12,08%	6,26%	4,38%	5,26%

Assim como os resultados da Tabela 7.2, estes resultados também indicam que o coeficiente de variação máximo tende a diminuir à medida que se aumenta o

número de trajetórias simuladas para o preço da RCE, sendo que o mesmo comportamento é observado à medida que se aumenta o número de datas onde é possível o exercício antecipado da opção. Cabe ressaltar que apenas com a utilização simultânea de valores superiores a 20000 trajetórias simuladas e 96 datas de exercício antecipado, é possível garantir que o coeficiente de variação do valor estimado seja próximo ou inferior a 5% em todos os cenários de incerteza técnica.

Com o objetivo de analisar o comportamento da opção em cenários específicos, três diferentes cenários de incerteza técnica foram utilizados (C1, C3 e C4). Cabe ressaltar que nestes cenários a opção de investimento se encontra respectivamente *deep-in-the-money*, *at-the-money* e *in-the-money*. Adicionalmente, é válido ressaltar que o comportamento do valor médio da opção também será analisado.

Inicialmente, a precisão das estimativas nestes cenários será avaliada em função do número de trajetórias simuladas para o ativo objeto. Para tanto, considerou-se a vida da opção dividida em horizontes semanais, ou seja, foram consideradas 96 datas para o seu exercício antecipado. Os resultados desta análise se encontram ilustrados na Figura 7.13.

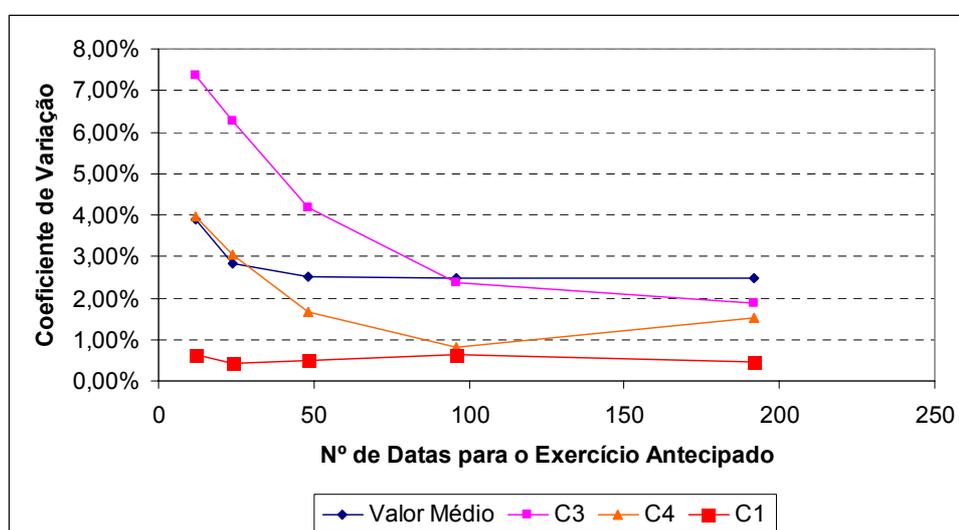


**Figura 7.13 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas (MGB)**

A partir destes resultados observa-se que quanto maior o número de trajetórias simuladas maior é a precisão do valor estimado. Por outro lado, nota-se

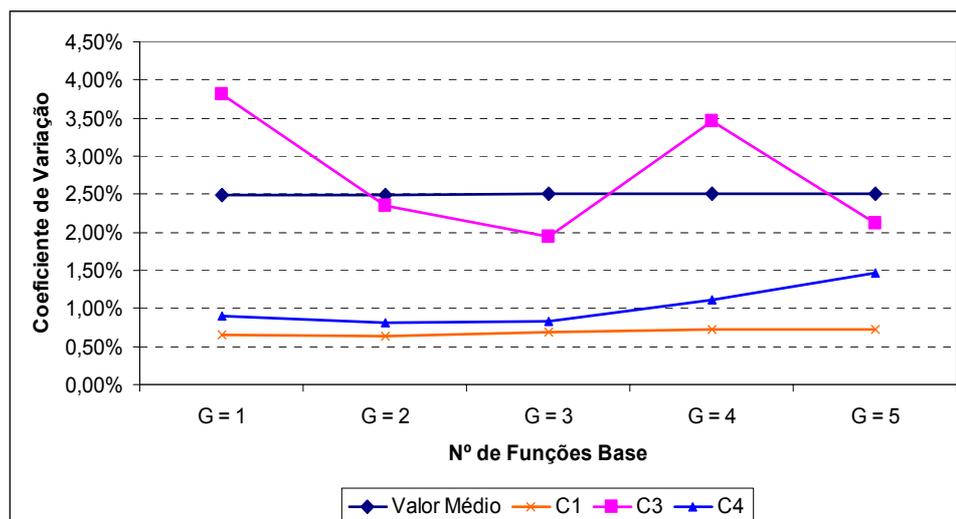
que o valor médio da opção não apresenta ganhos significativos de precisão com o aumento do número de simulações. Isso ocorre porque, neste caso, a variância do valor médio estimado ( $V(\bar{C})$ ) está diretamente relacionada ao número de cenários de incerteza técnica, o qual permanece constante independente do número de simulações para o preço do ativo objeto.

Assim como no método de GVW, o comportamento descrito anteriormente também pode ser observado quando o valor da opção é avaliado em função do número de datas onde é possível o seu exercício antecipado (vide Figura 7.14). Cabe ressaltar que nesta análise foram consideradas 20000 trajetórias para o preço do ativo objeto.



**Figura 7.14 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção (MGB)**

Finalmente, o comportamento da opção quando se varia o número de funções base considerado na equação 5.27 é ilustrado na Figura 7.15. Para tanto, foram consideradas 20000 trajetórias simuladas e 96 datas de exercício antecipado. Note que em todos os cenários analisados, à exceção do cenário C3, a estimativa realizada não apresentou ganhos significativos de precisão com o aumento do número de funções base. No cenário C3 foi possível observar ganhos significativos de precisão quando a função de continuação passou de linear a quadrática (aproximadamente 1,50%) e de quadrática a cúbica (aproximadamente 0,50%). Cabe ressaltar que neste cenário a opção se encontra *at-the-money*, ou seja, o seu valor é próximo de zero.



**Figura 7.15 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Funções Base na Função de Continuação da Opção**

A partir dos resultados apresentados nesta seção conclui-se que, à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas e o número de datas de exercício antecipado, o método LSM pode ser considerado robusto para a avaliação de opções com as características descritas neste trabalho.

### 7.2.3.2

#### **Análise de Convergência Considerando o MGB com Saltos**

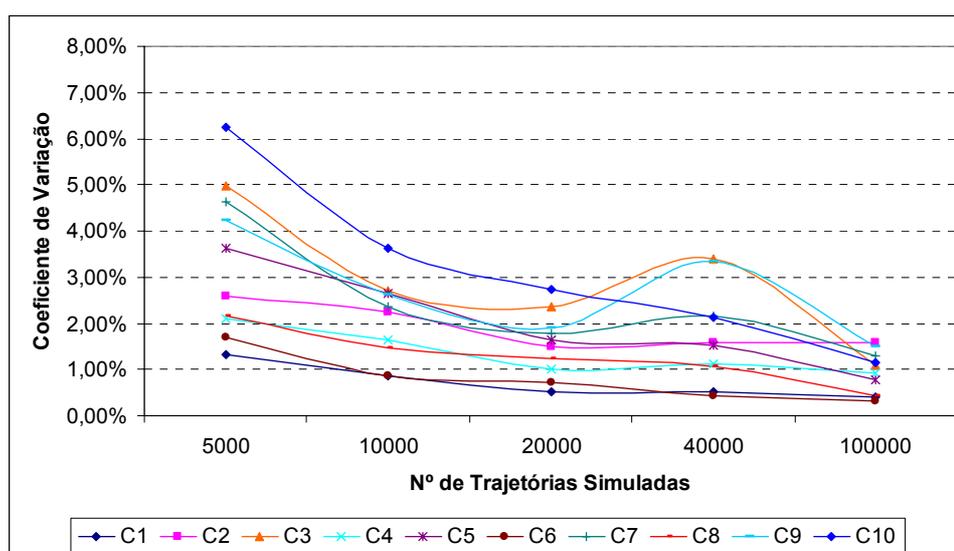
Nesta seção a convergência do método LSM será testada considerando que o preço da RCE segue o processo de difusão com saltos descrito na seção 5.4.2. Para tanto, os mesmos parâmetros previamente adotados para o Movimento Geométrico Browniano serão novamente utilizados nesta análise. Além disso, definindo a ocorrência de um salto no preço da RCE como um evento de *Poisson*, considera-se que a taxa média de ocorrência desse evento ( $\lambda$ ) é igual a 2,00 saltos/ano. Finalmente, dado que um salto foi observado, será considerado que a sua amplitude ( $\phi$ ) é uma variável aleatória, normalmente distribuída, com média ( $\mu_\phi$ ) e desvio padrão ( $\sigma_\phi$ ) respectivamente iguais a 30% e 15% do preço corrente da RCE. Os coeficientes de variação das estimativas de menor precisão, considerando como *benchmark* os resultados obtidos pela utilização do método de GVW com 100000 trajetórias simuladas e 96 datas de exercício antecipado, são apresentados na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4 – Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão  
Quando o Método LSM e o MGB com Saltos são Utilizados**

