

7

RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho, e é dividido em duas partes. A primeira mostra os resultados computacionais, incluindo a comparação entre as performances dos três modelos desenvolvidos: Equivalente Determinístico, decomposição de Benders e decomposição de Benders Multicut. A segunda parte, e mais importante, apresenta os resultados dos estudos de casos realizados, que tiveram por finalidade estudar a atuação dos agentes no mercado Elbas sob diferentes pontos de vista, do próprio gerador e do regulador.

7.1

Resultados Computacionais

O modelo de programação estocástica descrito no capítulo 3 foi implementado no solver Xpress-MP [93], considerando 60 cenários de preços *spot* e 20 de preços Elbas (para cada cenário de preço *spot*), o que corresponde a um total de 1200 (60×20) cenários.

O número de cenários de preços *spot* e Elbas foi empiricamente ajustado de maneira a usar o maior número total de cenários possíveis até que os resultados da função objetivo mostrassem uma variabilidade significativamente pequena quando se aumentava o número de cenários, e esse procedimento foi testado em diversas condições iniciais e perfis de risco diferentes.

O modelo tem um total de 611702 variáveis e 1245276 restrições, o que o caracteriza como um grande porte, que pelas limitações técnicas de memória do computador utilizado¹⁶, só pôde ser resolvido com o auxílio da implementação do algoritmo de decomposição de Benders Multicut, em que o problema decorrente de cada cenário é resolvido individualmente.

A tabela abaixo mostra os tempos computacionais obtidos na execução de cada modelo, com diferentes números de cenários. A letra “X” significa que, por falta de memória do computador, o problema não pôde ser resolvido.

¹⁶ Pentium 2 T5200 1.60GHz 2.00 GB RAM

Tabela 7.1 - Tempos computacionais obtidos na execução dos modelos (i) Equivalente determinístico; (ii) Decomposição de Benders e (iii) Decomposição de Benders Multicut

Num. De cenários	Equivalente Determinístico	Decomposição de Benders	Decomposição de Benders Multicut
40 <i>spot</i> 10 Elbas	87 s	1011 s	336 s
60 <i>spot</i> 10 Elbas	129 s	2563 s	773 s
60 <i>spot</i> 20 Elbas	X	X	1495 s

O Anexo B contém os dados técnicos das usinas hidrelétricas utilizados nos estudos de casos deste trabalho, dados estes que foram gentilmente fornecidos pela empresa Agder Energi.

7.2

Estudos de Casos

Esta seção tem por finalidade estudar a atuação dos agentes no mercado Elbas sob diferentes pontos de vista: do próprio gerador e do regulador. Para isso será utilizada a metodologia de análise e todos os resultados mencionados no capítulo anterior, sempre analisando casos de agentes com diferentes perfis de risco e em diferentes conjunturas de mercado. Para a análise foram utilizadas todas as combinações de:

- 5 diferentes níveis de aversão a risco.
- 3 diferentes valores da água nos reservatórios
- 2 diferentes níveis de volatilidade dos preços no mercado Elbas

Foram, portanto, $5 \times 3 \times 2 = 30$ rodadas, com mais $5 \times 3 = 15$ dos casos sem a presença do mercado Elbas, compondo um total de 45 execuções do modelo.

Os cinco níveis de aversão a risco (λ) testados foram $\{0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,99\}$. A escolha do 0,99, ao invés de 1, para o último caso, foi feita porque a decisão do modelo com $\lambda = 1$ se torna míope em relação aos cenários cujos resultados são melhores que os 5% piores casos, uma vez a função objetivo, neste caso, é maximizar apenas o CVaR da distribuição resultante.

Para simular o efeito dos três diferentes valores da água os volumes iniciais dos reservatórios foram mantidos constantes em todos os casos, e o valor da água em cada caso foi alterado diretamente através da curva do valor da água. Apesar de a modelagem permitir o uso de uma curva para representar do valor da água, neste trabalho considerou-se apenas um valor de água para cada um dos três reservatório, representando uma relação linear constante entre o volume armazenado e valor da água armazenada. Os três conjuntos de valores foram 9.80, 13.05 e 9.05 EUR/MWh (Holen12, Holen3 e Brokke, respectivamente), para simular valores próximos dos preços spot do mercado; 25.97, 34.58 e 23.98 EUR/MWh, para simular valores acima dos preços spot; e 39.20, 52.20 e 36.20 EUR/MWh, para simular valores abaixo dos preços spot.

