



**Leandro Bispo da Silva**

**Metodologia para Otimização da Contratação de  
uma Distribuidora Através de Leilões de Energia**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de  
Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro

Abril de 2008



**Leandro Bispo da Silva**

**Metodologia para Otimização da Contratação de  
uma Distribuidora Através de Leilões 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. Reinaldo Castro Souza**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Ricardo Tanscheit**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. José Francisco Moreira Pessanha**  
CEPEL

**Dr. Marco Antonio de Paiva Delgado**  
ABRADEE

**Dra. Mônica Barros**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. João Carlos de Oliveira Aires**  
UGF

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

Rio de Janeiro, 17 de abril de 2008

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

## Leandro Bispo da Silva

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense - UFF no ano de 2004. Entre 2004 e 2005 trabalhou na gestão de um projeto corporativo da Ampla, que consistia na formação de propostas e na execução de projetos de engenharia para grandes clientes. Desde o segundo semestre de 2005, exerce o cargo de Analista de Regulação na Superintendência de Regulação Econômica da Light, atuando na área de estudos tarifários e de análise e aplicação das regulamentações específicas do setor, principalmente em temas que envolvem questões do âmbito da Engenharia Elétrica.

### Ficha Catalográfica

Silva, Leandro Bispo da

Metodologia para otimização da contratação de uma distribuidora através de leilões de energia / Leandro Bispo da Silva ; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2008.

167 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia. Leilões. 4. Contratos. 5. Previsão de Consumo. 6. Simulações. 7. Otimização. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meus queridos pais Laercio e Tânia, minha irmã Tatiana e meu amor  
Fernanda, por todo apoio e confiança.

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que me supriu com muita força e saúde para vencer todas as dificuldades.

Aos meus pais pelo carinho e educação a mim passados em todos os momentos.

À minha irmã que sempre esteve ao meu lado me passando muita força.

À minha amada Fernanda, o anjo de minha vida, por toda compreensão e amor.

Ao meu orientador Professor Reinaldo Castro Souza, pelo apoio a mim prestado no desenvolvimento deste trabalho, pelo seu pronto atendimento às dúvidas e pelo estímulo transmitido a todo instante.

À Professora Mônica Barros, pela atenção, simpatia e colaboração no entendimento de pontos importantes da dissertação.

Aos meus amigos da Light, que sempre entenderam minhas dificuldades e sempre me apoiaram.

À Ângela Gomes e ao Fernando Ferro, por toda confiança depositada em mim, e pela compreensão ao respeitar todos os meus limites para conciliar dois importantes desafios.

A todos meus familiares e amigos por caminharem junto a mim sempre que preciso.

## Resumo

Silva, Leandro Bispo; Souza, Reinaldo Castro (Oreintador). **Metodologia para Otimização da Contratação de uma Distribuidora através de Leilões de Energia**. Rio de Janeiro, 2008. 167p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o novo modelo do setor elétrico implantado no início desta década, vários desafios foram impostos aos agentes dessa área. Para os agentes de distribuição, o modelo implica em procurar otimizar processos, sempre mantendo certo nível de qualidade dos serviços, monitorado pelo agente regulador. Uma das obrigações das distribuidoras é a contratação adequada de energia para fornecimento de seus clientes considerando períodos futuros. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma estratégia de apoio às decisões de uma distribuidora de energia para a contratação em leilões de energia elétrica. O método contempla uma etapa de previsão de consumo de energia num horizonte de cinco anos, e a partir dos valores estimados e de outros componentes formadores dos custos de contratação, como o Valor de Referência Anual e o Preço de Liquidação de Diferenças, realiza simulações de cenários, que visam propiciar uma otimização na formação da carteira de contratos. Ao final são definidos os percentuais ótimos de contratação, que garantam o atendimento completo ao mercado cativo da distribuidora, e que minimizam os riscos de aplicações de penalidades por sub ou sobrecontratação.

## Palavras-chave

Energia; Leilões; Contratos; Previsão de Consumo; Simulações; Otimização.

