

**Alexandre Street de Aguiar**

**Estratégia de Oferta de Geradoras em  
Leilões de Contratação de Energia**

**Dissertação de Mestrado**

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

Rio de Janeiro, novembro de 2004



**Alexandre Street de Aguiar**

**Estratégia de Oferta de Geradoras em  
Leilões de Contratação de Energia**

**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: Álvaro de Lima Veiga Filho

Co-orientador: Mário Veiga Ferraz Pereira

Rio de Janeiro

Novembro de 2004



**Alexandre Street de Aguiar**

**Estratégia de Oferta de Geradoras em  
Leilões de Contratação de Energia**

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. Álvaro de Lima Veiga Filho**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Dr. Mário Veiga Ferraz Pereira**  
Co-Orientador  
PSR Consultoria Ltda

**Dr. Sérgio Granville**  
PSR Consultoria Ltda

**Dr. Edvaldo Alves de Santana**  
UFSC

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de novembro de 2004

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

### **Alexandre Street de Aguiar**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-RJ em 2001 na área de Sistemas de Apoio à Decisão e Telecomunicações. Atuou na empresa Mercados de Energia, onde participou ativamente de estudos relacionados à avaliação financeira de projetos; comercialização de energia; gerenciamento de risco e otimização físico/financeira para o setor elétrico; estudos de planejamento energético e no desenvolvimento de modelos computacionais de disposição a contratar para geradoras em leilões de energia elétrica (tema deste trabalho).

#### Ficha Catalográfica

de Aguiar, Alexandre Street

Estratégia de oferta de geradoras em leilões de contratação de energia elétrica / Alexandre Street de Aguiar ; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho, co-orientador: Mario Veiga Ferraz Pereira. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

101 f. ; 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. Função utilidade. 4. Otimização estocástica. 5. Programação linear. 6. Risco de contratação. 7. Contratos a termo (Forward). I. Veiga Filho, Álvaro. II. Pereira, Mario Veiga Ferraz. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

A meus pais, Cláudio Street de Aguiar e Evelyn Reis Friede de Aguiar,  
e a meu irmão, André Street.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a minha família. Ao meu pai, minha mãe e irmão, 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 e presente orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao grande amigo e mestre Sergio Granville, pela excelente orientação e pelos ensinamentos e aprimoramentos acadêmicos.

Ao orientador Álvaro Veiga Filho, pela motivação e oportunidades concedidas durante toda minha vida acadêmica.

Aos grandes amigos, Bruno da Costa Flach e Eduardo Thomaz Faria, por estarem sempre presentes nos momentos bons e difíceis, compartilhando os mesmos sonhos acadêmicos desde a graduação, passando pelo mestrado e agora rumo ao doutorado.

Aos amigos de infância, com os quais Deus me presenteou, Cauã Reymond, Guilherme Carneiro e Robinson Friede, pela amizade incondicional e apoio em todos os momentos.

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.

À CAPES 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

de Aguiar, Alexandre Street. **Estratégia de Oferta de Geradoras em Leilões de Contratação de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2004, 102p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

O objetivo desta tese é desenvolver uma metodologia para *estratégia de oferta* de geradoras em leilões de contratos de energia elétrica, que determine a quantidade ótima que deve ser ofertada de cada contrato para cada nível de preço de leilão, levando em conta os perfis de risco de cada agente e os riscos associados à contratação. Em particular a incerteza quanto ao montante de energia produzida e ao seu preço no mercado de curto prazo (preço “spot”), também conhecida como “incerteza de quantidade e preço”. Desta forma, são realizadas aplicações desta metodologia para dois tipos de leilões de energia existente, mono e multi-produto. Neste segundo caso (multi-produto) é realizado um estudo de caso para o Leilão de Transição que ocorrerá em dezembro de 2004, onde serão leiloados 75% da eletricidade disponível hoje no país (55 mil MW), segundo as diretrizes do novo modelo do setor elétrico brasileiro.