Para simular dois casos com diferentes volatilidades nos preços do mercado Elbas foram considerados dois períodos distintos para a geração dos cenários dos preços, um com uma volatilidade maior e outro com uma volatilidade menor. O desvio padrão condicional médio das inovações do modelo ajustado (4.9), considerando todo o horizonte, foi de 0.12 EUR/MWh. Para o caso de maior volatilidade os cenários de preços foram gerados a partir da data 3 de dezembro de 2007 (final do horizonte), com desvio padrão condicional médio das inovações das últimas 24 horas de 0.09 EUR/MWh. Para o caso de menor volatilidade os cenários foram gerados a partir da data 15 de novembro de 2007, com um desvio padrão condicional médio das últimas 24 horas igual a 0.24 EUR/MWh.

A Figura 7.1 abaixo mostra resultados típicos das curvas de oferta para três diferentes horas. Neste exemplo, em todas as três horas o gerador estaria disposto a gerar sua capacidade máxima para qualquer preço acima de 29 EUR/MWh.

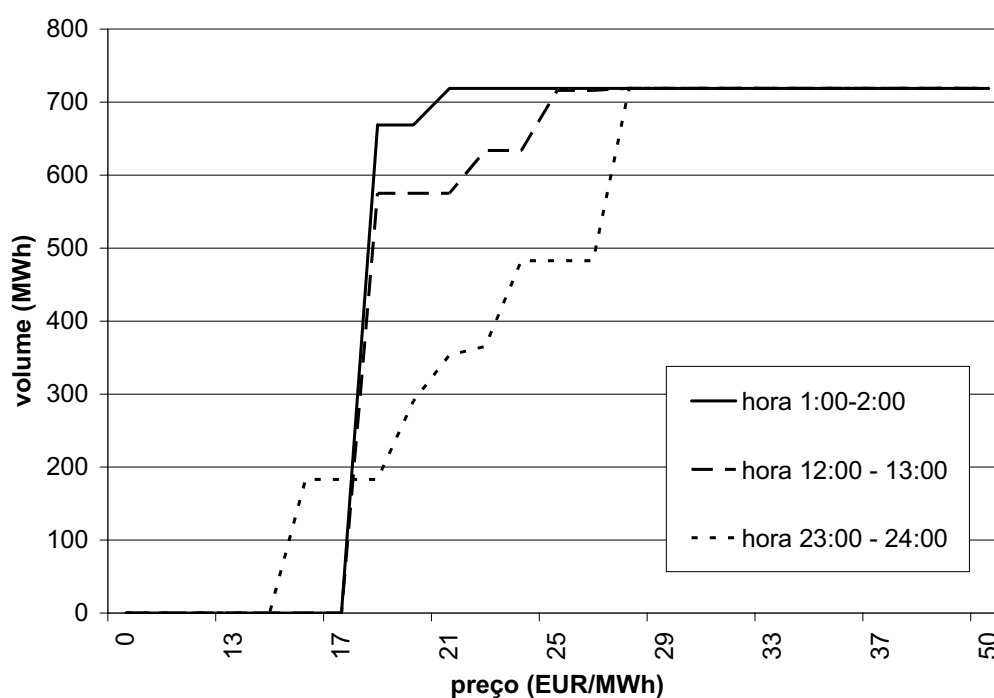


Figura 7.1 – Exemplo de três curvas de oferta para três diferentes horas

As Figuras 7.2 e 7.3 abaixo mostram dois exemplos de resultados de curvas de oferta, um cada um com duas estratégias diferentes, uma considerando e outro não considerando as compras e vendas no mercado Elbas. As linhas tracejadas são as curvas de oferta resultantes do modelo que considera o mercado Elbas, enquanto as curvas cheias são as do modelo sem o mercado Elbas. Nos casos em que se considera o mercado Elbas o gerador tem maior flexibilidade para alterar sua geração no futuro através de negociações no Elbas. Com isso, para um dado preço, o volume gerado resultante do modelo considerando o mercado Elbas é ocasionalmente menor que o do modelo sem o Elbas, indicando que no primeiro caso o agente decide guardar parte de sua energia para possíveis transações no mercado Elbas do dia seguinte.

