

## 7 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

Esta tese teve por objetivo o desenvolvimento de modelos de otimização de portfólio de contratos de energia quando vistos pela ótica de uma empresa de geração. Tais modelos podem ser utilizados para auxiliar na determinação da estratégia de comercialização de energia que maximiza o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas da empresa geradora ao longo de todo o horizonte de estudo, dado um nível de risco por ela aceitável.

Durante o desenvolvimento do trabalho foi feito um levantamento das principais métricas utilizadas para mensurar o risco em modelos de otimização de portfólio desenvolvidos na área econômico-financeira. Ênfase foi dada a verificação da adequação de tais métricas para representação do risco.

O levantamento conduziu à proposição de três abordagens para otimização de portfólio de contratos de energia: na primeira abordagem é utilizada a variância da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora como medida de risco, na segunda abordagem a medida de risco utilizada é o mínimo de tal distribuição, e na terceira abordagem utiliza-se o Conditional Value-at-Risk (CVaR) da distribuição.

Foram realizados testes computacionais utilizando dados do sistema elétrico brasileiro.

Vale ressaltar que os modelos para otimização de portfólio de contratos de energia propostos nesta tese foram desenvolvidos imaginando-se que o setor elétrico brasileiro funcionaria segundo as diretrizes do processo de reestruturação iniciado em meados da década de 90. Entretanto, com a publicação em 15 de março de 2004 das Leis 10.847 e 10.848, que apresentam as linhas gerais de funcionamento do setor elétrico brasileiro segundo os moldes do novo processo de

reestruturação iniciado em 2003, há uma indicação de que os modelos para otimização de portfólio propostos nesta tese poderão ser utilizados pelos geradores que optarem por comercializar energia no Ambiente de Contratação Livre definido neste segundo processo de reestruturação.

As conclusões da tese, já apresentadas ao final de cada capítulo, são rerepresentadas a seguir:

- Apesar da aceitação e disseminação do modelo média-variância de Markowitz, a adoção da variância como medida de risco pode não ser adequada, pois na realidade ela se caracteriza como uma medida de desvio e não de risco, já que penaliza tanto desvios positivos quanto negativos em relação à média.
- Caso haja necessidade de se considerar aspectos que requeiram a introdução de variáveis inteiras na formulação do problema de otimização de portfólio, como por exemplo, a limitação do número de ativos a compor o portfólio, o modelo média variância de Markowitz passa a requerer a solução de um problema de programação inteira quadrática cuja solução é extremamente complexa, o que pode inviabilizar sua aplicação a problemas de grande porte.
- Têm-se verificado na prática que os portfólios ótimos obtidos via modelo média-variância de Markowitz são muito instáveis, isto é, pequenas variações nos dados de entrada podem resultar em portfólios completamente diferentes.
- O modelo MAD proposto por Konno e Yamazaki é um modelo de programação linear, cuja solução é mais rápida e eficiente do que a solução do modelo quadrático de Markowitz.
- Quando os retornos dos ativos seguem uma distribuição normal multivariada, os modelos MAD e média-variância são equivalentes.

- O modelo MAD não requer a estimação da matriz de covariâncias, e limita automaticamente o número de ativos no portfólio. Tal fato pode implicar em um menor custo de transação quando da revisão do portfólio.
- O desvio médio absoluto utilizado no modelo MAD é na verdade uma medida de desvio e não de risco, logo pode também não ser adequada para medir o risco de um portfólio.
- O modelo MiniMax proposto por Young é um modelo de programação linear, ou seja, de solução mais rápida e eficiente do que o modelo média-variância de Markowitz.
- No caso de a distribuição dos retornos ser assimétrica, o modelo MiniMax é mais apropriado do que o modelo média-variância de Markowitz.
- Os modelos MiniMax são extremamente conservadores, caracterizados por uma forte aversão aos piores resultados, o que faz com que sua solução possa ser afetada pela presença de valores espúrios no conjunto de dados.
- O VaR, quando se trabalha com distribuições discretas, é uma função extremamente difícil de ser otimizada, pois é não convexa, não diferenciável em alguns pontos, e que apresenta múltiplos extremos locais.
- A formulação de um problema de otimização de portfólio cuja medida de risco a ser minimizada é o VaR requer muitas variáveis binárias, e algoritmos eficientes para a solução de tal problema ainda não estão disponíveis.