## Abstract

Silva, Leandro Bispo; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Methodology to Optimization of Energy Auctions Contracts to a Company of Distribution.** Rio de Janeiro, 2008. 167p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The implementation of the new model for the electrical sector in Brazil resulted in big challenges to the agents involves in this market. For the distributing utilities agents, in particular, the model somehow requires an optimization of all their processes but, at the same time, keeping the quality of the services supplied to their clients within the level stated by the regulator. Among these challenges, the distributing utilities, within the new model, have to perform the correct acquisition of energy from the supply utilities for future periods (up to 5 years ahead). This thesis aims to provide tools to help a distributing utility on the decision of energy acquisition on the electrical energy auctions. The approach includes a stage of energy consumption forecasts up to 5 – years – ahead and simulation stage where the demand forecasts and the energy prices series are the random variables implemented in a simulation scheme that generates possible energy acquisition scenarios. At the end, the optimal energy acquisition are obtained in such a way that the captive utility is fully contracted for the next five years where the utility penalties for under or over acquisition are minimized.

## Keywords

Energy; Auctions; Contracts; Consumption Forecast; Simulation; Optimization.

## Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Objetivos gerais	19
1.2.	Objetivos específicos	20
1.3.	Delimitações	20
1.4.	Estrutura do trabalho	20
2	Conjuntura e Cenário energético brasileiro	26
2.1.	Desempenho do setor em 2007	28
2.2.	Perspectivas para 2008	30
3	Comercialização de energia elétrica	32
3.1.	Leilões de energia	33
3.1.1.	Ambientes de Contratação	33
3.1.2.	Características dos leilões	41
4	Modelo de previsão de consumo de energia elétrica	46
4.1.	Modelo de regressão dinâmica	48
4.2.	Variáveis do modelo de previsão	50
4.2.1.	Variável dependente	50
4.2.2.	Variáveis explicativas	52
4.3.	Procedimentos de modelagem	55
4.4.	Modelos definidos por classe de consumo	58
4.4.1.	Modelos de cada classe de consumo com exceção de Industrial AT	58
4.4.2.	Classe de consumo industrial AT	72
4.5.	Cenários considerados para as variáveis explicativas	74
4.6.	Aplicação do modelo e resultados de previsão obtidos	76
5	Simulação do PLD médio anual	77
5.1.	Determinação dos PLDs para simulação	78
5.1.1.	Passo 1: Estimção de fatores sazonais	79
5.1.2.	Passo 2: Obtenção dos Custos Marginais de Operação	81
5.1.3.	Passo 3: Determinação do PLD médio anual	83
5.1.4.	Passo 4: Reamostragem das séries de PLD's médios anuais	83
6	Simulação dos custos de contratação de energia	89
6.1.	Percentual de contratação do consumo estimado	90
6.2.	Consumo previsto	91
6.3.	Desvio padrão da previsão	91
6.4.	Consumo realizado	92
6.5.	Valor anual de referência - VR	93
6.6.	Mix da empresa	95
6.7.	Preço médio de liquidação das diferenças – $PLD_{méd}$ anual	97
6.8.	Custos anuais de contratação	98
6.8.1.	Custo de aquisição da energia	98
6.8.2.	Perda por não repasse do custo na CCEE por subcontratação	99
6.8.3.	Multa por subcontratação	99
6.8.4.	Custo de sobrecontratação acima de 103% da demanda	100
6.9.	Análise das simulações	101