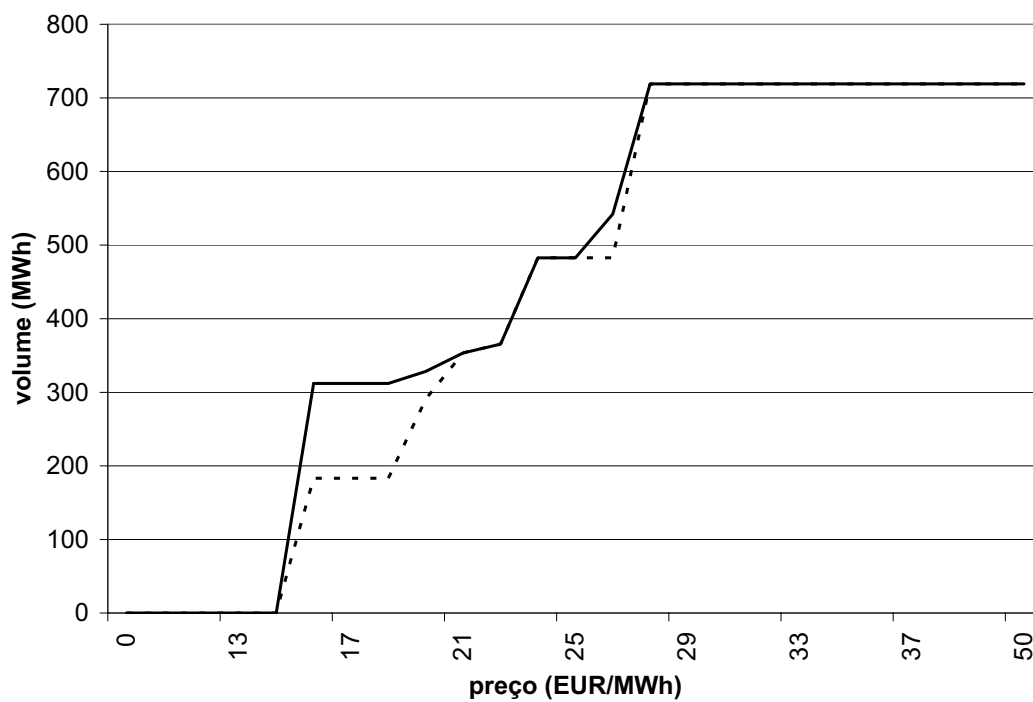


Figura 7.2 – Curvas de oferta considerando e não considerando o mercado Elbas – hora 23:00-24:00

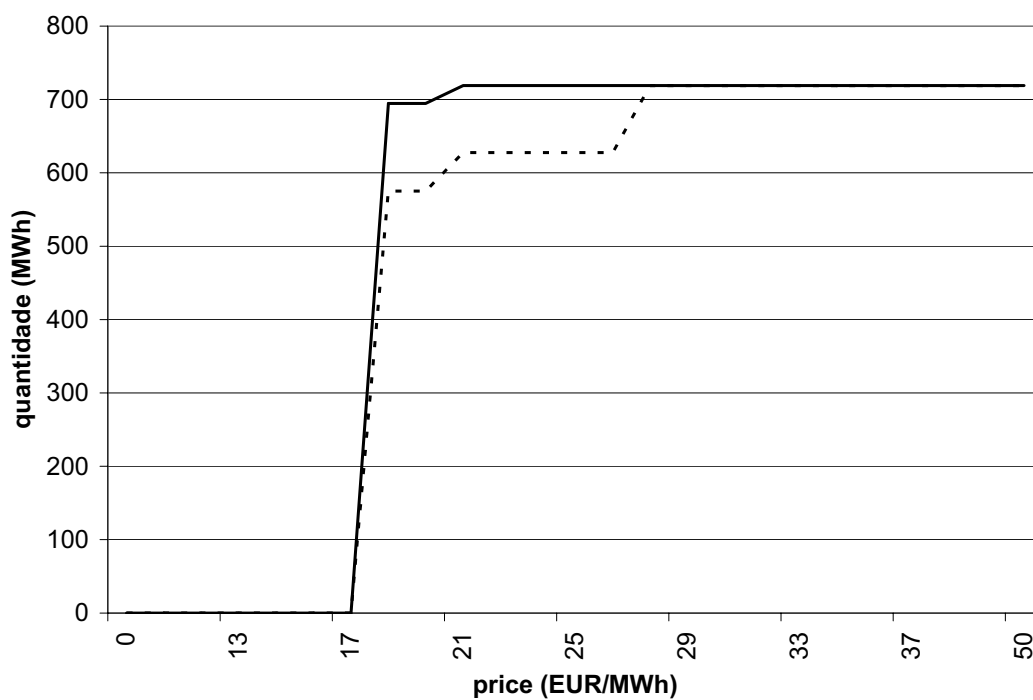


Figura 7.3 – Curvas de oferta considerando e não considerando o mercado Elbas – hora 12:00-13:00