- O VaR é uma medida de risco que não fornece nenhuma informação a respeito das perdas que o excede, as quais podem ser significativamente grandes. Sua minimização pode conduzir a um indesejável aumento destas perdas.
- O VaR não é considerado uma medida consistente de risco, pois não é subaditivo, isto é, a diversificação do portfólio pode resultar em um aumento do risco quando medido pelo VaR.
- O CVaR é uma medida de risco mais conservadora que o VaR, que quantifica os resultados piores que o VaR, além de ser uma medida consistente de risco.
- O CVaR pode ser eficientemente minimizado via técnicas de programação linear.
- O CVaR tem a propriedade de unicidade, pois é um valor ótimo. O VaR, por ser um minimizador, não apresenta tal propriedade.
- O CVaR é uma medida de risco altamente flexível. Quando o nível de confiança tende a um, o CVaR tende ao mínimo da distribuição (critério MiniMax, extremamente conservador). Quando o nível de confiança tende a zero, o CVaR tende ao valor esperado da distribuição (neutralidade ao risco).
- Na metodologia de programação dinâmica dual utilizada como método de solução de duas das três abordagens para otimização de portfólio de contratos de energia propostas nesta tese, o problema de segundo estágio associado a cada cenário, quando escrito via formulação dual, pode ser interpretado como uma função linear por partes.

- O algoritmo de programação dinâmica dual pode ser visto como uma decomposição de Benders onde os problemas de primeiro e segundo estágio são de programação linear.
- No método de programação dinâmica dual pode-se representar o valor esperado dos valores ótimos dos problemas de segundo estágio no problema de primeiro estágio de duas formas: através de uma função que forneça diretamente este valor esperado, ou através do somatório das funções valor ótimo dos problemas de segundo estágio associados a todos os cenários, ponderados pelas respectivas probabilidades. A primeira opção tem a vantagem de fazer com que a dimensão do problema de primeiro estágio não cresça tão rapidamente, entretanto a segunda opção é considerada mais eficiente, pois permite a obtenção do valor esperado através da combinação de hiperplanos definidos em iterações diferentes.
- Nesta tese considerou-se duas formas para o tratamento de inviabilidades nos problemas de segundo estágio: através de penalização na função objetivo e através de cortes de viabilidade. O tratamento via penalização na função objetivo não informa diretamente para o problema de primeiro estágio que a solução por ele escolhida conduz a inviabilidade do problema, e sim indica que tal solução causa uma enorme redução no valor da função objetivo a qual deseja-se maximizar. Já o tratamento via corte de viabilidade informa explicitamente para o problema de primeiro estágio que a solução por ele escolhida resulta na inviabilidade do problema, e a elimina da região viável do problema de primeiro estágio.
- Enquanto que as usinas térmicas possuem um custo explícito de operação, dado pelo custo do combustível utilizado, as usinas hidrelétricas possuem um custo implícito de operação, dado pelo custo de oportunidade de se economizar a água dos reservatórios no presente para seu uso futuro. Com isso, na tomada de decisão da operação de um

sistema hidrotérmico deve-se comparar o benefício imediato do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento.

- Devido ao não conhecimento das afluições futuras aos reservatórios, o problema de planejamento da operação energética de um sistema hidrotérmico se caracteriza como um problema de programação estocástica.
- O longo horizonte de planejamento da operação e a estocasticidade das afluições fazem com que o problema de planejamento da operação energética de um sistema hidrotérmico seja de grande porte e de difícil solução, sendo necessária sua subdivisão em etapas (longo prazo, médio prazo e curto prazo).
- O valor econômico da energia no modelo Tight Pool do Brasil, que é o adotado como premissa nesta tese, é calculado com base no custo marginal de operação, e reflete o acréscimo no valor esperado do custo de operação do sistema ao longo de todo o horizonte de planejamento da operação devido a um aumento marginal na demanda do sistema. O custo marginal de operação é dado pela variável dual associada à restrição de atendimento a demanda.
- A comercialização da energia gerada exclusivamente no mercado a vista faz com que a remuneração líquida da geradora seja nula quando ela não é despachada. Mesmo quando ela é despachada, sua remuneração líquida é muito incerta, pois depende do preço da energia no mercado a vista, que varia continuamente em função da demanda, volume armazenado nos reservatórios, afluições aos reservatórios etc.
- A incerteza com relação à remuneração da geradora pode ser reduzida através da comercialização de energia através de contratos bilaterais, pois estes garantem um fluxo determinístico de receita para a geradora.

- A estratégia de vender energia através de um único contrato bilateral de longo prazo pode não ser a mais eficiente para uma geradora, pois neste caso ela não se beneficia quando da ocorrência de períodos de preços no mercado a vista bastante altos. Além disso, seu prejuízo seria grande no caso de o único comprador da energia não honrar seus compromissos, não pagando pela energia consumida.
- Uma melhor estratégia está associada à venda da energia através de uma carteira diversificada de contratos, podendo até ser vantajoso para a geradora deixar uma parcela da capacidade de geração reservada para comercialização exclusivamente no mercado a vista.
- O problema de otimização de portfólio de contratos é acoplado no tempo, pois uma estratégia de comercialização de energia adotada hoje tem impacto sobre a remuneração futura da geradora. É também estocástico, pois os valores futuros dos preços da energia no mercado a vista e dos despachos de geração não são conhecidos a priori.
- A variância da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, utilizada como medida de risco na primeira abordagem proposta nesta tese, se caracteriza como uma medida de desvio e não de risco, pois leva em conta tanto os desvios negativos quanto os positivos em relação ao valor esperado. Logo, pode não ser adequada para mensurar o risco do portfólio de contratos de energia, pois uma medida de risco deve levar em conta apenas a possibilidade de realização de valores localizados na calda esquerda da distribuição, isto é, valores extremos menores que o valor esperado. De fato, os resultados numéricos obtidos nesta tese mostram que por ser uma medida de desvio, a variância não é uma medida adequada para medir o risco do portfólio de contratos de energia.