Nº de Trajetórias Simuladas	Número de Datas de Exercício Antecipado			
	12	24	48	96
5000	7,89%	9,19%	6,40%	6,25%
10000	7,10%	6,81%	4,04%	3,61%
20000	7,12%	4,38%	4,09%	2,74%
40000	6,26%	4,89%	2,72%	3,40%
100000	6,34%	3,03%	2,50%	1,59%

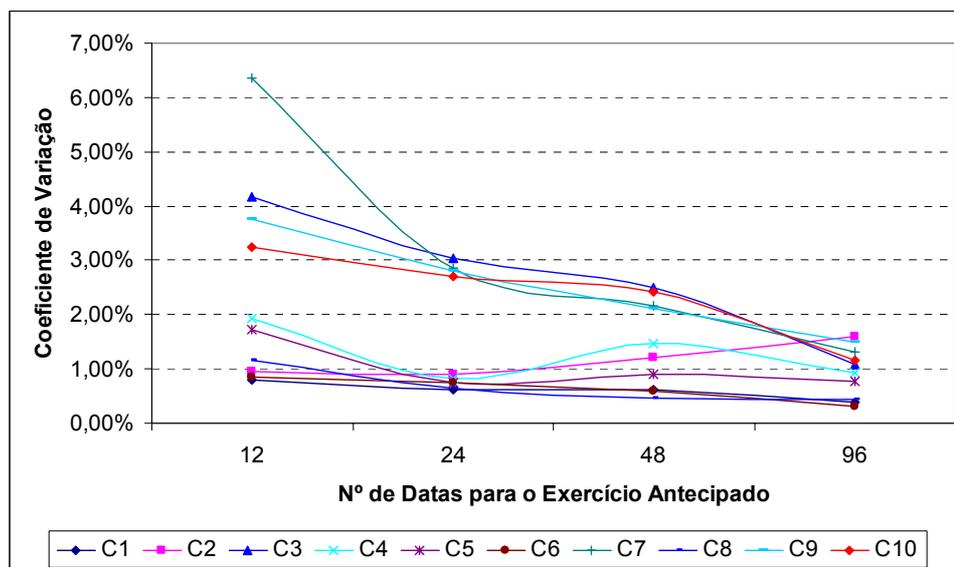
É importante observar que o mesmo grupo de cenários utilizado na seção 7.2.2 também foi utilizado para a obtenção destes resultados. Assim como as demais análises deste capítulo, os resultados da Tabela 7.4 indicam que o coeficiente de variação da estimativa de menor precisão tende a diminuir à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas e/ou o número de datas de exercício antecipado da opção.

Considerando a vida da opção dividida em intervalos semanais (96 datas de exercício antecipado) e analisando cada cenário de incerteza técnica individualmente, nota-se que o coeficiente de variação do valor estimado diminui à medida que se aumenta o número de trajetórias simuladas, tal como o observado nas seções anteriores. A Figura 7.16 ilustra estes resultados.



**Figura 7.16 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas (MGB com Saltos)**

O mesmo comportamento descrito anteriormente pode ser observado quando o valor da opção é avaliado em função do número de datas onde é possível o seu exercício antecipado (vide Figura 7.17). Cabe ressaltar que os resultados da Figura 7.17 consideram que 100000 trajetórias de preço são simuladas em cada iteração do algoritmo de LSM.



**Figura 7.17 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção (MGB com Saltos)**

A partir dos resultados desta seção conclui-se que, mesmo quando o preço da RCE segue o processo de difusão com saltos, o método LSM pode ser considerado robusto para a avaliação de opções com as características descritas neste trabalho. Apesar do método de GVW não ser usualmente empregado como *benchmark*, mostrou-se neste capítulo que os seus resultados convergem com o método binomial e com o método LSM quando o MGB é o processo estocástico utilizado. Sendo assim, uma vez que o MGB com saltos foi o processo estocástico considerado, utilizou-se os seus resultados como base para se verificar a convergência do método LSM.

Tendo em vista a precisão dos resultados obtidos a partir da utilização dos métodos binomial, LSM e de GVW, assim como os seus respectivos custos computacionais (vide Apêndice D), é importante ressaltar que o estudo de caso proposto neste trabalho é analisado utilizando-se o método binomial com 96 passos. Entretanto, cabe ressaltar que quando o MGB com saltos for utilizado para

modelar o preço da RCE, o método empregado será o método LSM com 20000 trajetórias de preço e 96 datas de exercício antecipado.

Finalmente, analisando o valor da opção em função do processo estocástico empregado, nota-se que a presença de saltos na dinâmica do preço da RCE eleva o valor da opção (vide Tabela 7.5). De acordo com a intuição da teoria de avaliação de opções [47], isso ocorre porque, na presença de saltos, a volatilidade do preço do ativo objeto da opção é aumentada, o que, por sua vez, também aumenta o valor da opção.

**Tabela 7.5 – Valor da Opção em Função do Processo Estocástico Empregado**

<b>Processo Estocástico</b>	<b>Valor da Opção (R\$ mil)</b>
MGB	140,79
MGB com Saltos	165,15

Adicionalmente, analisando o comportamento da opção para diferentes valores de  $\mu_\phi$  e  $\sigma_\phi$ , os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.6 – Valor da Opção em Função dos Parâmetros da Distribuição da Amplitude dos Saltos**

<b>Parâmetros da Distribuição da Amplitude do Salto</b>	<b>Valor da Opção (R\$ mil)</b>
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (10\%, 15\%)$	146,74
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (20\%, 15\%)$	154,32
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (30\%, 15\%)$	165,15
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (60\%, 15\%)$	214,15
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (30\%, 5\%)$	161,06
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (30\%, 10\%)$	162,54
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (30\%, 15\%)$	165,15
$(\mu_\phi, \sigma_\phi) = (30\%, 30\%)$	177,42

Os resultados da Tabela 7.6 mostram que quanto maior a amplitude média dos saltos maior é o valor da opção. Analogamente, o mesmo comportamento é observado à medida que se aumenta a volatilidade da amplitude dos saltos. Estes resultados corroboram com a intuição descrita anteriormente para os resultados da

Tabela 7.5, ou seja, quanto maior a volatilidade do preço da RCE maior é o valor da opção.

A partir das análises realizadas na seção 7.2 verificou-se que os métodos Binomial, LSM e de GVW podem ser considerados robustos para a avaliação de opções com as características descritas neste trabalho. Além disso, verificou-se que este resultado independe do processo estocástico empregado, seja ele o MGB ou o MGB com Saltos.

A utilização do método de GVW possibilitou a determinação de curvas de gatilho não monotônicas as quais relacionam o ativo objeto da opção (valor do projeto) com o tempo para a sua expiração. Concluiu-se que tal comportamento é devido à relação entre o preço da RCE e o valor do projeto, que por sua vez é descontínua ao longo do tempo. É importante destacar que tal descontinuidade não está relacionada às incertezas existentes sobre a trajetória do preço da RCE, mas, exclusivamente, à evolução temporal da linha de base do projeto MDL. Além das curvas de gatilho serem não monotônicas, também foi verificado que as mesmas variam de acordo com o cenário de incerteza técnica considerado.

No que tange à precisão das estimativas realizadas quando 2000 cenários de incerteza técnica são considerados, verificou-se que os resultados obtidos pelo método Binomial apresentam coeficiente de variação inferior a 5% quando a vida da opção é discretizada em, no mínimo, 96 passos. Já para o método LSM, além de se utilizar um número mínimo de 96 passos, é necessário que o número de trajetórias simuladas para o preço da RCE seja igual ou superior a 20000.