7.2.1

Resultados parte 1: Ponto de vista dos Agentes Geradores

Sob a ótica dos geradores é feita uma análise do valor da função objetivo do modelo (Equivalente Certo) e da distribuição da sua renda líquida total. Para identificar o impacto do mercado Elbas na estratégia dos geradores o modelo desenvolvido foi executado considerando e não considerando as transações no Elbas, para então mensurar qual o benefício financeiro, sob a ótica dos agentes, de se poder transacionar energia no Elbas.

7.2.1.1

Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo)

A figura abaixo mostra 3 gráficos com os valores das funções objetivo para 3 diferentes valores da água, começando pelo menor (Valor da água 1) até o maior (Valor da Água 3). Cada gráfico contém 5 diferentes níveis de aversão a risco e 2 diferentes níveis de volatilidade nos preços Elbas.

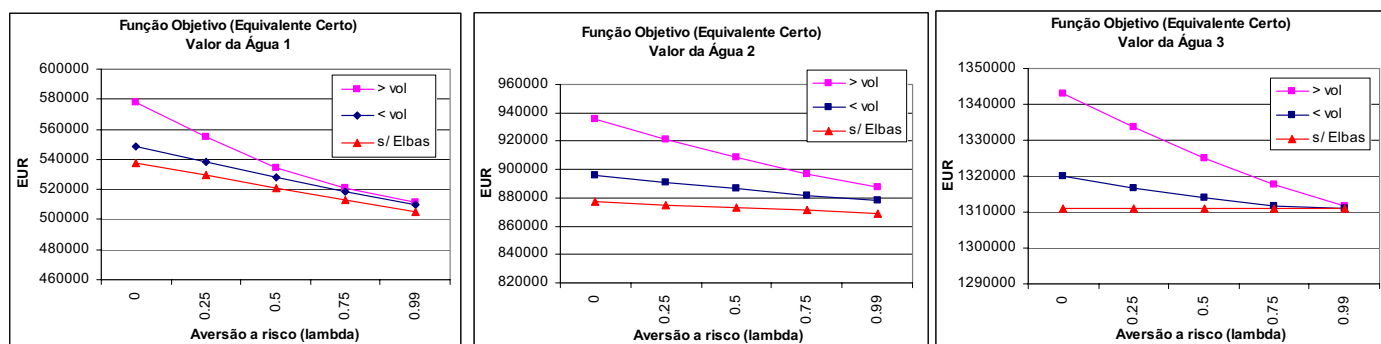


Figura 7.4 – Resultados: Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo)

Obviamente quanto mais avesso a risco é o agente, menor é o valor da função objetivo, ou seu Equivalente Certo. Porém, estes resultados mostram que independentemente do nível de volatilidade dos preços, quanto maior a aversão a risco, mais os valores das funções objetivos dos casos com volatilidade diferentes se aproximam, chegando a ter praticamente o mesmo valor para um cenário de valor da água alto. E isso ocorre até mesmo com o caso em que não se consideram

as transações no Elbas, ou seja, em que a estratégia do agente é toda moldada para sua atuação apenas no mercado *spot*.

7.2.1.2

Renda Líquida Total

Na figura abaixo são mostrados 6 gráficos com as médias das distribuições resultantes da renda líquida e o CVaR 5%, com 3 diferentes valores da água, começando pelo menor (Valor da água 1) até o maior (Valor da Água 3). O primeiro conjunto de 3 gráficos corresponde aos níveis de volatilidade baixa dos preços no Elbas e o segundo ao nível de volatilidade alta. Em ambos os casos são também apresentados os resultados para o caso sem considerar o mercado Elbas.