7	Otimização dos custos de contratação	114
7.1.	Configurações envolvidas na otimização	114
7.2.	Otimizações realizadas	116
7.2.1.	Otimização nº. 1	116
7.2.2.	Otimização nº. 2	117
7.2.3.	Otimização nº. 3	118
7.2.4.	Otimização nº. 4	119
7.2.5.	Otimização nº. 5	120
7.3.	Análise dos resultados das principais otimizações de custo	120
7.4.	Otimização pela minimização das penalidades	121
7.5.	Perdas elétricas do sistema de distribuição	133
7.6.	Fluxograma geral	136
8	Conclusões	141
9	Referências bibliográficas	152
	Apêndice A Algoritmos Genéticos	158
A.1.	Introdução aos Algoritmos Genéticos	158
A.2.	Caracterização dos Algoritmos Genéticos	160
A.2.1.	Problema	160
A.2.2.	Representação	160
A.2.3.	Decodificação	161
A.2.4.	Avaliação	161
A.2.5.	Seleção	162
A.2.6.	Operadores Genéticos	163
A.2.7.	Inicialização da população	165
A.3.	Técnicas de reprodução	165
A.4.	Parâmetros e critérios de parada	166
A.5.	Métodos de solução	166
A.6.	Algumas Recomendações	167

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – PLD's Mínimo e Máximo para o ano de 2008 (Fonte: CCEE)	37
Tabela 3.2 – Valores de Referência Anual para os últimos 4 anos (Fonte: CCEE)	41
Tabela 4.1 – Classes a terem a previsão de consumo modelada	52
Tabelas 4.2 – Variáveis Explicativas Referentes aos Níveis de Preços na Economia (Fonte: IBGE)	53
Tabelas 4.3 – Variáveis Explicativas Referentes às Características do Faturamento da Light (Fonte: Light SESA)	53
Tabelas 4.4 – Variáveis Explicativas Referentes à Estrutura de Renda dos Consumidores (Fonte: IBGE)	54
Tabelas 4.5 – Variáveis Explicativas Referentes às Atividades Econômicas (*Fonte: IBGE – **Fonte: FIRJAN)	54
Tabelas 4.6 – Variáveis Explicativas Referentes à Temperatura (Fonte: INMET-RJ)	54
Tabelas 4.7 – Variáveis Explicativas Referentes ao Calendário (Fonte: Light SESA)	55
Tabelas 4.8 – Variáveis de Intervenção ( <i>dummies</i> )	55
Tabela 4.9 – Ano de início das Variáveis Explicativas	57
Tabela 4.10 – Modelos Testados para Classe Residencial MT	59
Tabela 4.11 – Modelos Testados para Classe Residencial BT	60
Tabela 4.12 – Modelos Testados para Classe Comercial AT	61
Tabela 4.13 – Modelos Testados para Classe Comercial MT	62
Tabela 4.14 – Modelos Testados para Classe Comercial BT	63
Tabela 4.15 – Modelos Testados para Classe Industrial MT	64
Tabela 4.16 – Modelos Testados para Classe Industrial BT	65
Tabela 4.17 – Modelos Testados para Classe Rural	66
Tabela 4.18 – Modelos Testados para Classe Poder Público	67
Tabela 4.19 – Modelos Testados para Classe Serviços Públicos: Tração Elétrica	68
Tabela 4.20 – Modelos Testados para Classe Serviços Públicos: Água Saneamento e Esgoto	69
Tabela 4.21 – Modelos Testados para Classe Iluminação Pública	70

