

Bernardo Vieira Bezerra

**Estratégia de Oferta em Leilões de
Opções de Energia Elétrica**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Abril de 2006

PONTIFÍCIA **U**NIVERSIDADE **C**ATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Bernardo Vieira Bezerra

**Estratégia de Oferta em Leilões de Opções
de Energia Elétrica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Oscar Porto

Rio de Janeiro

Abril de 2006



Bernardo Vieira Bezerra

**Estratégia de Oferta em Leilões de
Opções de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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.

Dr. Oscar Porto
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Mario Veiga Ferraz Pereira
PSR Consultoria Ltda

Dr. João Carlos de Oliveira Mello
Andrade & Canellas

Dr. Armando Matos de Oliveira
EL PASO

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2006

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

Bernardo Vieira Bezerra

Graduou-se em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Apoio à Decisão e em Engenharia de Produção Elétrica na PUC-RJ em 2003. Atuou na empresa PSR, onde participou ativamente de estudos relacionados à avaliação financeira de projetos; comercialização de energia; integração dos setores de gás e energia; estudos de planejamento energético e na precificação de contratos de opção de energia (tema deste trabalho).

Ficha Catalográfica

Bezerra, Bernardo Vieira

Estratégia de oferta em leilões de opções de energia elétrica / Bernardo Vieira Bezerra ; orientador: Oscar Porto ; co-orientador: Mário Veiga Ferraz Pereira. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

119 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Leilões de energia elétrica. 3. Otimização estocástica. 4. Programação linear. 5. Risco de contratação. 6. Opção de compra. 7. Precificação de opções. I. Porto, Oscar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica Letras. III. Título.

CDD: 621.3

À minha irmã Maria Krishna

Agradecimentos

Agradeço à Grazielly Braga de Aquino, minha amada companheira, pelo amor, carinho e paciência.

À minha família. Ao meu pai Luiz Fernando E. Bezerra, minha mãe Leia Magalhães Vieira e meus irmãos (Bárbara, Bruno e Maria), além de todos os demais, pelo carinho, amor e apoio neste desafio. Sem eles seria impossível dar este passo.

Ao orientador Mario Veiga Ferraz Pereira, pela oportunidade concedida e confiança nas responsabilidades envolvidas. Agradeço pela excelente orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao orientador Oscar Porto, pela motivação e oportunidades concedidas durante toda minha vida acadêmica.

Ao grande amigo Luiz Augusto, um especial agradecimento. Pelas horas de sono perdidas e dedicadas a todas as fases deste trabalho. Agradeço também pela orientação, pela amizade e pelos incentivos acadêmicos e profissionais.

Ao CNPQ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

A todos os amigos da Mercados de Energia e PSR Consultoria.

Resumo

Bezerra, Bernardo Vieira; Porto, Oscar (Orientador). **Estratégia de Oferta em Leilões de Opções de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2006, 119 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversos países vêm utilizando leilões de contratos como mecanismos para induzir à expansão da oferta do sistema elétrico. Em sua grande maioria, o tipo de contrato licitado é um contrato financeiro do tipo “forward”. Mais recentemente, o uso de contratos de opção vem sendo utilizado. No caso do Brasil, os contratos de opção de compra de energia elétrica, também conhecidos como contratos por disponibilidade, vêm sendo licitados pelas distribuidoras. Nestes leilões, o vendedor (gerador) participante realiza ofertas simultâneas do prêmio da opção e de seu strike price. Dessa forma, um primeiro desafio é a comparação entre opções com distintos strikes e prêmios. Para um gerador termoelétrico, o desafio subsequente é como realizar estratégias de ofertas nestes leilões que maximize o retorno do agente, que o torne competitivo e que satisfaça seu perfil de risco. O objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver uma metodologia para determinar a estratégia de oferta de termelétricas em leilões de venda de contratos de opção de compra de energia elétrica. Inicialmente, será apresentado o critério de comparação das opções com distintas características. Em seguida, será estudado o problema de determinar o binômio prêmio de risco e o preço de exercício que devem ser ofertados, visando maximizar a competitividade do projeto no leilão. Adicionalmente, serão analisadas a influência de incerteza no fornecimento de combustível (que introduz incerteza no custo variável de produção) e o perfil de aversão a risco do gerador. Exemplos e estudos de caso serão ilustrados para uma termelétrica bicomcombustível com incerteza na disponibilidade de gás natural.