Adicionalmente, considerando a utilização do método Binomial com 96 passos, é importante destacar que o seu tempo de processamento é de, aproximadamente, 1 minuto. Por outro lado, quando o método LSM é utilizado com 96 datas de exercício antecipado e 20000 trajetórias simuladas, este valor é elevado para 9 horas e 22 minutos (vide Apêndice D). Por este motivo os resultados apresentados na próxima seção foram obtidos utilizando-se o método binomial. Apenas quando o MGB com Saltos foi o processo estocástico empregado, utilizou-se o método LSM para se avaliar a oportunidade de investimento considerada, pois, neste caso, o método Binomial desenvolvido por Cox, Ross & Rubinstein [50] não pode ser diretamente empregado. Conforme mencionado anteriormente, ressalta-se que os resultados deste trabalho foram

gerados a partir de um processador Pentium 4 de 3GHz e 512 MBytes de memória RAM.

### 7.3

#### Resultados Numéricos

Nesta seção serão apresentados os resultados numéricos dos estudos de caso descritos no Capítulo 6. Uma vez que o estudo de caso é fictício, algumas análises de sensibilidade serão realizadas sobre determinadas premissas do caso original. Cabe ressaltar que a atratividade financeira do mercado de carbono será o principal objeto de estudo das análises realizadas.

#### 7.3.1

##### Resultados – Pequena Central Hidrelétrica A (PCH A)

A opção embutida no empreendimento **PCH A** é inicialmente avaliada considerando que o preço da RCE segue um MGB simples, com os mesmos parâmetros descritos na seção 7.2.1. Além disso, cabe ressaltar que a **Alternativa 1** de configuração do SIN (vide Capítulo 3) é utilizada como padrão nestas análises. Também é considerado que o desenvolvimento do projeto pode ocorrer em qualquer região do Sistema Interligado Nacional, e, conseqüentemente, em diferentes subsistemas elétricos dentro do mesmo. Por se tratar de um projeto de grande escala, ou seja, com capacidade instalada superior a 15MW, a metodologia ACM0002 é empregada na determinação da sua linha de base, sendo importante destacar que todas as alternativas de cálculo são exploradas. Os resultados encontrados se encontram apresentados na Tabela 7.7.

**Tabela 7.7 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
<b>OM Médio</b>	300,38	684,68
<b>OM Simples Ajustado</b>	1.996,95	1.528,54
<b>OM DDA</b>	1.988,19	2.107,08

Os resultados da Tabela 7.7 indicam que o valor da opção é maximizado quando o empreendimento é desenvolvido no subsistema **N/NE/MM** e a sua linha de base é determinada pelo método de **Análise dos Dados de Despacho** (OM

DDA). Da mesma forma, pode-se dizer que a opção tem menos valor quando o empreendimento é desenvolvido no subsistema **S/SE/CO/AR**, sendo a sua linha de base determinada pelo método **OM Médio**.

Estes resultados estão de acordo com a intuição previamente descrita no Capítulo 4, pois, uma vez que a geração do Sistema Interligado Nacional é predominantemente hidráulica, espera-se que a utilização do método **OM Médio** resulte em uma linha de base mais conservadora, reduzindo o valor da opção. Por outro lado, uma vez que o método **OM DDA** considera o grupo de usinas com pior mérito de despacho (usinas térmicas) no cálculo da linha de base, um cenário menos conservador é esperado, elevando assim o valor da opção.

Apesar da utilização do método **OM DDA** ter se mostrado mais vantajosa para o projeto considerado, é importante destacar que os resultados da Tabela 7.7 não consideram a existência de qualquer custo associado à utilização da água. Isto significa que, havendo geração termelétrica, esta sempre será considerada marginal no sistema. A rigor, esta premissa não pode ser considerada verdadeira. Conforme discutido no Capítulo 3 deste trabalho, sabe-se que o uso excessivo da água no presente, em detrimento da sua utilização no futuro, possui um custo de oportunidade associado. Tal custo é denominado “valor da água”, o qual é considerado pelo modelo NEWAVE ao realizar o planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional.

Também é importante destacar que, além de considerar custo zero para a água, os resultados da Tabela 7.7 consideram a parcela flexível e inflexível da geração termelétrica no cálculo da linha de base do projeto. Apesar do escopo da metodologia ACM0002 não especificar nada a este respeito, cabe destacar que a geração inflexível das usinas termelétricas não pode ser deslocada pela geração do projeto MDL, e, portanto, seria coerente não considerá-la neste cálculo. Sendo assim, quatro diferentes cenários de utilização do método **OM DDA** foram analisados nesta seção (vide Tabela 7.8):

**Tabela 7.8 – Cenários de Aplicação do Método OM DDA**

<b>Cenário</b>	<b>Considera o Valor da Água</b>	<b>Considera a Parcela Inflexível das UTEs</b>
<b>OM DDA 1 (*)</b>	Não	Sim
<b>OM DDA 2</b>	Sim	Sim
<b>OM DDA 3</b>	Não	Não
<b>OM DDA 4</b>	Sim	Não

(\*) Caso Padrão

Cabe ressaltar que o objetivo principal destes cenários é avaliar a opção considerada quando determinadas premissas associadas à utilização do método **OM DDA** são flexibilizadas. Os resultados desta análise se encontram descritos na Tabela 7.9.

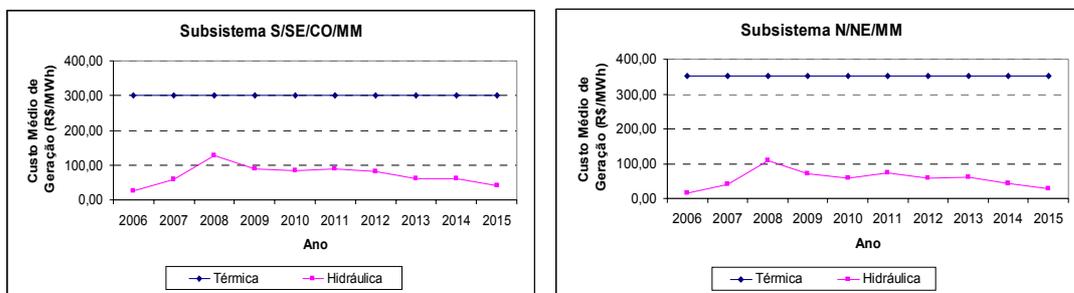
**Tabela 7.9 – Valor da Opção em Função do Cenário de Utilização do Método OM DDA (R\$ mil)**

<b>Cenário</b>	<b>Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL</b>	
	<b>S/SE/CO/AR</b>	<b>N/NE/MM</b>
<b>OM DDA 1</b>	1.988,19	2.107,08
<b>OM DDA 2</b>	1.352,23	1.731,53
<b>OM DDA 3</b>	725,12	773,10
<b>OM DDA 4</b>	109,04	440,33

De acordo com os resultados da Tabela 7.9, sob as condições do cenário **OM DDA 4**, a determinação da linha de base pelo método **Análise dos Dados de Despacho** pode ser considerada mais conservadora do que a própria utilização do método **OM Médio**, inicialmente apontado como o método mais conservador para o caso brasileiro. Além disso, cabe ressaltar que o valor da opção se mostrou mais sensível à desconsideração da parcela inflexível das usinas termelétricas (OM DDA 3) do que à consideração do valor da água (OM DDA 2) na determinação da linha de base do projeto. Este resultado sugere a predominância de cenários hidrológicos favoráveis bem como a ocorrência de pouca geração termelétrica acima de sua parcela inflexível ao longo do horizonte de estudo.

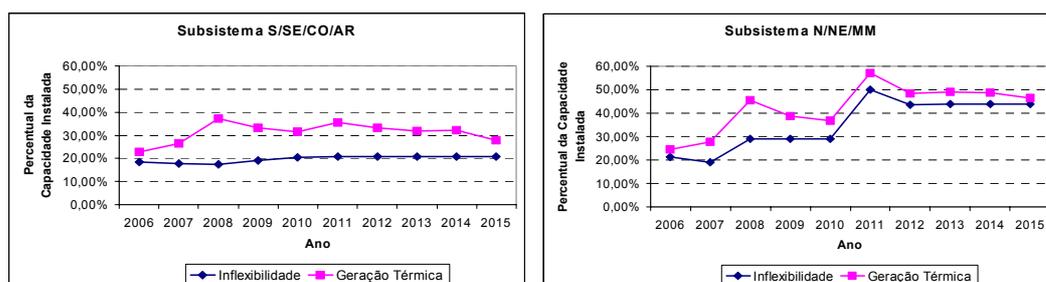
Comparando o custo médio da geração térmica com o custo médio da geração hidráulica ao longo do período 2006-2015 (vide Figura 7.18) nota-se que em ambos os subsistemas o custo da geração térmica é bastante superior ao da

geração hidráulica<sup>45</sup>. Estes resultados indicam que, havendo geração térmica, a mesma deverá ser marginal no sistema, o que corrobora com os resultados da Tabela 7.9 e justifica a pequena variação sofrida pelo valor da opção quando as premissas do cenário **OM DDA 2** são consideradas.