Tabela 4.22 – Modelos Testados para Classe Consumo Próprio	71
Tabela 4.23 – Variáveis presentes em mais de um modelo	72
Tabela 4.24 – Valores em MWh do consumo previsto para classe Industrial AT	74
Tabela 4.25 – Variáveis explicativas selecionadas e os respectivos métodos utilizados para gerar seus cenários futuros	75
Tabela 4.26 – Consumo Previsto para 2008 até 2012 por classes	76
Tabela 4.27 – Consumo Total Previsto para 2008 até 2012 e a Taxa de Crescimento	76
Tabela 5.1 – Fatores Sazonais Multiplicativos Obtidos e os Erros do Modelo	81
Tabela 5.2 – Quadro demonstrativo contendo as 2000 séries de PLD médio anual	83
Tabela 6.1 – Representação Ilustrativa da Variável 1: Percentual de Contratação	91
Tabela 6.2 – Representação Ilustrativa da Variável 2: Consumo Previsto	91
Tabela 6.3 – Representação Ilustrativa da Variável 3: Desvio Padrão	92
Tabela 6.4 – Representação Ilustrativa da Variável 4: Consumo Realizado	93
Tabela 6.5 – Representação Ilustrativa da Atualização Modetária do VR	94
Tabela 6.6 – Representação Ilustrativa da Variável 5: Valor Anual de Referência (Fonte: REH nº 477/2007 e REH nº 550/07)	95
Tabela 6.7 – Representação Ilustrativa da Variável 6: <i>Mix</i> da Empresa (Fonte: Light SESA)	97
Tabela 6.8 – Representação Ilustrativa da Variável 7: PLD médio anual	98
Tabela 6.9 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo 2008	104
Tabela 6.10 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo 2009	105
Tabela 6.11 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo 2010	107
Tabela 6.12 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo 2011	108
Tabela 6.13 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo 2012	110
Tabela 6.14 – Estatísticas Descritivas da Distribuição Custo Total 2008 a 2012	112
Tabela 7.1 – Informações Gerais e Resultados da Otimização 1	116
Tabela 7.2 – Informações Gerais e Resultados da Otimização 2	117
Tabela 7.3 – Informações Gerais e Resultados da Otimização 3	118
Tabela 7.4 – Informações Gerais e Resultados da Otimização 4	119
Tabela 7.5 – Informações Gerais e Resultados da Otimização 5	120

Tabela 7.6 – Quadro Resumo com os percentuais de contratação gerados pelo modelo de otimização	120
Tabela 7.7 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade 2008	125
Tabela 7.8 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade 2009	126
Tabela 7.9 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade 2010	127
Tabela 7.10 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade 2011	128
Tabela 7.11 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade 2012	129
Tabela 7.12 – Estatísticas Descritivas da Distribuição do Custo de Penalidade para todo o período de 2008 a 2012	131
Tabela 7.13 – Energia a ser contratada para atendimento do mercado cativo da distribuidora com parcela de perdas elétricas embutida	136
Tabela A.1 – Representação em Algoritmos genéticos de acordo com o tipo de problema	161

## Lista de figuras

Figura 3.1 – Representação do Montante do Mercado <i>Spot</i> Obtido Através da Diferença entre Energia Contratada e Energia Verificada	32
Figura 3.2 – Ordem cronológica – com exemplo – de realização dos leilões até o ano de entrega	42
Figura 4.1 – Esquema Básico do Modelo Causal	47
Figura 4.2 – Fluxograma para Construção de um Modelo de Regressão Dinâmica	50
Figura 4.3 – Parcelas de Consumo por Classes no Mercado da Light em 2007 (Fonte: Relatório Anua 2007 – Light SESA)	51
Figura 4.4 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica residencial MT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	59
Figura 4.5 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica residencial BT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	60
Figura 4.6 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica comercial AT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	61
Figura 4.7 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica comercial MT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	62
Figura 4.8 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica comercial BT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	63
Figura 4.9 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica industrial MT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	64
Figura 4.10 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica industrial BT (linha preta), valores previstos para o período teste (linha vermelha) e intervalos de confiança (linha azul)	65
Figura 4.11 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica rural (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	66