Palavras-chave

Engenharia Elétrica, Leilões de Energia Elétrica, *Value at Risk*, Otimização Estocástica, Programação Linear, Risco de contratação, Opção de Compra, Precificação de Opções.

Abstract

Bezerra, Bernardo Vieira; Porto, Oscar (Advisor). **Bidding Strategies in Auctions for Energy Call Options**. Rio de Janeiro, 2006, 119 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of a contract auction scheme to induce the electricity system expansion is being carried out worldwide. In most of the cases, the auctioned contract is a financial forward contract. More recently, option contracts are being implemented. In Brazil, energy call options, also known as “availability” contracts, are offered to distribution companies in an auction scheme. On these auctions, the seller (generator) bids both the strike price and the option premium. Consequently, the first challenge is how to compare call options with different strikes and premium. From a thermo electrical generator point of view, the second challenge is how to develop a bidding strategy which maximizes its revenue, competitiveness and taking into account the risk-averse behavior. The objective of this thesis is to develop a methodology for bidding strategies for a thermal plant in auctions for long-term electricity call options. Initially, the problem of comparing call options with different strikes, quantities and premium will be addressed and the solution adopted will be described. We then analyze the optimum bidding strategy, which determines the premium and strike bids that maximizes the generator competitiveness, taking into account the risk aversion of the generator. Additionally, the cost uncertainty influence will be analyzed (which introduces variable cost uncertainty). Examples and case studies are presented with data from the Brazilian system for a dual-fuel generator with natural gas availability uncertainty.

Keywords

Electrical Engineering, Electrical power auctions, Value at Risk, Stochastic Optimization, Linear Programming, Contract Risks, Call Options.

Sumário

1	<u>INTRODUÇÃO.....</u>	16
1.1	O PROCESSO DE REFORMA NO SETOR ELÉTRICO E A GARANTIA DE EXPANSÃO DA OFERTA.....	16
1.1.1	SINAIS DO MERCADO DE CURTO PRAZO E A EXPANSÃO DA OFERTA.....	17
1.1.2	CONTRATAÇÃO “FORWARD” DE ENERGIA E A EXPANSÃO DA OFERTA.....	18
1.1.3	CONTRATAÇÃO DE “OPÇÕES” DE ENERGIA E A EXPANSÃO DA OFERTA.....	18
1.2	CONTRATAÇÃO DE ENERGIA E EXPANSÃO DA OFERTA NO BRASIL.....	20
1.2.1	MODALIDADES DE CONTRATAÇÃO	21
1.2.2	CONTRATOS A TERMO E O LEILÃO DE ENERGIA EXISTENTE.....	22
1.2.3	CONTRATOS DE OPÇÃO E O LEILÃO DE ENERGIA NOVA	23
1.2.4	COMPARAÇÃO DAS OFERTAS EM LEILÕES DE OPÇÕES	23
1.3	ESTRATÉGIAS DE OFERTAS EM LEILÕES DE OPÇÕES DE COMPRA DE ENERGIA .	24
1.3.1	OFERTAS SIMULTÂNEAS DE STRIKE E PRÊMIO	24
1.3.2	INCERTEZA NO SUPRIMENTO DE COMBUSTÍVEL.....	25
1.4	OBJETIVO DESTA DISSERTAÇÃO.....	26
1.5	ORGANIZAÇÃO DA TESE	26
2	<u>FORMAÇÃO DE PREÇOS NO MERCADO DE CURTO PRAZO.....</u>	28
2.1	SISTEMAS PURAMENTE TÉRMICOS	28
2.1.1	DESPACHO ECONÔMICO.....	28
2.1.2	SOLUÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO	29
2.1.3	PREÇO SPOT.....	29
2.1.4	VENDA NO MERCADO DE CURTO PRAZO E RENDA LÍQUIDA	29
2.1.5	EXEMPLO.....	30
2.2	SISTEMAS HIDROTÉRMICOS	31
2.2.1	CUSTOS DE OPORTUNIDADE.....	31
2.2.2	ÁRVORE DE DECISÕES.....	31
2.2.3	CUSTOS OPERACIONAIS IMEDIATOS E FUTUROS	32
2.2.4	VALOR DA ÁGUA.....	33