## Palavras-chave

Engenharia Elétrica, Leilões de energia elétrica, Função Utilidade, Otimização Estocástica, Programação Linear, Risco de contratação, Contratos a termo (*Forward*).

## Abstract

de Aguiar, Alexandre Street. **Strategic Bidding for Generators in Energy Contract Auctions**. Rio de Janeiro, October 2004, 102 pages. MSc. Thesis – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

The objective of this work is to develop a methodology for bidding strategies in multi-unit auctions for long-term electricity power purchase agreements (PPA). Considering a descending price auction design, the objective of a generating agent is to determine the optimal amount of energy to be offered in each contract for the actual auction prices at each round that maximizes the revenues of the agent given their risk profiles and the contract risks involved. The main risk treated in this work is the so-called price-quantity risk, related to the negative correlation between energy produced and the short term prices (spot price). The modeling of the risk profile for each agent is done using utility functions. This methodology is then applied on two types of auctions: single-product (only one contract being auctioned) and multi-product (more than one product is simultaneously auctioned). Case studies are presented with data from the Brazilian system. In particular, on the second type (multivariate auction) the case study is realized for the transition auction that will occur on December 2004, where 75% of the generation market of the whole country (about 55GW) will be negotiated under the guidelines of the new Brazilian electrical sector model.

## Keywords

Electrical Engineering, Electrical power auctions, Utility Function, Stochastic Optimization, Linear Programming, Contract Risks, Bilateral Forward Contracts.

## Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contratação de energia através de leilões	13
1.2	O novo marco regulatório	13
1.3	Estratégia de oferta das geradoras	15
1.4	Objetivo	15
1.5	Visão Geral da Metodologia	15
1.6	Organização da Tese	17
2	FORMAÇÃO DE PREÇOS NO MERCADO DE CURTO PRAZO	19
2.1	Sistemas Puramente Térmicos	19
2.2	Sistemas Hidrotérmicos	22
2.3	Cálculo da Função de Custo Futuro	29
2.4	Mecanismo de Realocação de Energia (MRE)	31
3	CONTRATOS DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA	32
3.1	Volatilidade dos preços spot	32
3.2	Riscos de preço e quantidade	35
4	PRECIFICAÇÃO DE CONTRATOS	38
4.1	O Caso de um Produto armazenável não consumível	38
4.2	Produto não armazenável	39
4.3	Relação entre Preço Futuro e Preço Spot – Mercados Líquidos	40
5	FUNÇÕES UTILIDADE	42
5.1	Introdução: equilíbrio entre risco e ganho	42
5.2	Funções de Utilidade (FU)	44
5.3	O Equivalente a Certeza	47
5.4	O coeficiente de aversão a risco (CAR)	49

5.5	Função Utilidade Quadrática	49
5.6	Função Utilidade Exponencial (EXP)	51
5.7	Função Utilidade Logarítmica (LN)	52
5.8	Função Utilidade Linear por Partes (FULP)	53
6	MODELOS COMPUTACIONAIS E METODOLOGIA	58
6.1	Metodologia	58
7	DISPOSIÇÃO A CONTRATAR – ENERGIA EXISTENTE	61
7.1	Cálculo da renda líquida	61
7.2	Cálculo da função utilidade para renda líquida	62
7.3	Disposição a contratar para um preço conhecido	63
7.4	Exemplo do cálculo da CDC	64
8	LEILÕES DE ENERGIA EXISTENTE	70
8.1	Leilão mono-produto	70
8.2	Leilão multi-produto	72
8.3	Estudo de Caso para o Leilão de Transição (2004)	76
9	CONCLUSÕES	84
10	REFERÊNCIAS	87
11	ANEXO A: Mecanismo de Realocação de Energia – MRE	93
11.1	MRE: Motivação	93
11.2	O Mecanismo de Realocação de Energia	95
11.3	Exemplo de Aplicação do MRE	96
11.4	Vantagens e Limitações do MRE	101