- O mínimo da distribuição e o CVaR se caracterizam como medidas de risco, pois só enxergam a calda esquerda da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora.
- A flexibilidade imposta pela representação de possibilidades futuras de contratação faz com que o número de variáveis e de restrições do problema de otimização de portfólio de contratos de energia aumente consideravelmente.
- Técnicas de decomposição para solução de problemas de programação estocástica desempenham papel importante, pois a representação de possibilidades futuras de contratação faz com que o problema de otimização de portfólio de contratos de energia seja um problema de programação estocástica de dois estágios.
- Na segunda abordagem proposta nesta tese exige-se que o valor presente de todos os cenários considerados na análise seja maior ou igual a um valor presente mínimo requerido pela geradora. Tal exigência pode ser muito rigorosa, pois os piores resultados podem estar associados a pouquíssimos cenários que sejam altamente improváveis.
- Geralmente no processo de tomada de decisão permite-se desprezar os piores cenários, desde que suas probabilidades de ocorrência sejam pequenas. Tal procedimento equivale a utilizar o VaR como medida de risco. Entretanto, o VaR não possui boas propriedades matemáticas, além de não ser uma medida consistente de risco. Logo, sua adoção como medida de risco no problema de otimização de portfólio de contratos de energia pode não ser recomendada.
- O mínimo da distribuição é uma medida de risco adequada para a mensuração do risco do portfólio de contratos de energia, entretanto tal medida é muito conservadora, só devendo ser utilizada por aqueles investidores extremamente avessos ao risco.

- O CVaR é uma medida de risco com excelentes propriedades matemáticas para o emprego em um problema de otimização, além de ser uma medida consistente de risco. Logo, é recomendada sua adoção como medida de risco no problema de otimização de portfólio de contratos de energia.
- O modelo de otimização de portfólio de contratos de energia com o mínimo da distribuição ou CVaR como medidas de risco se caracteriza como um modelo de programação linear, permitindo assim o tratamento de portfólios com inúmeros contratos candidatos e inúmeros cenários de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração.
- Nas três abordagens para otimização de portfólio de contratos de energia propostas nesta tese, o valor esperado aumenta com o risco, o que é coerente com a teoria de que um investidor requer um prêmio maior por um investimento mais arriscado.
- A medida de risco mínimo da distribuição é mais conservadora que a medida de risco CVaR a nível de confiança de 95%, que por sua vez é mais conservadora que a medida de risco CVaR a nível de confiança de 90%.
- Os resultados numéricos obtidos nesta tese mostram que os modelos média-mínimo da distribuição e média-CVaR apresentam resultados coerentes, e são adequados para otimizar portfólio de contratos de energia segundo as premissas adotadas nesta tese.
- A definição do coeficiente a ser utilizado na penalização da função objetivo para o tratamento de possíveis inviabilidades nos problemas de segundo estágio não é uma tarefa fácil. Um coeficiente muito pequeno pode não eliminar soluções inviáveis do conjunto de possíveis soluções

de um problema viável, e um coeficiente muito grande pode resultar em instabilidades numéricas na solução do problema de otimização.

- Sob o aspecto tempo computacional, o tratamento de inviabilidade nos problemas de segundo estágio via cortes de viabilidade se mostrou bem superior ao tratamento via penalização na função objetivo.

A seguir são listados alguns tópicos para estudos futuros:

- Extensão da modelagem do problema para o caso multi-estágio, onde os contratos candidatos vão sendo decididos seqüencialmente no tempo.
- Aplicação de técnicas de clusterização de séries de modo a se reduzir o número de cenários de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, reduzindo-se assim o esforço computacional para a solução do problema.
- Extensão da modelagem para tratar incertezas na demanda a ser atendida, no cronograma de instalação de novas unidades geradoras, na disponibilidade das usinas etc.
- Aplicação de outras técnicas de decomposição em otimização estocástica para a solução do problema, como por exemplo, relaxação lagrangeana e método do gradiente estocástico.
- Verificação da viabilidade de aplicação do CVaR em outros problemas, como por exemplo, para limitar o risco de déficit de energia em modelos de planejamento da operação e da expansão energética.