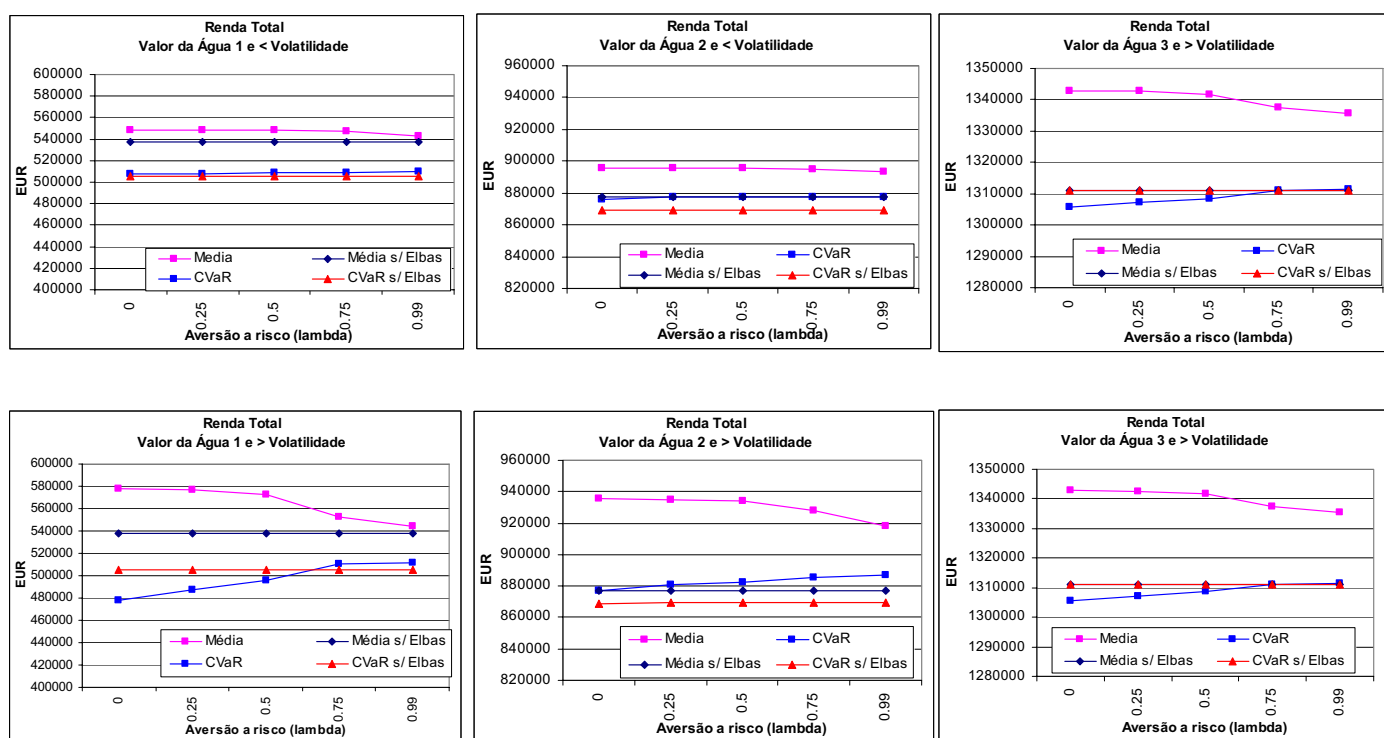


Figura 7.5 – Resultados: Renda Líquida Total

Estes resultados mostram que, sem considerar o Elbas, a média e o CVaR da renda líquida resultante não muda muito com relação ao nível de risco do agente. Já com a presença do Elbas há um efeito nestes valores quando se aumenta a aversão a risco, com o CVaR aumentando e o valor esperado diminuindo, com ambos chegando a valores mais próximos do caso sem o Elbas

independentemente do nível de aversão a risco. Este efeito é mais acentuado no caso com volatilidade mais alta.

7.2.1.3

Valor do Mercado Elbas

A figura abaixo mostra 6 gráficos com os valores do mercado Elbas para 3 diferentes valores da água, começando pelo menor (Valor da água 1) até o maior (Valor da Água 3). O primeiro conjunto de 3 gráficos corresponde ao valor do Elbas em termos financeiros e o segundo em termos percentuais. Cada gráfico contém 5 diferentes níveis de aversão a risco e 2 diferentes níveis de volatilidade nos preços Elbas.