## Lista de Figuras

Figura 2-1 – Processo Decisório em Sistemas Hidrotérmicos .....	23
Figura 2-2 – Custos Imediatos e Futuros contra Armazenamento Final .....	23
Figura 2-3 – Cálculo da FCF .....	24
Figura 2-4 – Programação Hidrelétrica Ótima. ....	25
Figura 2-5 – Balanço hídrico do reservatório .....	26
Figura 2-6 – Função de Custo Futuro.....	27
Figura 2-7 – Definição dos Estados do Sistema.....	29
Figura 2-8 – Cálculo da Decisão Ótima por Cenário - Último Estágio.....	29
Figura 2-9 – Cálculo do primeiro segmento da FCF .....	30
Figura 2-10 – FCF Linear por partes para o Estágio T-1 .....	30
Figura 2-11 – Cálculo do custo operativo para o estágio T-1 e FCF para T-2.....	31
Figura 3-1 – Sistema Brasileiro – Custo marginal de curto prazo.....	32
Figura 3-2 – Distribuição do Preço “spot”– Janeiro de 2002 .....	33
Figura 3-3 – Uso de Contratos para Redução de Volatilidade .....	35
Figura 3-4 – Preços “spot” x Nível de Armazenamento (II) – situação seca .....	36
Figura 3-5 – Preços “spot” x Nível de Armazenamento (III) – situação úmida....	37
Figura 4-1 – Esquema para determinar o preço de um contrato.....	38
Figura 5-1 – Tipos de Função de Utilidade .....	44
Figura 5-2 – Características do perfil de aversão a risco.....	45
Figura 5-3 – Características do perfil de neutralidade a risco. ....	46
Figura 5-4 – Características do perfil de propensão ao risco. ....	46
Figura 5-5 – Calculo do Equivalente a Certeza (gerador avesso a risco).....	47
Figura 5-6 – Possível Função Utilidade .....	48
Figura 5-7 – Função de utilidade quadrática .....	50
Figura 5-8 – Função de utilidade exponencial negativa .....	51
Figura 5-9 – Função de utilidade logarítmica.....	53
Figura 5-10 – Função de utilidade linear por partes com 4 segmentos. ....	54
Figura 5-11 – CARP para 8 segmentos (intervalos) de renda líquida.....	56
Figura 5-12 – FULP com 8 segmentos (intervalos) de renda líquida.....	56
Figura 6-1 – Cadeia de modelos utilizada na construção da CDC .....	59
Figura 7-1 – Gráfico da FULP expressa para preços com 8 segmentos.....	66
Figura 7-2 – Gráfico do CARP – Variação % para o segmento anterior .....	67

Figura 7-3 – Curva de oferta Furnas (ano de 2010) .....	67
Figura 7-4 – Curva de permanência da renda para 90 e 98 %EA da contratada. ...	69
Figura 8-1 – Preço de equilíbrio pela curva de oferta agregada.....	72
Figura 8-2 – Esquema de uma rodada de um leilão multi-produtos .....	73
Figura 8-3 – Balanço de energia e espaço de contratação.....	76
Figura 8-4 – Evolução da oferta e demanda total.....	81
Figura 8-5 – Evolução dos preços correntes por produto.....	82

## Lista de Tabela

Tabela 2-1 – Características das Termelétricas .....	21
Tabela 2-2 – Características da Hidrelétrica.....	27
Tabela 2-3 – Despacho Ótimo – Sistema Hidrotérmico.....	28
Tabela 7-1 – Usinas pertencentes a empresa FURNAS .....	64
Tabela 7-2 – Renda média e equivalente a certeza da renda líquida .....	69
Tabela 8-1 – Espaço de contratação total anual das empresas consideradas.....	79
Tabela 8-2 – Preços de Reserva e Fechamento do Leilão. ....	80
Tabela 8-3 – Resumo dos montantes liquidados por empresa e produto. ....	81