



Eduardo Thomaz Faria

**Análise dos Impactos do Mercado de Ajustes na
Estratégia de Oferta de Agentes Hidrelétricos em
Mercados de Curto Prazo**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho

Co-orientador: Prof. Alexandre Street de Aguiar

Rio de Janeiro

Abril de 2010



Eduardo Thomaz Faria

**Análise dos Impactos do Mercado de Ajustes na
Estratégia de Oferta de Agentes Hidrelétricos em
Mercados de Curto Prazo**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alvaro de Lima Veiga Filho
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Alexandre Street de Aguiar
Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Delberis Araújo Lima

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Antonio Guilherme Garcia Lima
UERJ

Prof. Leonardo Lima Gomes

Departamento de Administração – PUC-Rio

Prof. Luiz Augusto Nóbrega Barroso
PSR Consultoria

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eduardo Thomaz Faria

Graduado em Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2001, e Mestre em Engenharia Elétrica, também pela PUC-Rio, em 2004

Ficha Catalográfica

Faria, Eduardo Thomaz

Análise dos impactos do mercado de ajustes na estratégia de oferta de agentes hidrelétricos em mercados de curto prazo / Eduardo Thomaz Faria ; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho ; co-orientador: Alexandre Street de Aguiar. – 2010.

138 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Leilões em mercados de curto prazo. 3. Operação de sistemas elétricos. 4. Mercado spot. 5. Nord Pool. 6. Mercado Elbas. 7. Programação estocástica. 8. Decomposição de Benders. 9. ARMA. 10. GARCH. I. Veiga Filho, Álvaro de Lima. II. Aguiar, Alexandre Street de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Sérgio Nilo e Vera Lúcia.

Aos meus irmãos, Francisco e Fernando.

Agradecimentos

Aos meus pais, pela educação, carinho, apoio, e incansável cobrança, sem os quais este trabalho não teria sido concluído.

Aos meus irmãos, família e amigos, pelos incentivos demonstrados durante todos os momentos.

Ao amigo e co-orientador Alexandre Street, pela paciência, excelente orientação e incansáveis discussões.

Ao orientador Álvaro Veiga, pelos ensinamentos, orientação e apoio.

Aos grandes amigos Luiz Augusto Barroso e Bruno Flach, pelas discussões e imprescindível disposição em ajudar sempre que foi necessário.

Ao amigo Stein-Erik Fleten, pela oportunidade, orientação e apoio no decorrer deste trabalho.

Ao amigo Klaus Vogstad, pela ajuda.

Aos amigos Antônio Guilherme e Xisto Vieira, pelas oportunidades e agradável convívio profissional.

À tia Sylvia, pela excelente revisão.

À CNPq, à CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Aos amigos da PSR: André Dias, André Granville, Bernardo, Chabar, Fernanda, Francisco, Frank, Gelli, Geny, Gustavo, Gerson, Jorge, Julio, Rosenblatt, Luiz Carlos, Luiz Maurício, Lujan, Mário, Max, Nora, Porrua, Priscila, Rafael Kelman, Resende, Silvio, Granville e Lucindo.

E finalmente, agradeço a todos os amigos do Aquário da MPX, por nossa agradável convivência, a saber: Adriana, André, Armando, Babi, Camilla, Carol, Cris, Edson, Evandro, Felipe, Leo Madeira, Leo Soares, Lucy, Marco, Natacha, Rachel, Rogério, Thiago e Vanessa.