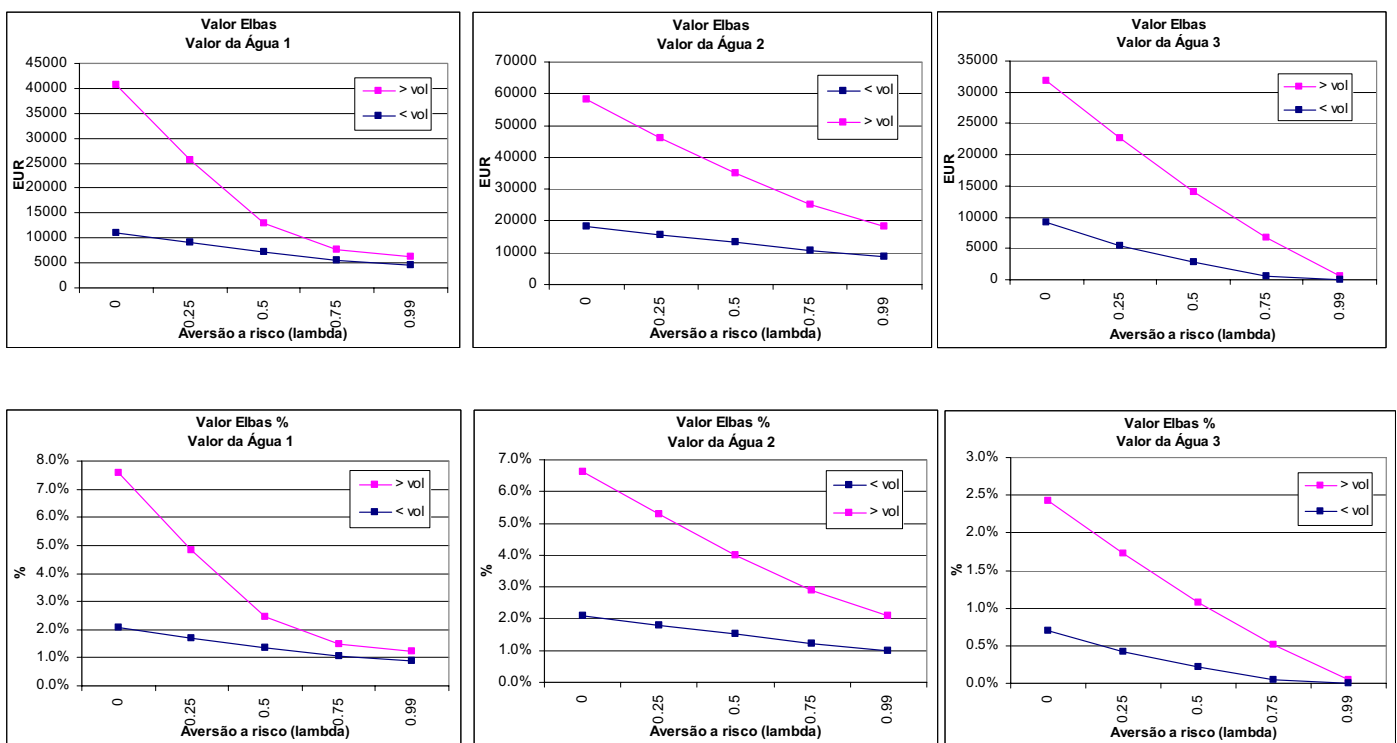


Figura 7.6 – Resultados: Valor do Mercado Elbas

Estes resultados mostram que quanto maior é o nível de aversão a risco do agente menor é o valor do mercado Elbas, e mais os resultados para diferentes níveis de volatilidade se assemelham. Esse resultado mostra que o valor de poder contar com o mercado Elbas para um agente avesso a risco é baixo.

Considerando os casos com alta volatilidade nos preços, para todos os valores da água testados o valor do Elbas é no máximo 7,5% de seu Equivalente Certo. Para o caso com baixa volatilidade esse valor é no máximo 2%, independentemente do nível de risco e do valor da água.

7.2.2

Resultados parte 2: Ponto de vista do Regulador

Sob a ótica do regulador o objetivo é investigar até que ponto atuar no mercado Elbas traz incentivos aos agentes em deixar de ofertar energia no mercado *spot* para tentar obter rendas maiores com transações no mercado Elbas. A função do mercado Elbas é permitir que os agentes façam ajustes em suas gerações e consumos que venham a ser necessários para tornarem seus planos de operação adequados a suas estratégias, e não servir como mais uma ferramenta de especulação e obtenção de lucros. Assim sendo, uma importante tarefa é analisar se o Elbas estaria cumprindo corretamente seu papel de mercado de ajuste, e não fazendo com que os agentes deixem de ofertar sua energia no mercado *spot* para especular com compras e vendas no mercado Elbas. Para isso são analisados os volumes de energia transacionados nos mercados *spot* e Elbas nas diversas situações de mercado e para agentes com diferentes perfis de risco.