Figura 4.12 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica poder público (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	67
Figura 4.13 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica tração elétrica (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	68
Figura 4.14 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica água saneamento esgoto (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	69
Figura 4.15 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica iluminação pública (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	70
Figura 4.16 – Gráfico gerado pelo programa de previsão: série histórica consumo próprio (linha preta) e valores previstos para o período teste (linha vermelha)	71
Figura 4.17 – Consumo Industrial AT da Light: Realizado (2005-2007) e Previsto (2008-2012)	74
Figura 5.1 – Representação esquemática da geração do PLD semanal	78
Figura 5.2 – Exemplo do comportamento dos valores dos PLDs reais x PLDs estimados x Energia natural afluyente no ano de 2006 (Fontes: ONS / CCEE)	80
Figura 5.3 – Série de Consumo (GWh) do Subsistema SE/CO (Linha Vermelha: previsão; Linhas azuis: Intervalos de Confiança – limites inferior e superior)	81
Figura 5.4 – Distribuição e Estatísticas do PLD Médio Anual 2008	85
Figura 5.5 – Distribuição e Estatísticas do PLD Médio Anual 2009	85
Figura 5.6 – Distribuição e Estatísticas do PLD Médio Anual 2010	86
Figura 5.7 – Distribuição e Estatísticas do PLD Médio Anual 2011	86
Figura 5.8 – Distribuição e Estatísticas do PLD Médio Anual 2012	87
Figura 5.9 – Etapas para obtenção do PLD médio anual	88
Figura 6.1 – Representação esquemática do processo de simulação de custos de contratação de energia	90
Figura 6.2 – Pilha de contratos de energia de uma distribuidora com indicação de suas cargas real e regulatória	96
Figura 6.3 – Distribuição do consumo realizado simulado para 2008	102
Figura 6.4 – Distribuição do consumo realizado simulado para 2009	102

Figura 6.5 – Distribuição do consumo realizado simulado para 2010	102
Figura 6.6 – Distribuição do consumo realizado simulado para 2011	102
Figura 6.7 – Distribuição do consumo realizado simulado para 2012	102
Figura 6.8 – Distribuição do custo total simulado para 2008	103
Figura 6.9 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total em 2008	104
Figura 6.10 – Distribuição do custo total simulado para 2009	105
Figura 6.11 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total em 2009	106
Figura 6.12 – Distribuição do custo total simulado para 2010	106
Figura 6.13 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total em 2010	107
Figura 6.14 – Distribuição do custo total simulado para 2011	108
Figura 6.15 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total em 2011	109
Figura 6.16 – Distribuição do custo total simulado para 2012	110
Figura 6.17 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total em 2012	111
Figura 6.18 – Distribuição do custo total simulado para todo o período	112
Figura 6.19 – Análise de sensibilidade aos valores de entrada – Custo total para todo o período	113
Figura 7.1 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em 2008	123
Figura 7.2 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em 2009	123
Figura 7.3 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em 2010	123
Figura 7.4 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em 2011	123
Figura 7.5 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em 2012	123
Figura 7.6 – Componente de Perda devida à sobrecontratação acima de 103% em todo o período 2008 - 2012	124
Figura 7.7 – Distribuição do total de penalidade para 2008	125
Figura 7.8 – Distribuição do total de penalidade para 2009	126
Figura 7.9 – Distribuição do total de penalidade para 2010	127

Figura 7.10 – Distribuição do total de penalidade para 2011	128
Figura 7.11 – Distribuição do total de penalidade para 2012	129
Figura 7.12 – Visão geral das distribuições de probabilidade do total de penalidade por ano	130
Figura 7.13 – Distribuição do total de penalidade para todo o período de 2008 a 2012	131
Figura 7.14 Análise de sensibilidade da função penalidade para todo o período de 2008 a 2012	132
Figura A.1 – Analogia entre a Evolução Natural e os Algoritmos Genéticos	158
Figura A.2 – <i>Pseudo-código</i> para desenvolvimento de um Algoritmo Genético	159
Figura A.3 – Demonstração para medir a aptidão de dois indivíduos na busca de maximizar a função $f(x) = x^2$	162
Figura A.4 – Representação da proporção da aptidão relativa a indivíduos no processo de seleção	163
Figura A.5 – Representação ilustrativa da aplicação do operador <i>crossover</i>	164
Figura A.6 – Representação ilustrativa da aplicação do operador mutação	164

*O futuro não é um lugar onde estamos indo, mas um lugar que estamos criando. O caminho para ele não é encontrado, mas construído e o ato de fazê-lo muda tanto o realizador quando o destino.*

*Antoine de Saint-Exupery, Biografia*