Resumo

Faria, Eduardo Thomaz; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Orientador); Aguiar, Alexandre Street (Co-orientador). **Análise dos Impactos dos Mercados de Ajustes na Estratégia de Oferta de Agentes Hidrelétricos em Mercados de Curto Prazo**. Rio de Janeiro, 2010. 138p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A década de 90 foi marcante para a indústria de eletricidade, com a introdução de mercados competitivos em que os agentes geradores são livres para tomar suas decisões de produção e investimento, assumindo integralmente os riscos decorrentes de suas estratégias. O despacho e o preço spot neste tipo de mercado são definidos através de leilões diários, onde os agentes fornecem seus lances de preços/quantidades que expressam suas disposições em vender ou comprar energia. Os lances aceitos nos leilões, que estabelecem compromissos de geração, são definidos um dia antes da energia ser fisicamente gerada e injetada na rede. A ocorrência de eventos improváveis, como quebra de máquinas ou alterações nas condições meteorológicas, gera a necessidade de ajustes para compensar os desequilíbrios entre geração e carga, e para isso criaram-se mercados de ajustes. A base experimental do trabalho foi o Nord Pool, o mercado livre de energia dos países nórdicos que possui um mercado de ajustes chamado Elbas. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo computacional que otimiza a estratégia de oferta de um agente hidrelétrico price-taker atuando no Nord Pool, que além de representar de forma detalhada as características operativas das usinas, leva em conta as negociações no mercado Elbas e o nível de aversão a risco do agente gerador, através da função objetivo que maximiza uma combinação convexa do valor esperado e do CVaR (Conditional Value at Risk) da renda líquida obtida da venda de energia. Cenários de preços spot e do mercado Elbas foram gerados baseados em modelos de séries temporais ARMA e GARCH, e para reduzir o esforço computacional e viabilizar o uso de um número adequado de cenários foram utilizadas técnicas de decomposição de Benders e Benders Multicut. O modelo desenvolvido possibilitou estudar a atuação dos agentes nos mercados spot e Elbas sob dois pontos de vista distintos: sob a ótica dos geradores, que buscam maximizar suas margens operacionais; e sob a ótica do regulador, cujo foco é investigar se o mercado Elbas cumpre seu papel de equilibrar a oferta e a demanda, e não fazendo com que os geradores especulem através de estratégias conjuntas nos dois mercados. Todos esses efeitos foram estudados e analisados para diferentes perfis de risco dos agentes e diferentes condições de mercado, ou seja, considerando períodos de diferentes volatilidades dos preços praticados no mercado Elbas e diferentes valores (ou custos de oportunidade) da água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Sob a ótica do agente, o trabalho mostrou que há um incentivo para o agente neutro a tentar usufruir de possíveis preços mais altos no mercado Elbas que os praticados no spot. Sob a ótica do regulador, os resultados mostram que o agente menos avesso a risco, dependendo das condições de mercado, opta por deslocar parte de sua energia do mercado spot para o Elbas, mostrando seu apetite por ganhos maiores independentemente do risco associado às suas decisões. O agente avesso a risco opta por transacionar menos energia no Elbas, principalmente em períodos mais voláteis, evitando com isso os piores cenários. Finalmente, considerando que normalmente empresas de energia são avessas a risco, o modelo de ajustes através do mercado Elbas se mostrou adequado, cumprindo naturalmente seu papel sem a necessidade de interferência do regulador.

Palavras Chaves

Leilões em mercados de curto prazo, operação de sistemas elétricos, mercado spot, Nord Pool, mercado Elbas, programação estocástica, decomposição de Benders, ARMA, GARCH.

Abstract

Faria, Eduardo Thomaz; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Advisor); Aguiar, Alexandre Street (Co-advisor). **Analysis of the Balancing Market Impacts on the Spot Market Bidding Strategy of a Hydropower Producer**. Rio de Janeiro, 2010. 138p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The widespread introduction of competitive mechanisms during the 1990s changed the panorama of the electricity industry around the world. Vertically integrated and centrally operated systems were replaced by market environments in which generators became free to make their production and investment decisions and, at the same time, assume the risk of their chosen strategies. Both the dispatch and the energy spot price in such markets result from two-sided auctions in which producing and consuming agents submit their price-quantity bids, expressing how much energy they are willing to buy or sell. The accepted bids, which commit agents to either deliver or consume power, are set a day before the energy delivery. However, since unexpected events may occur - such as changes in weather conditions or breakdowns of generation turbines - some adjustments might have to be done in order to compensate for the unbalances between total generation and load. These adjustments usually take place in the balancing markets. In the present work, we propose an optimization model for a price-taking hydropower producer who trades energy in the Nord Pool – the competitive electricity market encompassing the Nordic countries that comprises a balancing market called Elbas. The proposed model represents in details the operating aspects of the plants and takes into account the possibility of trading energy in the Elbas market. The model represents the level of risk aversion of the agent in its objective function, by maximizing a convex combination of the expected value and the CVaR (Conditional Value at Risk) of the net income obtained. Scenarios of spot and Elbas prices were generated based on time series models ARMA and GARCH and, in order to reduce the computational effort and enable the use of an adequate number of scenarios, Benders decomposition and Benders Multicut methods were applied. The developed model allowed us to study the behavior of agents in the spot and Elbas markets under two different viewpoints: from the perspective of the generators, which aim at maximizing its operating income; and from the viewpoint of the regulator, whose focus is on analyzing whether the Elbas market meets its role of balancing supply and demand, rather than leading generators to speculate through combined strategies in both markets. All these effects were studied and analyzed for different risk-averse profiles of the agents, and for different market conditions, i.e., considering periods of different volatilities of Elbas market prices and different water values (or opportunity costs) stored in the reservoirs of the hydroelectric power plants. From the perspective of the agent, the study showed that there are incentives for the risk- neutral agent to try to take advantage of possible higher prices in the Elbas. From the regulator's viewpoint, the results show that the risk-neutral agents, depending on market conditions, choose to shift some of its energy generation to the Elbas market, showing their desire for higher incomes regardless of the risk associated with their decisions. The risk-averse agent chooses to trade less energy in Elbas, especially in volatile periods, thereby avoiding the worst scenarios. Finally, considering that energy companies are usually risk-averse, the adjustments made in the Elbas market were shown to be adequate, naturally meeting its role without requiring interventions from the regulator.