7.2.2.1

Volume transacionado nos Mercados *Spot* e Elbas

A figura abaixo mostra 2 conjuntos de 3 gráficos com os volumes transacionados nos mercados *spot* e Elbas, respectivamente. Os gráficos contemplam 3 diferentes valores da água, começando pelo menor (Valor da água 1) até o maior (Valor da Água 3). Cada gráfico contém 5 diferentes níveis de aversão a risco e 2 diferentes níveis de volatilidade nos preços Elbas, além de os gráficos com os volumes transacionados no *spot* também conterem os casos sem considerar o mercado Elbas.

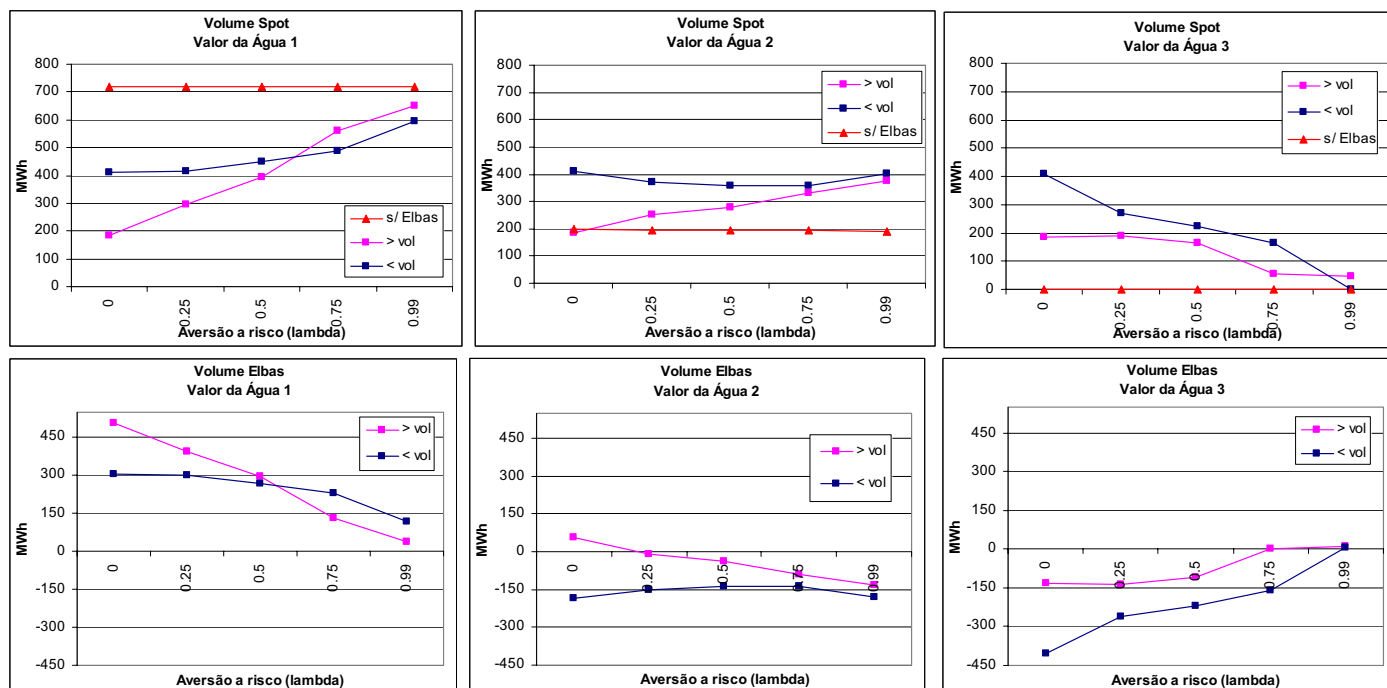


Figura 7.7 – Resultados: Volume transacionado nos Mercados Spot e Elbas

Estes resultados mostram que quanto maior é a aversão a risco do agente menor é o seu apetite para transacionar sua energia no Elbas. No caso com o maior valor da água a opção ótima sem considerar o Elbas é não gerar e armazenar toda a água no reservatório, vide os resultados do caso sem considerar o Elbas. Porém, o agente neutro a risco com a presença do Elbas opta por vender energia no mercado *spot* para comprá-la no Elbas, e assim aproveitar de possíveis diferenças de preços entre eles e obter mais lucro.