**Figura 7.18 - Comparação entre o Custo Médio das Gerações Térmica e Hidráulica no Horizonte 2006-2015**

Adicionalmente, a maior influência que a inflexibilidade das usinas térmicas exerce sobre o valor da opção pode ser explicada quando a geração dessas usinas é comparada com a sua parcela inflexível. A partir do ilustrado na Figura 7.19, nota-se que, em média, a geração termelétrica é pouco superior a sua parcela inflexível ao longo do horizonte de estudo. Esta relação ainda é mais evidente no subsistema N/NE/MM, o que explica a queda mais acentuada do valor da opção no cenário **OM DDA 3**.



**Figura 7.19 - Comparação entre os Níveis Médios de Geração e de Inflexibilidade das Usinas Termelétricas Conectadas ao SIN (2006-2015)**

Conforme citado anteriormente, uma vez que o empreendimento avaliado é fictício, algumas análises de sensibilidade serão realizadas sobre determinados

<sup>45</sup> Nestas análises considera-se que o custo da geração hidráulica é igual ao valor da água, um dos resultados fornecidos pelo modelo NEWAVE.

parâmetros do estudo de caso original. Além disso, alguns cenários alternativos ao caso padrão também serão estudados. Tais análises são apresentadas a seguir:

- **Configuração do Sistema Interligado Nacional**

Conforme previamente comentado no Capítulo 4 deste trabalho, os projetos brasileiros recentemente registrados no Comitê Executivo consideram o Sistema Interligado Nacional dividido em dois grandes subsistemas elétricos: o subsistema S/SE/CO e o subsistema N/NE. Entretanto, uma vez que o próprio PDEE 2006-2015 considera o Sistema Interligado Nacional composto por quatro grandes subsistemas elétricos (Sul, Sudeste, Norte e Nordeste), uma segunda alternativa de configuração foi adotada neste trabalho. Os resultados encontrados se encontram apresentados na Tabela 7.10.

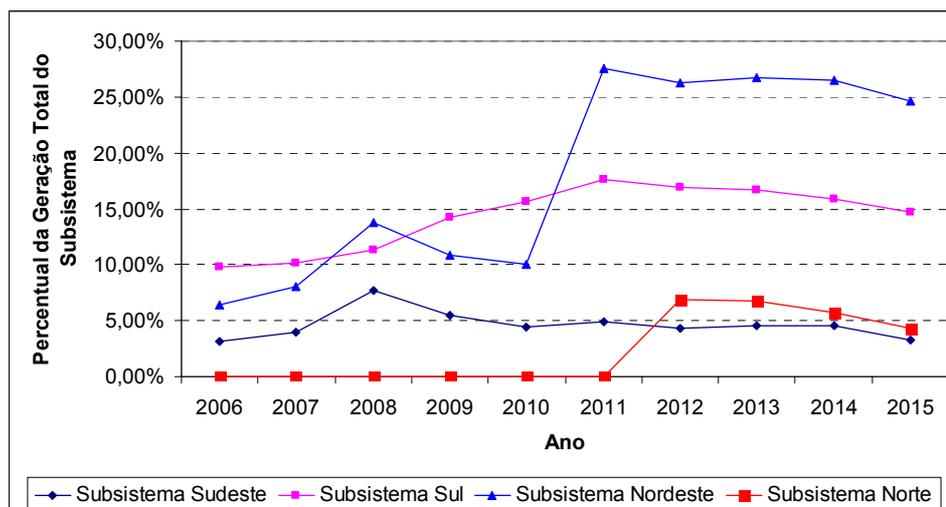
**Tabela 7.10 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Quando a Alternativa 2 de Configuração do SIN é Utilizada (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL			
	Sudeste	Sul	Nordeste	Norte
OM Médio	77,71	1.231,35	1.428,12	16,20
OM Simples Ajustado	1.870,06	2.852,65	2.321,92	312,29
OM DDA	842,50	5.071,51	2.875,19	361,61

Estes resultados mostram que o menor valor da opção é obtido quando o projeto é implementado no subsistema Norte do SIN. Da mesma forma, pode-se dizer que o valor da opção é maximizado quando o projeto é implementado no subsistema Sul ou Nordeste do SIN, a depender da forma como a linha de base é determinada. Os resultados da Tabela 7.10 podem ser facilmente entendidos quando, em cada subsistema, a parcela da geração que efetivamente produz RCEs<sup>46</sup> é analisada. O percentual deste tipo de geração em relação à energia total produzida no subsistema se encontra ilustrada na Figura 7.20.

---

<sup>46</sup> Segundo a metodologia ACM0002 [1], apenas a geração termelétrica a partir de combustíveis fósseis deve ser considerada no cálculo da linha de base do projeto.



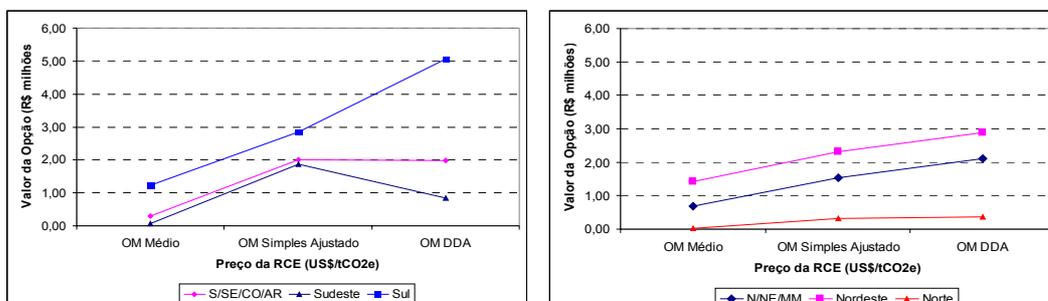
**Figura 7.20 – Relação entre a Geração Produtora de RCEs e a Geração Total do Subsistema Elétrico (Alternativa 2 de Configuração do SIN)**

No subsistema Norte nota-se que a geração termelétrica a partir de combustíveis fósseis é considerada nula desde 2006 até 2011. Mesmo a partir desta data, pode-se dizer que a geração termelétrica é pouco representativa em relação à geração total do subsistema (aproximadamente 6%). Esse fato justifica os pequenos valores da opção associados à implantação do projeto nesta região. Apesar de existir geração termelétrica no subsistema Sudeste ao longo de todo o horizonte de estudo, o mesmo raciocínio pode ser empregado para justificar os baixos valores da opção neste mercado, pois a sua geração termelétrica também é pouco representativa.

Ao contrário dos subsistemas Norte e Sudeste, o gráfico da Figura 7.20 indica que os subsistemas Sul e Nordeste apresentam maior participação termelétrica no atendimento dos seus respectivos mercados. Por este motivo, os resultados da Tabela 7.10 também indicam que estas regiões são mais favoráveis à implantação de um projeto MDL.

Observando os gráficos da Figura 7.21, nota-se que quando o projeto é implantado no subsistema S/SE/CO/AR, o valor da opção é influenciado, predominantemente, pelas características da região Sudeste. Nesta região, cabe ressaltar que a geração de energia elétrica é, em média, 3.7 vezes superior à geração observada no subsistema Sul ao longo do período considerado (2006-2015). Uma vez que o projeto é implantado no subsistema N/NE/MM, a mesma

relação de dependência pode ser observada entre as características deste subsistema e do subsistema Nordeste. Novamente, cabe ressaltar que a escala de geração no subsistema Nordeste é, em média, 1.6 vezes superior à escala de geração do subsistema Norte, o que justifica a sua maior influência nas características do subsistema N/NE/MM.