2.2.5	FORMULAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO PARA UMA ETAPA	34
2.2.6	SOLUÇÃO DO PROBLEMA E CUSTOS MARGINAIS.....	36
2.2.7	EXEMPLO.....	36
2.3	CÁLCULO DA FUNÇÃO DE CUSTO FUTURO	38
2.4	VOLATILIDADE DE PREÇOS SPOT E OS SINAIS PARA A EXPANSÃO	41
2.5	VOLATILIDADE DE PREÇOS SPOT E INVESTIMENTOS	42
3	<u>CONTRATOS A TERMO E CONTRATOS DE OPÇÃO</u>	<u>44</u>
3.1	CONTRATO A TERMO	44
3.1.1	CONTRATOS A TERMO (OU “FORWARD”).....	44
3.1.2	CONTRATOS A TERMO NO SETOR ELÉTRICO	44
3.1.3	RISCOS NO CONTRATO FORWARD	47
3.1.4	PRECIFICAÇÃO DE CONTRATOS A TERMO	49
3.2	CONTRATO DE OPÇÃO.....	51
3.2.1	OPÇÕES DE COMPRA	52
3.2.2	OPÇÕES DE VENDA	53
3.2.3	OPÇÕES DE COMPRA NO SETOR ELÉTRICO E OS CONTRATOS POR DISPONIBILIDADE	54
4	<u>LEILÕES DE OPÇÃO COMO MECANISMO PARA EXPANDIR A OFERTA</u>	<u>58</u>
4.1	GARANTINDO A SEGURANÇA NO SUPRIMENTO	58
4.1.1	RESPALDO DE CONTRATOS	59
4.1.2	LEILÕES DE CONTRATOS A TERMO E CONTRATOS DE OPÇÃO.....	60
4.2	LEILÕES DE OPÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: VISÃO GERAL	61
4.2.1	LEILÕES COM OFERTA DE PRÊMIO E QUANTIDADE	61
4.2.2	COMPARAÇÃO DAS OFERTAS EM LEILÕES COM OFERTAS DE PRÊMIO E QUANTIDADE	62
4.2.3	ESTRATÉGIA DE OFERTA (PRÊMIO DE RISCO) EM LEILÕES COM STRIKE FIXO	62
4.2.4	LEILÕES COM OFERTA DE STRIKE, PRÊMIO E QUANTIDADE	63
4.2.5	COMPARAÇÃO DAS OFERTAS NO CASO DO BRASIL: O ÍNDICE CUSTO BENEFÍCIO	64
4.2.6	PROPRIEDADES DO ICB.....	67
4.2.7	ESTRATÉGIA DE OFERTAS EM LEILÕES DE OPÇÕES COM OFERTA DE PRÊMIO, STRIKE E QUANTIDADE	69