Nas 2 figuras mais à esquerda os gráficos das diferentes volatilidade se cruzam, mostrando que o agente avesso a risco opta por transacionar menos energia no Elbas em cenários mais voláteis, evitando com isso os piores cenários e fazendo com que o valor do CVaR resultante seja maior. Já o agente neutro a risco opta por transacionar mais energia no Elbas quando os preços estão mais voláteis, mostrando seu apetite por ganhos maiores independentemente do risco associado às suas decisões.

Um resultado interessante pode ser visto no caso do valor da água 2, em que o volume transacionado no Elbas é maior (em termos absolutos) para o caso do agente totalmente avesso a risco, o que mostra a utilidade do Elbas em mitigar o risco deste agente.

7.2.2.2

Curvas de Nível do Valor Esperado vs (Valor Esperado – CVaR)

As figuras abaixo apresentam 2 gráficos com as curvas de nível dos valores esperados e os respectivos (Valor Esperado – CVaR 5%), cada um para um nível de volatilidade nos preços do Elbas.

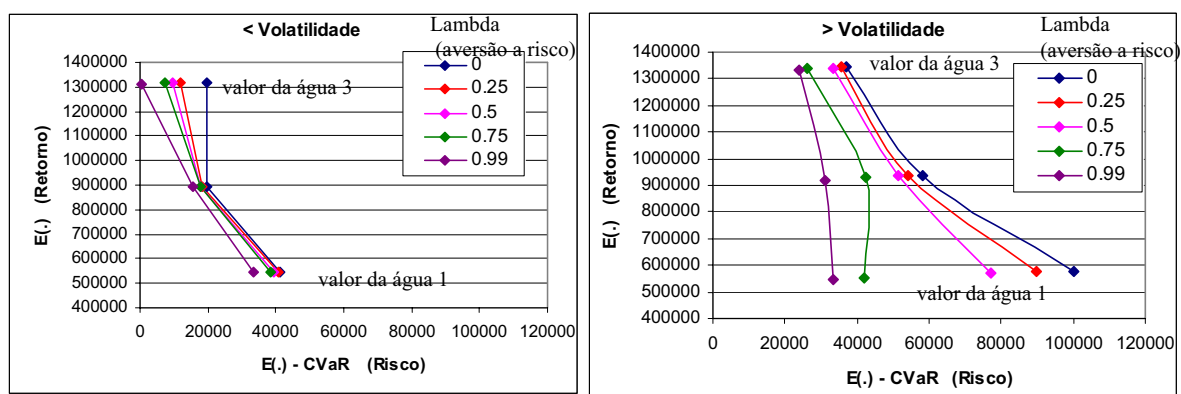


Figura 7.8 – Resultados: Curvas de Nível do Valor Esperado vs (Valor Esperado – CVaR)

Estes gráficos mostram que quando os preços são pouco voláteis os *riscos* dos diferentes níveis de aversão a risco são parecidos. Isso ocorre porque quando o valor da água é baixo, mais energia é transacionada no Elbas independentemente do perfil de risco dos agentes, mas a baixa volatilidade nos preços faz os *riscos* não serem muito diferentes. Já quando o valor da água é maior, dependendo do nível de aversão a risco, o agente usa menos (avesso) ou mais (neutro) água para transacionar no mercado Elbas, o que faz os *riscos* (Valor Esperado – CVaR 5%) serem mais dispersos.

Quando os preços são mais voláteis, o agente neutro a risco tem mais apetite para negociar no Elbas, permitindo-lhe obter uma renda líquida média maior. Isso faz com que a dispersão dos *riscos* entre os diferentes perfis de aversão a risco seja maior, principalmente com valores de água baixos, em que os agentes transacionam mais energia no Elbas.

Com valores de água baixos, significando períodos com mais abundância de água, o agente neutro a risco tem mais apetite para especular no Elbas, fazendo a dispersão dos *riscos* ser maior para os diferentes perfis de risco. Isso ocorre

porque o agente avesso a risco tem receio de não vender energia no *spot* e depois ter que vender mais barato no Elbas, lembrando que, neste caso, armazenar água não é financeiramente bom.

7.2.3.4

Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo)

Os resultados e análises apresentados na seção 7.2.1.1 são também válidos para a análise do efeito do mercado Elbas sob o ponto de vista do regulador, mostrando o baixo apetite do agente avesso a risco em especular no mercado Elbas.