Keywords

Day-ahead market bidding, energy systems operation, spot market, Nord Pool, Elbas market, stochastic programming, Benders decomposition, ARMA, GARCH.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1. A reforma do setor elétrico.....	13
1.2. O Mercado Elétrico Nórdico: Nord Pool	15
1.2.1. O mercado <i>spot</i> (Elspot).....	18
1.2.2. O mercado de contratos	21
1.2.3. O mercado de balanços (ou ajustes)	23
1.2.4. O mercado Elbas.....	24
1.3. Escopo, objetivo e contribuições	26
1.4. Organização da tese	29
2 OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	31
2.1. Despacho baseado em custos.....	31
2.2. Despacho por oferta de preços.....	32
2.3. Formação de preço: despacho baseado em custos vs. oferta de preços.....	33
2.4. O conceito de valor da água	34
2.5. Modelos de longo, médio e curto prazos.....	37
2.6. Estratégia de ofertas de agentes geradores em ambiente de mercado	39
2.6.1. Estratégia de oferta de agentes price-takers	39
2.6.2. Estratégia de oferta de agentes price-makers	41
3 ESTRATÉGIA DE OFERTA DE AGENTES HIDRELÉTRICOS PRICE-TAKERS NO NORD POOL	44
3.1. Modelo determinístico de oferta de preço/quantidade	46
3.1.1. Horizonte de tempo	46
3.1.2. A Curva de oferta de preço/quantidade no mercado <i>spot</i>	46
3.1.3. Negociações no mercado Elbas	49
3.1.4. Receita Total: Mercado Spot + Elbas	50
3.1.5. Operação das usinas hidrelétricas.....	50
3.1.5.1. Balanço hídrico.....	51
3.1.5.2. Eficiência das turbinas.....	52
3.1.6. Atendimento aos Lances Aceitos	55
3.1.7. Valor da água.....	55
3.1.8. O modelo determinístico de maximização da renda.....	57
3.2. Modelo estocástico de oferta de preço/quantidade.....	58
3.2.1. Modelagem das incertezas nos preços <i>spot</i> e preços Elbas	60
3.2.2. O modelo estocástico de maximização do valor esperado da renda....	63
3.2.3. Caracterização da Aversão a Risco	65
3.2.3.1. Conditional Value at Risk (CVaR).....	67
3.2.4. O Modelo com Aversão a Risco: maximização do CVaR	69
3.2.5. O Modelo com Aversão a Risco: ponderação entre maximização do valor esperado e CVaR da renda	70
4 REPRESENTAÇÃO DE INCERTEZAS.....	72
4.1. Tipos de Métodos de Geração de Cenários	72
4.1.1. Correspondência de Propriedades Estatísticas (<i>Property Matching</i>) ..	73

4.1.2. Métodos de Simulação por Amostragem (<i>Sampling</i>).....	73
4.1.3. Modelos Econométricos e Séries Temporais.....	74
4.1.4. Outros Métodos	74
4.2. O Modelo Aplicado nesta Tese	74
4.2.1. Modelos ARMA	76
4.2.2. Modelos ARMAX	77
4.2.3. Modelos GARCH	77
4.2.4. Geração de cenários de preços Spot: modelo ARMA-GARCH.....	78
4.2.5. Geração de cenários de preços Elbas: modelo ARMAX-GARCH	81
5 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO	85
5.1. Programação estocástica dois estágios	85
5.2. Equivalente Determinístico	87
5.3. Decomposição de Benders do problema de dois estágios	88
5.3.1. O algoritmo da decomposição de Benders	89
5.3.1.1. Cortes de viabilidade	90
5.3.1.2. Cortes de otimalidade	92
5.3.1.3. O algoritmo.....	94
5.4. Algoritmo aplicado ao modelo desta tese.....	96
5.4.1. Decomposição de Benders do modelo de maximização da Renda	96
5.4.2. Decomposição de Benders do modelo da ponderação entre maximização do valor esperado e CVaR da renda	100
5.4.3. O algoritmo da decomposição de Benders Multicut	103
6 METODOLOGIA DE ANÁLISE	107
6.1. Valor da Função Objetivo (<i>Equivalente Certo</i>).....	107
6.2. Volumes transacionados nos mercados <i>spot</i> e Elbas.....	108
6.3. Distribuição Empírica da Renda Total	108
6.4. Valor do mercado Elbas	109
6.5. Curvas de Nível CVaR vs (Valor Esperado – CVaR).....	110
7 RESULTADOS	111
7.1. Resultados Computacionais.....	111
7.2. Estudos de Casos	112
7.2.1. Resultados parte 1: Ponto de vista dos Agentes Geradores.....	116
7.2.1.1. Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo).....	116
7.2.1.2. Renda Líquida Total	117
7.2.1.3. Valor do Mercado Elbas	118
7.2.2. Resultados parte 2: Ponto de vista do Regulador	119
7.2.2.1. Volume transacionado nos Mercados <i>Spot</i> e Elbas	119
7.2.2.2. Curvas de Nível do Valor Esperado vs (Valor Esperado – CVaR)	121
7.2.2.3. Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo).....	122
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	124
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
10 ANEXO A – Formulações Alternativas	133
Outros tipos de lances no Nord Pool	133
Lances horários flexíveis (<i>flexible hourly bids</i>)	133