<u>5</u>	<u>MODELOS COMPUTACIONAIS E VISÃO GERAL DA METODOLOGIA DE ESTRATÉGIA DE OFERTAS</u>	<u>70</u>
5.1	CENÁRIOS DE PREÇO SPOT E DISPONIBILIDADE DE GÁS	70
5.2	METODOLOGIA	73
<u>6</u>	<u>ESTRATÉGIAS DE OFERTA EM LEILÕES DE OPÇÕES: UM EXEMPLO</u>	<u>74</u>
6.1	CÁLCULO DO PRÊMIO DE RISCO	74
6.1.1	TÉRMICA NEUTRA A RISCO	76
6.1.2	TÉRMICA AVESSA A RISCO	77
6.2	ESTRATÉGIA DE OFERTA	78
6.2.1	EXEMPLO DA METODOLOGIA	79
6.3	ESTRATÉGIA DE OFERTA SOB INCERTEZA NO SUPRIMENTO DE COMBUSTÍVEL	80
6.3.1	CUSTO VARIÁVEL DE TÉRMICA BICOMBUSTÍVEL	81
6.3.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	82
6.3.3	EXEMPLO DA METODOLOGIA PROPOSTA – CASO BICOMBUSTÍVEL	82
6.4	REDECLARAÇÃO DO CUSTO VARIÁVEL	84
<u>7</u>	<u>ESTRATÉGIAS DE OFERTA EM LEILÕES DE OPÇÕES: ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA BRASILEIRO</u>	<u>86</u>
7.1	MODELAGEM DA INCERTEZA NO SUPRIMENTO DE COMBUSTÍVEL	86
7.1.1	INTEGRAÇÃO GAS-ELETRICIDADE	86
7.1.2	MODELAGEM DO SISTEMA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE GÁS	87
7.2	ESTUDO DE CASO PARA O LEILÃO DE ENERGIA NOVA DE 2005	88
7.2.1	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	89
7.3	RESULTADOS	90
7.3.1	CASO NEUTRO A RISCO	90
7.3.2	CASO AVESSO A RISCO	93
7.3.3	RESULTADOS CONSIDERANDO REDECLARAÇÃO DE CUSTO	95
<u>8</u>	<u>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>97</u>
8.1	CONCLUSÕES	97
8.2	TRABALHOS FUTUROS	98

9	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>99</u>
----------	--------------------------------	------------------

10	<u>ANEXO A: MÉTRICAS DE RISCO</u>	<u>105</u>
-----------	--	-------------------

10.1	O MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE PORTFOLIOS DE MARKOWITZ.....	105
-------------	---	------------