**Figura 7.21 – Comparação entre as Alternativas 1 e 2 de Configuração do SIN**

### • Impostos

Conforme descrito anteriormente na Tabela 6.2, o caso padrão desta análise considera que a receita proveniente da comercialização das RCEs deve ser tributada em aproximadamente 43,63%, ou seja, o equivalente a soma das alíquotas de Imposto de Renda, Contribuição Social, PIS, COFINS e CPMF. Considerando um cenário alternativo de isenção desses impostos, exceto a CPMF, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.11 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Considerando o Cenário de Isenção de Impostos (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
OM Médio	656,07	1.320,02
OM Simples Ajustado	3.510,69	2.731,24
OM DDA	3.499,65	3.699,08

Como esperado, a diminuição da carga tributária elevou o valor da opção. Considerando o projeto desenvolvido no subsistema S/SE/CO/AR, nota-se que a isenção de impostos representa um ganho de 118,40% no valor da opção quando o método **OM Médio** foi empregado no cálculo da linha de base. Neste caso, cabe

ressaltar que o valor da opção, originalmente avaliada em R\$ 300,38 mil, foi reavaliada em R\$ 636,07 mil.

- **Custos de Transação**

Conforme citado no Capítulo 2, as incertezas relacionadas ao próprio Protocolo de Quioto e ao MDL serão avaliadas de forma simplificada neste trabalho. Sendo assim, foi realizada uma análise de sensibilidade do valor da opção em função dos custos de transação associados ao registro do projeto MDL no Comitê Executivo. Considerando que os custos de transação possam variar entre 100,00 e 400,00 mil dólares, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.12 – Valor da Opção em Função dos Custos de Transação do Empreendimento PCH A (R\$ mil)**

<b>Subsistema S/SE/CO/AR</b>			
<b>Custos de Transação (US\$ mil)</b>	<b>OM Médio</b>	<b>OM Simples Ajustado</b>	<b>OM DDA</b>
<b>100,00</b>	361,53	2.068,27	2.060,97
<b>200,00</b>	216,54	1.878,36	1.867,17
<b>300,00</b>	126,25	1.690,94	1.675,61
<b>400,00</b>	74,11	1.509,73	1.489,88
<b>Subsistema N/NE/MM</b>			
<b>Custos de Transação (US\$ mil)</b>	<b>OM Médio</b>	<b>OM Simples Ajustado</b>	<b>OM DDA</b>
<b>100,00</b>	756,13	1.601,01	2.180,22
<b>200,00</b>	571,65	1.408,65	1.985,31
<b>300,00</b>	416,31	1.222,57	1.791,96
<b>400,00</b>	297,41	1.049,11	1.603,33

Conforme o esperado, verifica-se que um aumento nos custos de transação diminui o valor da opção. Considerando o cenário mais pessimista para o desenvolvimento do projeto (S/SE/CO/AR – OM Médio), nota-se que mesmo para custos de transação elevados, a opção considerada continua tendo valor.

- **Processo Estocástico**

Conforme mencionado no início desta seção, considerou-se inicialmente que o preço da RCE seria modelado por um Movimento Geométrico Browniano. Entretanto, conforme observado na seção 5.4.2, tal processo estocástico não considera a possibilidade de que vibrações “anormais” venham a ocorrer na trajetória do preço do ativo objeto, o que pode levar a uma sub-avaliação do investimento considerado.

Sendo assim, foi considerado um cenário alternativo onde o preço da RCE segue o Movimento de Difusão com Saltos descrito na seção 5.4.2. Os parâmetros anteriormente utilizados para o MGB também foram empregados nesta análise. Além disso, foi considerado que o preço da RCE pode sofrer saltos de tamanho aleatório, tanto positivo quanto negativo, modelados por distribuições normais. Considerou-se a média e o desvio padrão destas distribuições respectivamente iguais a 30,00% e 15,00% do preço corrente da RCE. Adotou-se uma taxa média anual de ocorrência dos saltos ( $\lambda$ ) igual a 2, ou seja, assume-se que, em média, dois saltos de tamanho aleatório ocorrerão ao longo de um ano. A Tabela 7.13 descreve os resultados encontrados.

**Tabela 7.13 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Quando o Preço da RCE segue um MGB com Saltos (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
OM Médio	334,10	703,07
OM Simples Ajustado	2.001,36	1.538,51
OM DDA	1.989,11	2.105,65

Os resultados da Tabela 7.13 estão de acordo com o descrito na seção 7.2.3.2, ou seja, considerando a possibilidade de saltos aleatórios (positivos e negativos) no preço da RCE venham a ocorrer, nota-se que o valor real da opção é superior ao obtido quando o MGB puro é utilizado.

Os resultados apresentados nesta seção destacam o valor da opção de registrar uma Pequena Central Hidrelétrica, com 30 MW de capacidade instalada, no Comitê Executivo do MDL. Apesar desta opção ter valor, muitas vezes se apresentando *deep-in-the-money*, é interessante verificar qual o seu impacto na atratividade do projeto MDL como um todo.

Neste sentido utilizou-se o modelo ANAFIN para determinar a Taxa Interna de Retorno (TIR) do empreendimento sob as condições descritas na Tabela 6.2. A TIR encontrada foi de 15,55% ao ano. Em seguida o valor da opção foi adicionado ao fluxo de caixa do projeto, tendo como referência o seu valor em Janeiro de 2006, e novamente o modelo ANAFIN foi utilizado para determinar o impacto deste valor na TIR original do empreendimento. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 7.14.

**Tabela 7.14 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento PCH A (%a.a.)**

CENÁRIO	OM Médio				OM Simples Ajustado				Análise dos Dados de Despacho			
	S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM	
Caso Padrão	0,15%		0,35%		1,07%		0,81%		1,07%		1,14%	
Isenção de Impostos	0,34%		0,69%		2,00%		1,51%		2,00%		2,13%	
Custos de Transação (*)	0,03%		0,15%		0,80%		0,54%		0,78%		0,85%	
MGB com Jumps	0,16%		0,36%		1,07%		0,81%		1,07%		1,14%	
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	0,04% (SE)	0,64% (S)	0,75% (NE)	0,01% (N)	1,00% (SE)	1,58% (S)	1,26% (NE)	0,15% (N)	0,43% (SE)	3,10% (S)	1,60% (NE)	0,18% (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 400,00 mil  
 (\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

Os resultados da Tabela 7.14 mostram que a produção e a comercialização de RCEs pode aumentar a TIR anual do empreendimento **PCH A** em até 3,10 pontos percentuais, a depender das condições de desenvolvimento adotadas. Estes resultados também indicam que a isenção da carga tributária incidente sobre a receita com a venda de RCEs influencia de forma relevante a atratividade deste mercado, podendo representar ganhos de até 0,99 pontos percentuais acima do obtido no caso padrão (cenário OM DDA e N/NE/MM). Finalmente, também é importante destacar que a utilização do método **OM DDA** em acordo com as premissas adotadas para o caso padrão, ou seja, considerando a geração inflexível das usinas termelétricas e custo zero para a água no cálculo da linha de base, se mostrou o método mais vantajoso para o desenvolvimento do projeto no subsistema N/NE/MM, e igualmente atrativo ao método **OM Simples Ajustado** para o desenvolvimento do projeto no subsistema S/SE/CO/AR.

Na próxima seção o valor incremental do mercado de carbono será determinado considerando o desenvolvimento de uma Pequena Central Hidrelétrica classificada como um projeto de pequena escala no âmbito do MDL, ou seja, com capacidade instalada inferior a 15MW.

### 7.3.2

#### Resultados – Pequena Central Hidrelétrica B (PCH B)

Nesta seção a opção embutida no empreendimento **PCH B** será inicialmente avaliada considerando as mesmas premissas do caso padrão descrito na Tabela 6.2. Note que, por se tratar de um projeto de pequena escala, a metodologia AMS-I.D será utilizada para determinar a sua linha de base. Novamente, todas as

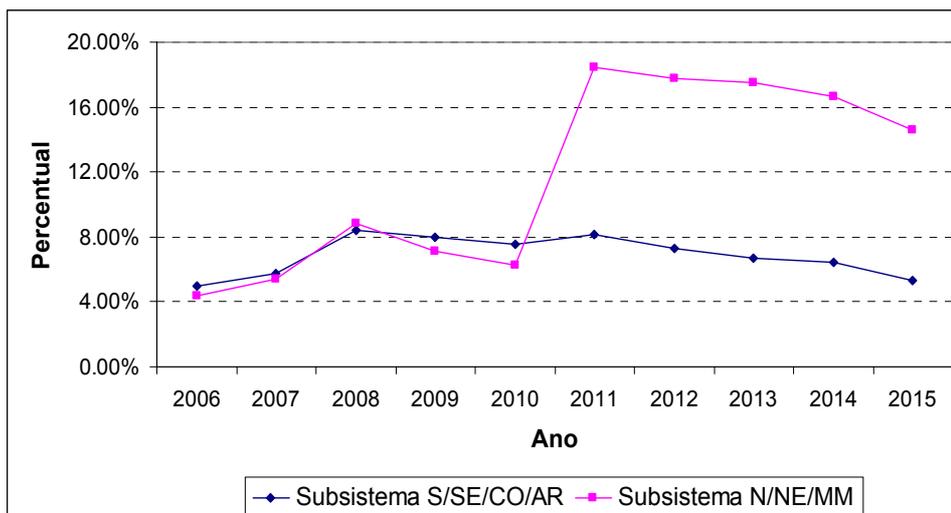
alternativas de cálculo também serão exploradas. A Tabela 7.15 apresenta os resultados encontrados.