Lances em bloco (<i>block bids</i>)	133
Lances em bloco conectados (<i>linked block bids</i>)	135
Custos de partida e parada	136
11 ANEXO B – Dados operativos das usinas	138

Lista de figuras

Figura 1.1 – Sistema elétrico do Nord Pool	16
Figura 1.2 - Formação de preços e despacho por ofertas	19
Figura 1.3 – Exemplo de divisão das áreas no Nord Pool e fluxos de energia	20
Figura 1.4 – Cronologia das principais decisões no planejamento de curto prazo	27
Figura 2.1 – Curvas de oferta dos geradores e demanda e preço <i>spot</i> de equilíbrio	32
Figura 2.2 - Função de benefício futuro (FBF)	36
Figura 2.3 – Cadeia de modelos de longo, médio e curto prazos	37
Figura 3.1 – Exemplo de curva de oferta de preço/quantidade para uma determinada hora t .	47
Figura 3.2 – usinas da Agder Energi da parte superior da cascata do rio Otra	50
Figura 3.3 – Esquema de funcionamento de uma hidrelétrica	53
Figura 3.4 – Representação da eficiência da turbina 3 da usina Brokke	54
Figura 3.5 – Representação do Valor da Água do reservatório da usina Holen12	56
Figura 3.6 – Histórico de preços <i>spot</i> da Suécia (linha preta) e preços do Elbas (linha cinza) (1º de janeiro a 30 de novembro de 2007)	61
Figura 3.7 – Regressão entre os preços <i>spot</i> e Elbas (2007) – EUR/MW	61
Figura 3.8 – Esquema do processo de decisões	63
Figura 3.9 – CVaR (Conditional Value at Risk)	67
Figura 4.1 – Histórico do logaritmo dos preços <i>spot</i> da Suécia (linha preta) e preços Elbas (linha cinza) (1º de janeiro a 30 de novembro de 2007)	75
Figura 4.2 – Regressão entre o logaritmo dos preços <i>spot</i> e preços Elbas (2007)	76
Figura 4.3 – 20 cenários de preços <i>spot</i> da área NO1	81
Figura 4.4 – 10 cenários de preços Elbas gerados para 3 cenários de preços <i>spot</i> diferentes da área NO1.	84
Figura 5.1 - Cortes de otimalidade para na aproximação da função de benefício futuro (FBF)	94
Figura 5.2 – Estrutura do subproblema na decomposição de Benders Multicut	104
Figura 6.1 – Distribuições empíricas das rendas de um agente totalmente neutro a risco e outro totalmente avesso a risco	109
Figura 7.1 – Exemplo de três curvas de oferta para três diferentes horas	114
Figura 7.2 – Curvas de oferta considerando e não considerando o mercado Elbas – hora 23:00-24:00	115
Figura 7.3 – Curvas de oferta considerando e não considerando o mercado Elbas – hora 12:00-13:00	115
Figura 7.4 – Resultados: Valor da Função Objetivo (Equivalente Certo)	116
Figura 7.5 – Resultados: Renda Líquida Total	117
Figura 7.6 – Resultados: Valor do Mercado Elbas	118

Figura 7.6 – Resultados: Valor do Mercado Elbas	118
Figura 7.7 – Resultados: Volume transacionado nos Mercados Spot e Elbas	120
Figura 7.8 – Resultados: Curvas de Nível do Valor Esperado vs (Valor Esperado – CVaR)	121

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros estimados para o modelo de geração de cenários de preços <i>spot</i> da área NO1	81
Tabela 4.2 – Parâmetros estimados para o modelo de geração de cenários de preços Elbas	83
Tabela 7.1 - Tempos computacionais obtidos na execução dos modelos (i) Equivalente determinístico; (ii) Decomposição de Benders e (iii) Decomposição de Benders Multicut	112