10.2	VALUE AT RISK (VAR).....	109
-------------	---------------------------------	------------

10.3	DOWNSIDE RISK	110
-------------	----------------------------	------------

10.4	FUNÇÕES DE UTILIDADE	113
-------------	-----------------------------------	------------

10.4.1	CONCEITO	113
--------	----------------	-----

10.4.2	O EQUIVALENTE À CERTEZA	113
--------	-------------------------------	-----

10.4.3	EXEMPLO.....	114
--------	--------------	-----

11	<u>ANEXO B: MODELO ESTOCÁSTICO DE DESPACHO DO GÁS – SGAS</u>	<u>116</u>
-----------	---	-------------------

11.1	O MODELO SGAS	116
-------------	----------------------------	------------

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Processo Decisório em Sistemas Hidrotérmicos	32
Figura 2-2 – Custos (\$) Imediatos e Futuros contra Armazenamento Final (Hm ³)	32
Figura 2-3 – Cálculo da FCF	33
Figura 2-4 – Despacho Ótimo.	34
Figura 2-5 – Balanço hídrico do reservatório.....	35
Figura 2-6 – Função de Custo Futuro.....	37
Figura 2-7 – Definição dos Estados do Sistema.....	38
Figura 2-8 – Cálculo da Decisão Ótima por Cenário - Último Estágio.....	39
Figura 2-9 – Cálculo do primeiro segmento da FCF.....	39
Figura 2-10 – FCF Linear por partes para o Estágio T-1	40
Figura 2-11 – Cálculo do custo operativo para o estágio T-1 e FCF para T-2.....	40
Figura 2-12 – Sistema SE/CO – Custo marginal de curto prazo.....	41
Figura 2-13 – Distribuição do Preço “spot” (R\$/MWh).....	42
Figura 3-1 – Distribuição da Receita do Gerador – contrato por quantidade.....	47
Figura 3-2 – Preços “spot” x Nível de Armazenamento (I) – situação seca	48
Figura 3-3 – Preços “spot” x Nível de Armazenamento (II) – situação úmida	48
Figura 3-4 – Lucro com Opção de Compra.....	53
Figura 3-5 – Lucro Com Opção de Venda	54
Figura 3-6 – Distribuição da Receita do Gerador – contrato de opção de compra.....	57
Figura 4-1 - Lastro x Geração Mínima e Lastro x Preço de Exercício.....	60
Figura 4-2 – Comparação entre ofertas nos leilões prêmio-quantidade	62
Figura 4-3 – Valor esperado do custo operativo x preço de exercício	67
Figura 5-1 – Cadeia de modelos utilizada na minimização do ICB	71
Figura 6-1 – Valor presente da receita operativa da usina	76
Figura 6-2 – Valor presente da receita líquida – térmica neutra a risco.....	77
Figura 6-3 – Valor presente da receita líquida – térmica avessa a risco	78
Figura 6-4 – Curva strike x ICB	80
Figura 6-5 – Curva strike x ICB (incerteza no custo).....	83
Figura 6-6 – Strike Ótimo para Cada Nível de Indisponibilidade.....	84
Figura 6-7 – Receita Extra com Redecaração	85
Figura 7-1 – Fluxo de Informações SGAS	88

Figura 7-2 – Preço de exercício ótimo – térmica neutra a risco.....	91
Figura 7-3 – Distribuição do valor presente das receitas (neutro a risco)	92
Figura 7-4 – Receita líquida total durante o contrato	93
Figura 7-5 - Distribuição do valor presente das receitas (avesso a risco)	93
Figura 7-6 – Comparação das receitas – <i>série #153</i>	94
Figura 7-7 – Preço de exercício ótimo – térmica avessa a risco.....	94
Figura 7-8 - Distribuição do valor presente das receitas (redeclaração)	96
Figura 10-1 - Distribuição da Geração	106
Figura 10-2 - Medida de Risco	107
Figura 10-3 – Portfolios de Variância Mínima.....	108
Figura 10-4 – O Conceito de VaR.....	109
Figura 10-5 – Distribuições de Retorno Assimétricas.....	111
Figura 10-6 – Fronteira Eficiente – Downside Risk.....	112
Figura 10-7 – Tipos de Função de Utilidade	113
Figura 10-8 – Possível Função Utilidade	114
Figura 10-9 – Equivalente a Certeza	115
Figura 11-1 – Fluxo de dados do SGAS.....	117
Figura 11-2 – Grafo representando rede de gasodutos	118

Lista de Tabela

Tabela 2-1 – Características das Termelétricas	30
Tabela 2-2 – Características da Hidrelétrica.....	36
Tabela 2-3 – Despacho Ótimo – Sistema Hidrotérmico.....	37
Tabela 3-1 – Cenários de preços spot.....	50
Tabela 4-1 – Características das opções	64
Tabela 6-1 – Características térmica T_1	79
Tabela 6-2 – Características térmica T_2	82
Tabela 7-1 – Características da térmica T_1	89
Tabela 7-2 – Resultado (neutro a risco).....	91
Tabela 7-3 – Resultado (avesso a risco)	95
Tabela 7-4 – Resumo dos resultados	96
Tabela 10-1 – Cenários de geração.....	106

Siglas Utilizadas

ACL:	Ambiente de Contratação Livre
ACR:	Ambiente de Contratação Regulado
CCEAR:	Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CCEE:	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNPE:	Conselho Nacional de Política Energética
CV:	Custo Variável
ICB:	Índice Custo Benefício
MME:	Ministério de Minas e Energia
O&M:	Operação e Manutenção
ONS:	Operador Nacional do Sistema
PMO:	Plano Mensal de Operação
VaR:	Valor no Risco (<i>Value at Risk</i>)
VP:	Valor Presente