**Tabela 7.15 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
<b>OM Médio</b>	0,24	2,38
<b>OM Simples Ajustado</b>	50,90	26,96
<b>OM DDA</b>	44,69	49,90
<b>OM Aproximado</b>	122,94	67,28
<b>Média Ponderada</b>	0,06	0,07

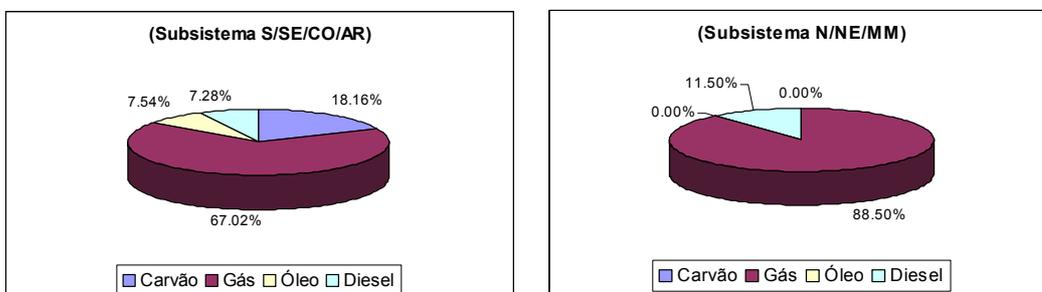
Os resultados da Tabela 7.15 indicam que o valor da opção é maximizado quando o empreendimento é desenvolvido no subsistema S/SE/CO/AR, sendo a sua linha de base determinada pelo método **OM Aproximado**. De acordo com o descrito no Capítulo 4, note que neste método apenas a geração termelétrica com base em combustíveis fósseis é considerada no cálculo do Fator de Emissão da Margem Operacional. Esta premissa faz com que o método **OM Aproximado** seja o mais vantajoso dentre as possibilidades analisadas, pois, em todos os outros casos, existe a possibilidade de que a água seja considerada uma das fontes marginais na operação do sistema.

Cabe observar que mesmo a utilização do método **OM DDA** não exclui a água da margem operacional dos subsistemas S/SE/CO/AR e N/NE/MM, pois, em determinados momentos ao longo do horizonte de estudo, a suas respectivas gerações representam menos de 10% da geração total do subsistema (vide Figura 7.22).



**Figura 7.22 – Relação entre a Geração Produtora de RCEs e a Geração Total do Subsistema Elétrico (Alternativa 1 de Configuração do SIN)**

Também é importante observar que, uma vez que a água não pode ser considerada uma fonte marginal no sistema, a utilização do método **OM Aproximado** torna o subsistema Sudeste mais vantajoso para o desenvolvimento do projeto MDL. Conforme ilustrado na Figura 7.23, isso ocorre devido à configuração do parque térmico desta região.



**Figura 7.23 – Distribuição da Capacidade Térmica Média Instalada por Tipo de Combustível Utilizado (2006-2015)**

A partir do ilustrado nesta figura, nota-se que o parque térmico do subsistema N/NE/MM pode ser considerado “mais limpo” quando comparado ao parque térmico do subsistema S/SE/CO/AR, onde 18.16% de sua capacidade instalada utilizam o carvão como combustível na geração de energia elétrica<sup>47</sup>.

<sup>47</sup> O carvão é considerado o combustível fóssil mais poluente (1,126 tCO<sub>2</sub>e/MWh) para a atividade de geração de energia elétrica, seguido pelo óleo combustível (0,877 tCO<sub>2</sub>e/MWh), pelo óleo diesel (0,844 tCO<sub>2</sub>e/MWh) e pelo gás natural (0,455 tCO<sub>2</sub>e/MWh) [7].

Além da condição mais favorável para o seu desenvolvimento, também é interessante destacar a situação em que a opção é menos valiosa para o projeto, ou seja, quando a sua linha de base é determinada pelo método da **Média Ponderada**. Cabe ressaltar que tanto este método quanto o método **OM Médio** utilizam a mesma metodologia para o cálculo do Fator de Emissão da Margem Operacional do SIN, entretanto, no último caso, a linha de base também é influenciada pela Margem Construtiva do sistema, tornando-o menos conservador do que o método da **Média Ponderada**.

Seguindo a mesma lógica desenvolvida na seção anterior, as mesmas análises de cenário e de sensibilidade são desenvolvidas sobre os parâmetros do estudo de caso original. Tais análises são apresentadas a seguir:

- **Configuração do Sistema Interligado Nacional**

Considerando o Sistema Interligado Nacional dividido em quatro grandes subsistemas elétricos, os seguintes resultados foram encontrados para o caso padrão:

**Tabela 7.16 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B Quando a Alternativa 2 de Configuração do SIN é Utilizada (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL			
	Sudeste	Sul	Nordeste	Norte
<b>OM Médio</b>	0,03	14,37	20,06	0,00
<b>OM Simples Ajustado</b>	41,13	101,28	64,68	0,70
<b>OM DDA</b>	0,70	281,27	98,36	0,50
<b>OM Aproximado</b>	49,99	230,81	103,81	3,59
<b>Média Ponderada</b>	0,00	9,98	1,51	0,00

Assim como na seção 7.3.1, os resultados da Tabela 7.16 mostram que a opção é menos valiosa quando, por hipótese, o projeto é desenvolvido no subsistema Norte. Analogamente, o valor da opção foi maximizado quando se considerou o desenvolvimento do projeto nos subsistemas Sul ou Nordeste, dependendo da forma como a linha de base é calculada.

Comparando estes resultados com os apresentados na Tabela 7.15 nota-se que, à exceção do subsistema Sul, o método **OM Aproximado** novamente se mostrou o mais vantajoso para o cálculo da linha de base do projeto. A grande participação termelétrica no atendimento do mercado da região Sul (superior a

10%, conforme ilustrado na Figura 7.20) possibilita que, por momentos, a geração a gás natural seja excluída da linha de base quando o método **OM DDA** é empregado<sup>48</sup>. Por este motivo, tal método pode ser considerado o mais vantajoso quando o projeto é desenvolvido no subsistema Sul do SIN.

- **Impostos**

Analisando o cenário de isenção de impostos descrito na seção 7.3.1, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.17 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B  
Considerando o Cenário de Isenção de Impostos (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
<b>OM Médio</b>	2,07	14,44
<b>OM Simples Ajustado</b>	151,24	91,56
<b>OM DDA</b>	135,28	148,03
<b>OM Aproximado</b>	297,23	187,39
<b>Média Ponderada</b>	0,64	0,81

Novamente, observa-se que a diminuição da carga tributária eleva o valor da opção, entretanto, cabe ressaltar que a isenção de impostos não foi suficiente para tornar a opção *in-the-money* quando os métodos mais conservadores (OM Médio e Média Ponderada) são utilizados para determinar a linha de base do projeto. Nos demais casos observa-se que o valor absoluto da opção foi elevado em, no mínimo, R\$ 64,60 mil.

- **Custos de Transação**

Conforme citado na seção 2.6 deste trabalho, uma vez que os projetos de pequena escala não possuem capacidade de evitar grandes quantidades de emissões de GEE, tornando-os menos atrativos economicamente, procedimentos simplificados para o ciclo desses projetos foram estabelecidos com o objetivo de reduzir os seus custos de transação. Considerando que os custos finais de

---

<sup>48</sup> Além do Gás Natural ser o combustível fóssil com menor fator de emissão, é importante observar que este combustível representa a fonte térmica mais barata no subsistema Sul (em média R\$ 84,29/MWh, contra R\$143,52/MWh do Carvão e R\$ 796,43/MWh do Óleo Combustível [28]).

transação do empreendimento **PCH B** possam variar entre US\$50,00 e US\$200,00 mil, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.18 – Valor da Opção em Função dos Custos de Transação do Empreendimento PCH B (R\$ mil)**

Subsistema S/SE/CO/AR					
Custos de Transação (US\$ mil)	OM Médio	OM Simples Ajustado	OM DDA	OM Aproximado	Média Ponderada
<b>50,00</b>	1,37	93,17	83,45	181,22	0,43
<b>100,00</b>	0,13	40,52	35,40	105,81	0,03
<b>150,00</b>	0,02	17,69	15,28	60,30	0,01
<b>200,00</b>	0,00	8,10	6,94	34,53	0,00
Subsistema N/NE/MM					
Custos de Transação (US\$ mil)	OM Médio	OM Simples Ajustado	OM DDA	OM Aproximado	Média Ponderada
<b>50,00</b>	9,27	56,76	91,20	115,07	0,54
<b>100,00</b>	1,48	20,60	39,78	54,85	0,04
<b>150,00</b>	0,31	8,15	17,44	25,85	0,00
<b>200,00</b>	0,08	3,53	7,99	12,56	0,00

Conforme o esperado, verifica-se que um aumento nos custos de transação diminui o valor da opção. Considerando que o ciclo do projeto tenha um custo igual ou superior a US\$ 150,00 mil, nota-se que em alguns casos a opção deixa de ter valor, ou seja, independente da incerteza relacionada ao preço da RCE, sob nenhuma condição hidrológica futura a sua comercialização valerá a pena para o investidor. Cabe ressaltar que estes resultados corroboram com a importância atribuída aos custos de transação no que tange a viabilidade financeira dos projetos de pequena escala.

- **Processo Estocástico**

Considerando que o preço da RCE segue um Movimento de Difusão com Saltos com os mesmos parâmetros definidos na seção 7.3.1, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.19 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B**  
**Quando o Preço da RCE segue um MGB com Saltos (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
OM Médio	2,31	9,78
OM Simples Ajustado	72,65	44,88
OM DDA	66,59	73,09
OM Aproximado	146,94	91,01
Média Ponderada	1,00	1,32

Assim como os resultados obtidos na seção anterior, nota-se que a possibilidade de saltos aleatórios (positivos e negativos) no preço da RCE faz com que o valor da opção se torne superior ao obtido quando o MGB puro é utilizado.

Os resultados desta seção destacam o valor da opção de registrar uma Pequena Central Hidrelétrica, com 2,40 MW de capacidade instalada, no Comitê Executivo do MDL. Uma vez que este projeto é caracterizado como um projeto de pequena escala, nota-se que o valor incremental do mercado de carbono é inferior ao obtido por projetos de mesma natureza, porém de maior escala. Tal como na seção anterior, nesta seção o modelo ANAFIN também é utilizado para determinar o impacto deste mercado na Taxa Interna de Retorno anual do empreendimento PCH B, originalmente igual a 16,10%. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 7.20 a seguir:

**Tabela 7.20 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento PCH B (%a.a.)**

CENÁRIO	OM Médio		OM Simples Ajustado		Análise dos Dados de Despacho		OM Aproximado		Média Ponderada			
	S/SE/CO/A	N/NE/MM	S/SE/CO/A	N/NE/MM	S/SE/CO/A	N/NE/MM	S/SE/CO/A	N/NE/MM	S/SE/CO/A	N/NE/MM		
Caso Padrão	0.00%	0.00%	0.31%	0.18%	0.31%	0.31%	0.77%	0.34%	0.00%	0.00%		
Isenção de Impostos	0.00%	0.06%	0.98%	0.57%	0.91%	0.98%	2.09%	1.26%	0.00%	0.00%		
Custos de Transação(*)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.25%	0.06%	0.00%	0.00%		
MGB com Jumps	0.00%	0.00%	0.44%	0.31%	0.44%	0.44%	0.98%	0.57%	0.00%	0.00%		
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	0.00% (SE)	0.06% (S)	0.10% (NE)	0.00% (N)	0.25% (SE)	0.64% (S)	0.34% (NE)	0.00% (N)	0.00% (SE)	0.06% (S)	0.10% (NE)	0.00% (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 200,00 mil

(\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.20 a produção e a comercialização de RCEs pode aumentar a TIR anual do empreendimento **PCH B** em até 2,09 pontos percentuais, a depender do cenário considerado. Ao contrário

do observado para o projeto **PCH A**, nota-se que a utilização do método **OM Médio** praticamente elimina qualquer influência positiva do mercado de carbono sobre a rentabilidade do projeto. O mesmo acontece quando o método da **Média Ponderada** é utilizado. Finalmente, considerando os resultados do cenário padrão, também é importante destacar que a utilização do método **OM Aproximado** se mostrou a opção mais vantajosa para a determinação da linha de base do projeto.

Nas próximas seções o valor incremental do mercado de carbono será determinado considerando o desenvolvimento de projetos típicos de geração eólica.

### 7.3.3 Resultados – Eólica A

Nesta seção a opção embutida no empreendimento **EÓLICA A** é avaliada considerando as mesmas premissas do caso padrão descrito nas seções anteriores, ou seja, que o preço da RCE segue um MGB e que o Sistema Interligado Nacional é dividido em dois grandes subsistemas elétricos. Novamente, por se tratar de um projeto de grande escala, a metodologia ACM0002 é utilizada para determinar a sua linha de base. A partir dos parâmetros descritos na Tabela 6.1, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.21 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA A no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)**

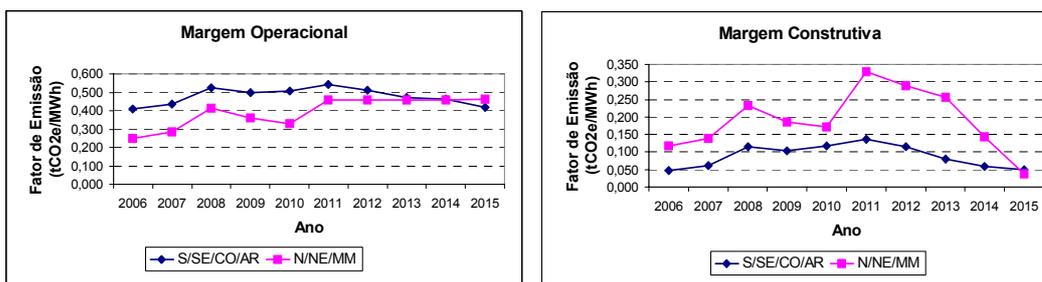
Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
<b>OM Médio</b>	762,97	1.236,30
<b>OM Simples Ajustado</b>	6.395,96	4.123,80
<b>OM DDA</b>	5.956,08	5.432,82

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.21 o valor da opção é maximizado quando o projeto é desenvolvido no subsistema S/SE/CO/AR e a sua linha de base determinada pelo método **OM Simples Ajustado**. Além disso, ao contrário do observado na seção 7.3.1 (empreendimento PCH A), nota-se que o desenvolvimento do projeto no subsistema S/SE/CO/AR se torna preferível ao seu desenvolvimento no subsistema N/NE/MM quando o método **OM DDA** é utilizado. Esta inversão nos resultados pode ser entendida analisando-se os

parâmetros empregados no cálculo da linha de base deste empreendimento, o qual é realizado através da seguinte equação (vide Capítulo 4):

$$EF_y = w_{OM} \cdot EF_{OM,y} + w_{BM} \cdot EF_{BM,y}$$

Conforme o descrito anteriormente na seção 4.2, devido à natureza intermitente e não despachável da geração eólica, a linha de base destes empreendimentos deve ser predominantemente influenciada pela Margem Operacional do subsistema hospedeiro, ou seja, considerando  $w_{OM} > w_{BM}$ . Observando o ilustrado na Figura 7.24, nota-se que o Fator de Emissão da Margem Operacional no subsistema S/SE/CO/AR é superior ao mesmo fator de emissão do subsistema N/NE/MM, sendo o inverso observado quando o Fator de Emissão da Margem Construtiva é analisado. Desta forma, ao considerar a linha de base predominantemente influenciada pela Margem Operacional do subsistema, aumenta-se a vantagem comparativa do S/SE/CO/AR em relação ao N/NE/MM. Esta análise justifica o comportamento descrito anteriormente.



**Figura 7.24 – Comparação entre as Margens Operacional e Construtiva em cada Subsistema Elétrico do SIN**

Seguindo a mesma lógica das seções anteriores, a seguir serão apresentadas algumas análises de cenário sobre os parâmetros originais deste estudo de caso, entretanto, uma vez que nestas análises o valor da opção se comporta de forma similar ao observado nas seções 7.3.1 e 7.3.2, os resultados encontrados são apresentados de forma condensada através das Tabelas 7.22 e 7.23 seguir:

**Tabela 7.22 – Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA A Considerando Diferentes Cenários para o seu Desenvolvimento (R\$ mil)**

CENÁRIO	OM Médio		OM Simples Ajustado		Análise dos Dados de Despacho							
	S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM	
Caso Padrão	762,97		1.236,30		6.395,96		4.123,80		5.956,08		5.432,82	
Isonção de Impostos	1.456,65		2.251,28		10.869,16		7.078,37		10.139,34		9.262,33	
Custos de Transação (*)	351,24		741,29		5.865,47		3.582,46		5.413,40		4.897,46	
MGB com Jumps	777,31		1.241,27		6.399,54		4.127,31		5.955,33		5.424,77	
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	318,15 (SE)	2.422,97 (S)	2.210,19 (NE)	61,29 (N)	6.175,90 (SE)	7.824,06 (S)	5.167,80 (NE)	1.178,31 (N)	3.016,13 (SE)	14.183,94 (S)	6.609,78 (NE)	1.395,44 (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 400,00 mil

(\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

**Tabela 7.23 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento EÓLICA A (%a.a.)**

CENÁRIO	OM Médio		OM Simples Ajustado		Análise dos Dados de Despacho							
	S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM		S/SE/CO/AR		N/NE/MM	
Caso Padrão	0,05%		0,09%		0,47%		0,30%		0,44%		0,40%	
Isonção de Impostos	0,10%		0,16%		0,82%		0,52%		0,76%		0,69%	
Custos de Transação (*)	0,02%		0,05%		0,43%		0,26%		0,39%		0,36%	
MGB com Jumps	0,05%		0,09%		0,47%		0,30%		0,44%		0,40%	
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	0,02% (SE)	0,17% (S)	0,16% (NE)	0,00% (N)	0,45% (SE)	0,58% (S)	0,38% (NE)	0,08% (N)	0,22% (SE)	1,10% (S)	0,49% (NE)	0,10% (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 400,00 mil

(\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.22 o valor da opção é maximizado quando o projeto é desenvolvido no subsistema Sul do SIN (Alternativa 2), sendo a sua linha de base determinada pelo método **OM DDA**. Neste caso, nota-se que o mercado de carbono é avaliado em 14,18 milhões de reais. Além disso, também é importante ressaltar que a utilização do método **OM DDA** se mostrou preferível quando o projeto é desenvolvido no subsistema N/NE/MM (Alternativa 1 de Configuração do SIN). Por outro lado, uma vez que o projeto é localizado no subsistema S/SE/CO/AR, a melhor alternativa de linha de base passa a depender do cenário analisado. Cabe ressaltar que os métodos **OM DDA** e **OM Simples Ajustado** são sempre preferíveis ao método **OM Médio**.

Finalmente, analisando os resultados da Tabela 7.23, nota-se que a contribuição do mercado de carbono na TIR original do empreendimento (8,24%) é de até 1,10 pontos percentuais. Apesar do valor absoluto da opção de registrar o empreendimento **EÓLICA A** ser superior ao obtido nas análises do empreendimento **PCH A**, o mesmo não é observado quando o impacto na rentabilidade desses empreendimentos é avaliado. Entende-se que este resultado é

devido ao baixo fator de capacidade geralmente associado aos empreendimentos eólicos no Brasil.

#### 7.3.4

#### Resultados – Eólica B

Nesta seção a opção embutida no empreendimento **Eólica B** é avaliada considerando as mesmas premissas do caso padrão descrito nas seções anteriores deste capítulo. Por se tratar de um projeto de pequena escala, a metodologia AMS-I.D é utilizada para determinar a linha de base do projeto MDL. A partir dos parâmetros descritos na Tabela 6.2, os seguintes resultados foram encontrados:

**Tabela 7.24 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA B no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)**

Metodologia de Cálculo do Fator de Emissão	Subsistema Hospedeiro do Projeto MDL	
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM
<b>OM Médio</b>	0,09	0,46
<b>OM Simples Ajustado</b>	96,14	33,67
<b>OM DDA</b>	82,28	67,06
<b>OM Aproximado</b>	214,46	95,29
<b>Média Ponderada</b>	0,05	0,05

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.24 o valor da opção é maximizado, em ambos os subsistemas, quando o método **OM Aproximado** é utilizado no cálculo da sua linha de base. Além disso, conforme anteriormente observado na seção 7.3.2, a utilização dos métodos **OM Médio** e da **Média Ponderada** torna praticamente inviável o exercício da opção de registrar um projeto de pequena escala.

Analisando os resultados das Tabela 7.25 e Tabela 7.26, nota-se que o benefício adicional da produção e comercialização de RCEs pode representar um aumento de até 1,38 pontos percentuais na TIR original do empreendimento (14,08%), a depender do cenário considerado. Finalmente, cabe ressaltar que apenas quando o projeto é desenvolvido no subsistema Sul (Alternativa 2), e o método **OM DDA** é utilizado para determinar a sua linha de base, o método **OM Aproximado** não pode ser considerado o mais vantajoso para o projeto MDL. Conforme mencionado anteriormente, isso ocorre devido à alta inflexibilidade

observada no subsistema Sul e à exclusão de parte da geração a gás natural quando o método OM DDA é utilizado nesta região.

**Tabela 7.25 – Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA B Considerando Diferentes Cenários para o seu Desenvolvimento (R\$ mil)**

CENÁRIO	OM Médio		OM Simples Ajustado		Análise dos Dados de Despacho		OM Aproximado		Média Ponderada											
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM										
Caso Padrão	0.09	0.46	96.14	33.67	82.28	67.06	214.46	95.29	0.05	0.05										
Iseção de Impostos	0.94	3.78	251.50	110.41	217.72	184.76	474.28	250.70	0.50	0.63										
Custos de Transação(*)	0.00	0.01	21.53	5.20	17.98	13.09	82.55	22.00	0.00	0.00										
MGB com Jumps	1.33	3.79	117.90	51.72	105.67	91.35	234.94	119.03	0.84	1.11										
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	0.01 (SE)	9.95 (S)	6.16 (NE)	0.00 (N)	88.22 (SE)	146.94 (S)	60.57 (NE)	1.92 (N)	15.54 (SE)	426.69 (S)	105.62 (NE)	1.40 (N)	103.35 (SE)	353.10 (S)	114.03 (NE)	10.65 (N)	0.00 (SE)	8.28 (S)	1.19 (NE)	0.00 (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 200,00 mil  
 (\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

**Tabela 7.26 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento EÓLICA B (%a.a.)**

CENÁRIO	OM Médio		OM Simples Ajustado		Análise dos Dados de Despacho		OM Aproximado		Média Ponderada											
	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM	S/SE/CO/AR	N/NE/MM										
Caso Padrão	0.00%	0.00%	0.28%	0.09%	0.22%	0.19%	0.59%	0.28%	0.00%	0.00%										
Iseção de Impostos	0.00%	0.00%	0.71%	0.31%	0.62%	0.53%	1.38%	0.71%	0.00%	0.00%										
Custos de Transação(*)	0.00%	0.00%	0.06%	0.00%	0.06%	0.04%	0.22%	0.06%	0.00%	0.00%										
MGB com Jumps	0.00%	0.00%	0.33%	0.14%	0.31%	0.25%	0.68%	0.33%	0.00%	0.00%										
Alternativa 2 de Configuração do SIN (**)	0.00% (SE)	0.00% (S)	0.00% (NE)	0.00% (N)	0.25% (SE)	0.42% (S)	0.17% (NE)	0.00% (N)	0.06% (SE)	1.25% (S)	0.31% (NE)	0.00% (N)	0.28% (SE)	1.01% (S)	0.31% (NE)	0.00% (N)	0.00% (SE)	0.00% (S)	0.00% (NE)	0.00% (N)

(\*) Cenário referente à custos de transação iguais a US\$ 200,00 mil  
 (\*\*) Sudeste (SE), Sul (S), Nordeste (NE), Norte (N)

Finalmente, cabe ressaltar que as análises realizadas neste capítulo tiveram por objetivo principal descrever a metodologia desenvolvida nesta tese, demonstrar a sua robustez frente à avaliação de opções com as características descritas nos estudos de caso, e aplicar a metodologia desenvolvida no sentido de estimar o valor incremental do mercado de carbono para projetos típicos de geração de energia renovável desenvolvidos no âmbito do setor elétrico brasileiro. No próximo capítulo serão descritas as principais conclusões deste trabalho bem como algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros.